



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

ИЗДАТЕЛЬ:

Международная ассоциация  
«Сварка»

Адрес редакции:

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

Редакторы:

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

Свидетельство о государствен-  
ной регистрации КВ 4788  
от 09.01.2001.

Журнал входит в перечень  
утвержденных ВАК Украины  
изданий для публикации трудов  
соискателей ученых степеней.  
При перепечатке материалов  
ссылка на журнал обязательна.  
За содержание рекламных  
материалов редакция журнала  
ответственности не несет.  
Цена договорная.

СОДЕРЖАНИЕ

НОВОСТИ ..... 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

*Кучук-Яценко С. И., Григоренко Г. М., Новикова Д. П.,  
Загадарчук В. Ф., Харченко Г. К., Григоренко С. Г.,  
Алексеев И. И.* Влияние энерговложения на пластические  
свойства соединений стали Х70 при контактной стыковой  
сварке оплавлением ..... 5

*Лобанов Л. М., Пащин Н. А., Логинов В. П., Смиленко В. Н.*  
Изменение напряженно-деформированного состояния после  
электродинамической обработки сварных соединений  
алюминиевого сплава АМгб ..... 11

*Моравецкий С. И., Паршенков Н. А., Сокирко В. А.*  
Особенности электромагнитных воздействий на металлы и их  
сварные соединения (Обзор) ..... 20

*Харченко Г. К., Ищенко А. Я., Фальченко Ю. В., Муравейник  
А. Н., Гордань Г. Н.* Сварка давлением композита  
АМг5+23% SiC ..... 27

*Размышляев А. Д., Дели А. А., Миронова М. В.* Влияние  
продольного магнитного поля на производительность расп-  
лавления проволоки при электродуговой наплавке под  
флюсом ..... 31

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

*Никифорчин Г. Н., Студент О. З., Степанюк С. М., Марков  
А. Д.* Оценка технического состояния сварных соединений  
паропроводов ТЭС с учетом водородной деградации  
эксплуатируемого металла ..... 36

*Емельянов О. А., Славинский Р. Л., Яременко Д. В.*  
Вторичные напряжения в сварных мостовых кранах ..... 42

*Болотов Г. П.* Влияние состояния поверхности электродов на  
устойчивость тлеющего разряда в условиях сварки ..... 46

*Цыбульский Г. А.* Автоматизация процедур обучения роботов  
семейства «PUMA» ..... 49

*Коляда В. А., Шаповалов Е. В.* Стереоскопическое измерение  
пространственных координат стыков в сварочном произво-  
дстве ..... 51

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

*Ланкин Ю. Н., Байштрук Е. Н.* Датчик уровня металлической  
ванны при ЭШС ..... 55

Патенты в области сварочного производства ..... 57

По зарубежным журналам ..... 60

ХРОНИКА

Выставка «Сварка. Родственные технологии-2007» в Киеве ..... 63

В. К. Лебедеву — 85 ..... 65

ИНФОРМАЦИЯ ..... 67

Разработано в ИЭС ..... 19, 41, 54

# Avtomaticheskaya Svarka

(Automatic Welding)

№ 6 (650)  
June 2007  
Published since 1948

WELDING – CUTTING – SURFACING – BRAZING – COATING

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief  
B.E.PATON

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

THE INTERNATIONAL  
EDITORIAL COUNCIL:

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

FOUNDERS:

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

PUBLISHER:

International Association «Welding»  
Address of Editorial Board:  
11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine  
Tel.: (38044) 287 63 02, 529 26 23  
Fax: (38044) 528 04 86  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:

E. N. Kazarova, T. V. Yushtina  
*Electron galley:*  
I. S. Batasheva, L. N. Gerasimenko,  
A.I.Sulima, I. R. Naumova,  
I. V. Petushkov

State Registration Certificate  
KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved.

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

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

## CONTENTS

NEWS ..... 3

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL

*Kuchuk-Yatsenko S. I., Grigorenko G. M., Novikova D. P., Zagadarchuk V. F., Kharchenko G. K., Grigorenko S. G., Alekseenko I. I.* Effect of heat input on ductile properties of steel X70 joints in flash-butt welding ..... 5

*Lobanov L. M., Pashchin N. A., Loginov V. P., Smilenko V. N.* Change in stress-strain state after electrodynamic treatment of welded joints of aluminium alloy AMg6 ..... 11

*Moravetsky S. I., Parshenkov N. A., Sokirko V. A.* Specifics of electromagnetic actions on metals and their welded joints (Review) ..... 20

*Kharchenko G. K., Ishchenko A. Ya., Falchenko Yu. V., Muraviniuk A. N., Gordan G. N.* Pressure welding of composite AMg5+23% SiC ..... 27

*Razmyshlyayev A. D., Deli A. A., Mironova M. V.* Effect of longitudinal magnetic field on efficiency of wire melting in electric submerged arc surfacing ..... 31

### INDUSTRIAL

*Nikiforchin G. N., Student O. Z., Stepanyuk S. M., Markov A. D.* Evaluation of technical condition of welded joints of steam pipelines of HES with account for hydrogen degradation of in-service metal ..... 36

*Emelianov O. A., Slavinsky R. L., Yaremenko D. V.* Secondary stresses in welded overhead traveling cranes ..... 42

*Bolotov G. P.* Effect of electrode surface condition on stability of glowing discharge under welding conditions ..... 46

*Tsybulkin G. A.* Automation of procedures for training robots of «PUMA» company ..... 49

*Kolyada V. A., Shapovalov E. V.* Stereoscopic measurement of spatial coordinates of weld butts in welding manufacturing ..... 51

### BRIEF INFORMATION

*Lankin Yu. N., Baishtruk E. N.* Sensor of metal pool level in ESW ..... 55

Patents in the field of welding ..... 57

Review of foreign journals ..... 60

### NEWS

Exhibition «Welding. Related technologies-2007» in Kiev ..... 63

Lebedev V.K. is 85 ..... 65

INFORMATION ..... 67

Developed at PWI ..... 19, 41, 54

**ПРОДЛЕНИЕ РЕСУРСА  
УСТАНОВКАМ ВПР  
«КИЕВ-4»**

НПП «Плазматрон» — традиционный разработчик плазменных установок. Наряду с организацией и созданием установок нового поколения — универсальных для воздушно-плазменной резки (ВПР) и электродуговой сварки типа «Дуплекс», экономичных и мобильных «Киев-5», «Киев-8», а с 2007 г. «Днепр-2», обеспечивающих резку металлов толщиной до 65 мм резаками с воздушным охлаждением, «Плазматрон» предлагает модернизацию установок типа «Киев-4» и «Киев-4М». Последние выпускались в 70-80-е годы прошлого века, но по-прежнему находятся в эксплуатации на многих промышленных предприятиях Украины и других стран СНГ.

Установки ретро, используемые для ручной ВПР, снабжены ручным резаком ВПР-11 с низким ресурсом катодно-сопловой пары, выход из строя которой зачастую приводит к сторанию катодного узла и дальнейшей непригодности резака в целом. При использовании для ручной резки машинного резака ВПР-15 с накладными рукоятками более массивная катодно-сопловая пара, хотя и обуславливает удовлетворительный ресурс ее работы, однако большие габариты и масса резака в таком исполнении затрудняют его эксплуатацию и маневренность при вырезке деталей сложной конфигурации.

Они относятся к классу мощных, способных осуществлять резку сталей толщиной до 70 мм на токе 300 А. Применение их для ручной и машинной резки металлов малых и средних толщин (1...40 мм) на меньших ступенях токов (100, 200 А) проблематично из-за невозможности получения удовлетворительного качества резки в силу несоответствия



геометрии катодно-сопловой камеры резаков.

На усмотрение предприятий (по результатам обследования состояния устаревших установок и с учетом перспективных производственных задач) предлагаются различные варианты доработки схемы источников питания установок, оснащение их машинными или ручными резаками с воздушным (на токах 100, 150 А) или водяным (на токах 200...300 А) охлаждением. При этом обеспечивается удовлетворительное качество резки металлов малых и средних толщин. Легкие и малогабаритные руч-



ные резаки с водяным охлаждением на токе до 300 А обладают высоким ресурсом работы катодно-сопловой пары и обеспечиваются устройством, значительно снижающим вредные газопылевыведения, характерные для резки металлов средних и больших толщин. Все плазменные резаки выполнены с быстросменными катодно-сопловыми узлами. Возможен вариант замены устаревших установок новыми со скидкой в зависимости от состояния заменяемой установки.

Предприятие гарантирует быстрое и качественное решение проблем заказчика с бесплатным обучением его специалистов, передачей технологических рекомендаций и последующей поставкой сменных деталей и узлов.

**НКМЗ ПРИСТУПИЛ  
К РЕКОНСТРУКЦИИ СТАНА  
В ВЕНГРИИ**

Новокраматорский машиностроительный завод (г. Краматорск Донецкой обл.) заканчивает поставку оборудования первого этапа реконструкции стана трио Лаута прокатного завода Дунаферр (г. Будапешт, Венгрия). Параллельно с реализацией этого контракта НКМЗ приступил ко второму этапу обновления стана. Срок поставки — 2007 год.

Внедрение реконструктивных мероприятий, которые проведут специалисты НКМЗ, позволит заводу Дунаферр уже в следующем году увеличить производство толстого листа со 120 до 200 тыс. т в год, обеспечив высокие параметры выпускаемой продукции.

**НКМЗ ЗАКЛЮЧИЛ  
КРУПНЫЙ КОНТРАКТ НА  
РЕКОНСТРУКЦИЮ СТАНА  
ММК им. ИЛЬИЧА**

НКМЗ продолжает техническое перевооружение крупнейшего в Украине предприятия — Мариупольского металлургического комбината им. Ильича. После недавних реконструкции и ввода здесь в эксплуатацию двух современных слябовых машин непрерывного литья заготовок НКМЗ и ММК им. Ильича подписали новый крупный контракт на изготовление и поставку оборудования для реконструкции стана 1700 горячей прокатки. Главная цель реконструкции — повышение конкурентоспособности готовой продукции. Для достижения этой цели в объеме подписанного делового соглашения намечено установить комплекс оборудования универсальной чистовой клетки кварто № 5А, а также двух новых моталок с оборудованием транспортировки и уборки рулонов. Согласно контракту за 15 месяцев будет

спроектировано, изготовлено и отгружено заказчику более 4,5 тыс. т наукоемкого оборудования. С установкой его на стане 1700 г.п. производительность будет доведена до 4 млн т проката в год.

### ЗНАЧИТЕЛЬНОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАПЛАВКИ

Системам трубопроводов и другим технологическим компонентам в обрабатывающей промышленности и на электростанциях часто необходимо противостоять химической или агрессивной среде. Коррозионностойкое плакирование является недорогим методом повышения их срока службы. Немецкая компания «Uhlig Rohbogen» производит теплообменники и мембранные компоненты для применения на электростанциях,

работающих на низкокачественном топливе, и обрабатывающих заводах. Основное тело трубы, изготовленное из недорогого основного материала, плакируется коррозионностойкой нержавеющей сталью. Высокоэффективный цифровой способ сварки TimeTwin предлагает



сварщикам значительные преимущества по сравнению с традиционными процессами такие, как повышенная гибкость в переналаживании установки, улучшенное качество сварки и существенное увеличение эффективности.

Компания «Uhlig Rohbogen», которая находится в Лонгелшейме, Нижняя Саксония, считается лидером в производстве гофрированных труб и топливных технологий для котлостроительной промыш-

ленности. На данный момент компания использует шесть установок для плакирования труб и девять установок для плакирования мембран. Для особо высококачественной работы и сварки корневых проходов труб из ответственных материалов компания использует цифровые сварочные установки от фирмы «Fronius».

Сварку ТИГ было решено заменить более мощным цифровым способом TimeTwin (сдвоенными дугами). Этот процесс, использующий плавление двух металлических электродов в защитном газе, позволил компании увеличить скорость наплавки в два раза, что дало значительную экономию времени.

Специалисты «Wolfgang Hoffmeister» считают это одним из наиболее важных преимуществ цифрового TwinTime процесса. В компании «Uhlig» оптимизировали этот процесс с помощью специальной сварочной установки, на которой три трубы диаметром 500...1200 мм с толщиной стенки 20 мм соединяются и прикрепляются заклепками к поворотному диску, а затем привариваются с помощью установки TimeTwin. Медные подкладки обес-

печивают равномерно сформированный корень шва. Цифровой процесс TimeTwin характеризуется, во-первых, наличием двух независимо изолированных присадочных проволок в одном газовом сопле, и, во-вторых, использованием полностью цифрового контроля сварочного процесса. Цифровые установки TimeTwin 4000/5000 имеют два источника питания и



две установки для подачи проволоки, а также цифровой процессор обработки сигнала каждая. Импульсная дуга на ведущем электроде и стандартная дуга на хвостовом электроде обеспечивают максимальную скорость сварки и хорошее замыкание зазора между свариваемыми кромками. Расположение дуг другим образом приводит к особенно глубокому прожогу. Процесс гарантирует две очень стабильные дуги с оптимальным отрывом капли и со значительно увеличенной производительностью наплавки.

Цифровые сварочные системы TwinTime имеют производительность наплавки в 2-2,5 раза больше по сравнению с системами с одной проволокой.

Кроме того, применение этого процесса сопровождается возможностью значительного увеличения сварочной скорости по сравнению с процессами с одной дугой.





# ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГОВЛОЖЕНИЯ НА ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ Х70 ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ ОПЛАВЛЕНИЕМ

Академик НАН Украины С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, чл.-кор. НАН Украины Г. М. ГРИГОРЕНКО, Д. П. НОВИКОВА, канд. техн. наук, В. Ф. ЗАГАДАРЧУК, инж., Г. К. ХАРЧЕНКО, д-р техн. наук, С. Г. ГРИГОРЕНКО, канд. техн. наук, И. И. АЛЕКСЕЕНКО, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучено влияние энерговложения при контактной стыковой сварке оплавлением труб из стали 10Г2ФБ на пластические свойства сварных соединений. Показано, что ударная вязкость металла сварных соединений определяется его структурным состоянием и размером зерна. Для достижения стабильно высоких пластических свойств сварных соединений рекомендовано снижение энергоемкости процесса сварки, что обеспечивает формирование в металле соединений мелкозернистой двухфазной структуры — МАК-фазы в ферритной матрице.

*Ключевые слова:* контактная стыковая сварка оплавлением, энерговложение, низколегированная сталь, микроструктура, зерно, МАК-фаза, ударная вязкость

Контактная стыковая сварка оплавлением (КССО) нашла широкое применение в различных областях промышленного производства, в том числе в газовой промышленности при строительстве трубопроводов. Повышенный интерес к КССО объясняется прежде всего высоким и стабильным качеством сварных соединений в сочетании с высокой производительностью процесса сварки [1]. Качество соединений труб, полученных КССО, соответствует требованию действующего международного стандарта [2].

В последние годы на территории стран СНГ начато строительство трубопроводов нового поколения, рассчитанных на повышенное давление газа. При их сооружении используются толстостенные трубы из высокопрочных сталей класса прочности Х70 и Х80. Значительная часть таких трубопроводов будет сооружаться в северных районах РФ. В связи с этим новые нормативные документы устанавливают более высокие требования к качеству сварных соединений, в частности к ударной вязкости [3].

В ИЭС им. Е. О. Патона проведены исследования, направленные на изыскание путей повышения пластических свойств сварных соединений труб из стали класса прочности Х70, полученных КССО. Одним из основных факторов, определяющих формирование структуры металла сварного шва, выполненного КССО, является термический цикл, обусловленный энерговложением при сварке.

В работе [4] показано, что качественные соединения, выполненные КССО из различных низколегированных сталей, могут быть получены с

изменением термических циклов в широком диапазоне. При этом сокращение энерговложения с целью обеспечения требуемых свойств соединений необходимо сочетать с интенсивным оплавлением в период, предшествующий осадке, что сопровождается повышением потребляемой мощности. Однако при сварке труб (особенно с большими поперечными сечениями) в полевых условиях стремятся снизить мощность передвижных источников энергообеспечения. Поэтому в большинстве случаев предпочтение отдается режимам сварки с низкой удельной мощностью (10...14 В·А/мм<sup>2</sup>) и большим энерговложением.

Целью настоящей работы явилось исследование влияния структуры металла сварных швов трубной стали 10Г2ФБ класса прочности Х70, полученных КССО с различным энерговложением, на показатели ударной вязкости соединений.

Исследования проводили на пластинах из стали 10Г2ФБ производства Харцызского завода, вырезанных из труб с толщиной стенки 8 и 18 мм, ширина пластин составляла 300 мм. Благодаря проведенным ранее исследованиям [5] установлено, что при сварке пластин такой ширины достаточно точно моделируются условия нагрева и формирования соединений в процессе сварки труб большого диаметра. Используется трубная сталь следующего состава, мас. %: 0,078 С; 0,258 Si; 1,67 Mn; 0,05 Nb; 0,01 Ti; 0,017 Mo; 0,003 S; 0,007 P; 0,0026 O; 0,0061 N. Концентрация водорода составляла 1,64 см<sup>3</sup>/100 г. Сталь 10Г2ФБ характеризуется следующими механическими свойствами:  $\sigma_T = 516,8$  МПа;  $\sigma_B = 620$  МПа;  $\delta = 19\%$ ;  $KCV_{20} = 218,2$  Дж/см<sup>2</sup>.

В основу технологии соединения положен способ сварки непрерывным оплавлением с програм-

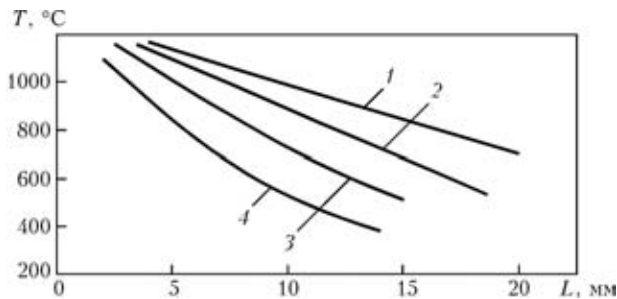


Рис. 1. Распределение температур в ЗТВ сварных соединений, полученных КССО при различной продолжительности и скорости оплавления: 1 —  $\tau = 180$  (режим А); 2 — 120; 3 — 60; 4 — 30 с (режим В);  $L$  — расстояние от линии соединения

мным изменением основных параметров, предусматривающий три периода оплавления [4]. В процессе сварки изменяли длительность второго периода и конечную скорость оплавления в третьем периоде.

Исследованные термические циклы сварки характеризуются семейством кривых температурных полей стыков, выполненных с различной длительностью и конечной скоростью оплавления (рис. 1). Предельно возможный нагрев можно получить при КССО на режиме А (рис. 1, кривая 1). Длительность оплавления в данном случае составляет 180 с, максимальная удельная потребляемая мощность в конечный период сварки — 12 В·А/мм<sup>2</sup> (рис. 2). Повышение температуры нагрева свыше приведенных значений приводит к снижению механических свойств соединения в связи с образованием дефектов структуры (рыхлостей, расслоения и др.). КССО на режиме В (рис. 1, кривая 4) обеспечивает отсутствие дефектов в зоне соединения (оксидных плен, непроваров) и формирование соединения с ЗТВ минимальной протяженности. Такие соединения удалось получить на пластинах меньшего сечения толщиной 8 мм при ограничении мощности лабораторной установки. Продолжительность оплавления в данном случае составляла 30 с, а максимальная удельная потребляемая мощность в конечный период сварки — 40 В·А/мм<sup>2</sup> (рис. 2, кривая 2).

Промежуточные режимы сварки (рис. 1, кривые 2 и 3) отличаются длительным оплавлением, максимальной потребляемой мощностью и обеспечивают уровень механических свойств, удов-

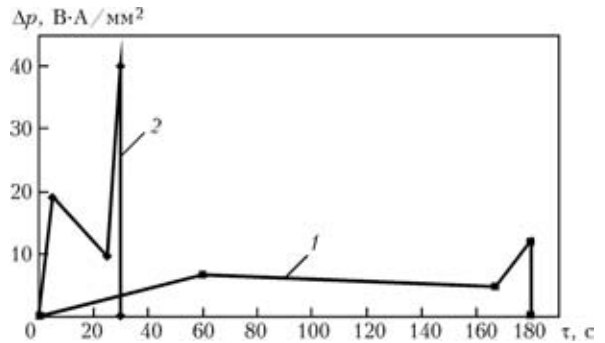


Рис. 2. Изменение удельной потребляемой мощности  $\Delta p$  при КССО на режимах А (1) и В (2) в различные моменты оплавления

летворяющих требованиям нормативов, кроме ударной вязкости  $KCV$ .

Механические свойства соединений, полученных на режимах А и В, приведены в таблице. Из приведенных данных видно, что различие в нагреве существенно влияет на ударную вязкость соединения. Поскольку в изломах ударных образцов дефекты отсутствовали, основной причиной снижения ударной вязкости соединений, полученных КССО на режиме А, было образование неблагоприятных структур.

С целью изучения влияния режимов сварки А и В на характер образовавшихся структур в металле зоны соединения и ЗТВ проведен сравнительный металлографический анализ.

Для определения балла аустенитного зерна микроструктуру образцов исследовали на микроскопе «Неофот-32» при увеличении 100 путем визуального сравнения с эталонными шкалами по ГОСТ 5639–82 после травления в нитале. При увеличении 1000 проводили идентификацию структурных составляющих после травления в пикрате натрия [6] и подсчет объемной доли второй фазы по методике, описанной в работе [7].

Исходная структура стали в состоянии после контролируемой прокатки представляет собой вытянутые вдоль проката перлитные выделения в ферритной матрице (рис. 3). Размер ферритного зерна соответствует 7–8 баллам, твердость — 2530...2540 МПа. Интегральную твердость образ-

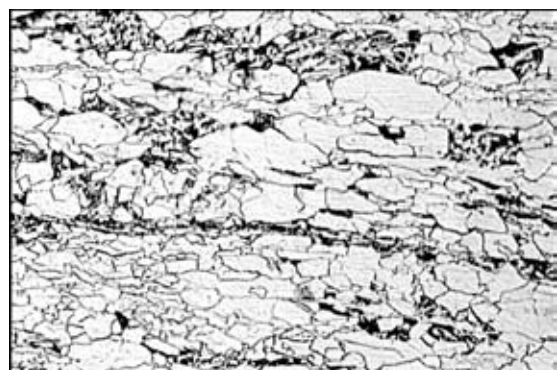


Рис. 3. Микроструктура (×500) стали 10Г2ФБ в состоянии поставки

**Механические свойства соединений, полученных КССО**

Режим сварки	$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\alpha$ , град	$KCV_{20}$ Дж/см <sup>2</sup>
А	471,1	606,4	21,3	180	18,4
В	515,3	619,4	19,2	180	208,3

Примечания. 1. Испытания образцов проводили в соответствии с требованиями стандарта API 1104. 2. Размер поперечного сечения ударного образца без надреза составлял 5×10 мм.



цов измеряли на твердомере Виккерса нагрузкой 50 Н (*HV* 5).

Характерной особенностью макроструктуры (рис. 4) является наличие в сварных стыках светлой полосы с мелкими темнотравящимися вкраплениями второй фазы и симметрично расположенными по обе стороны от нее ЗТВ.

Микроструктурный анализ позволяет выделить в стыках, выполненных на режимах *A* и *B*, наиболее характерные участки для проведения сравнительных металлографических исследований. Особенности структурных составляющих изучали в металле зоны соединения и ЗТВ в участках крупного зерна и нормализации, которые заметно отличаются друг от друга структурой и протяженностью.

В образце, выполненном на режиме *A*, в зоне соединения шириной 0,5 мм металл литой, рыхлости и оксидные пленки отсутствуют. Характерной структурой на этом участке является крупнозернистый феррит преимущественно 4 балла с незначительными дисперсными выделениями второй фазы. Твердость металла составляет 2500 МПа. К ней примыкают участки ЗТВ протяженностью примерно 2 мм с каждой стороны такой же зернистости (4 балла) ферритной матрицы и с расположенными в ней частицами второй фазы, объемная доля которых в структуре составляет 3,72 %. Травлением в пикрате натрия такие выделения идентифицированы как МАК-фаза [6]. Помимо

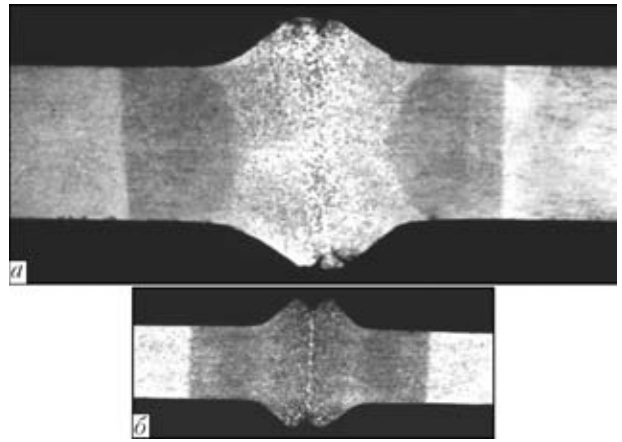


Рис. 4. Макрошлиф ( $\times 1,68$ ) сварных соединений, полученных КССО на режимах *A* (*a*) и *B* (*б*)

последней, в структуре отмечено образование по границам аустенитных зерен пластин полигонального феррита и элементов структуры с частицами МАК-фазы, расположенными параллельно друг другу и ориентированными вдоль ферритных границ. Согласно документу МИС такая структурная составляющая классифицируется как феррит с упорядоченной второй фазой (УВФ) [8]. Твердость на участке крупнозернистой структуры достигает значений 2800 МПа.

В районе исследуемых участков — зоны соединения и участка крупнозернистой структуры ЗТВ — температура нагрева металла достигает

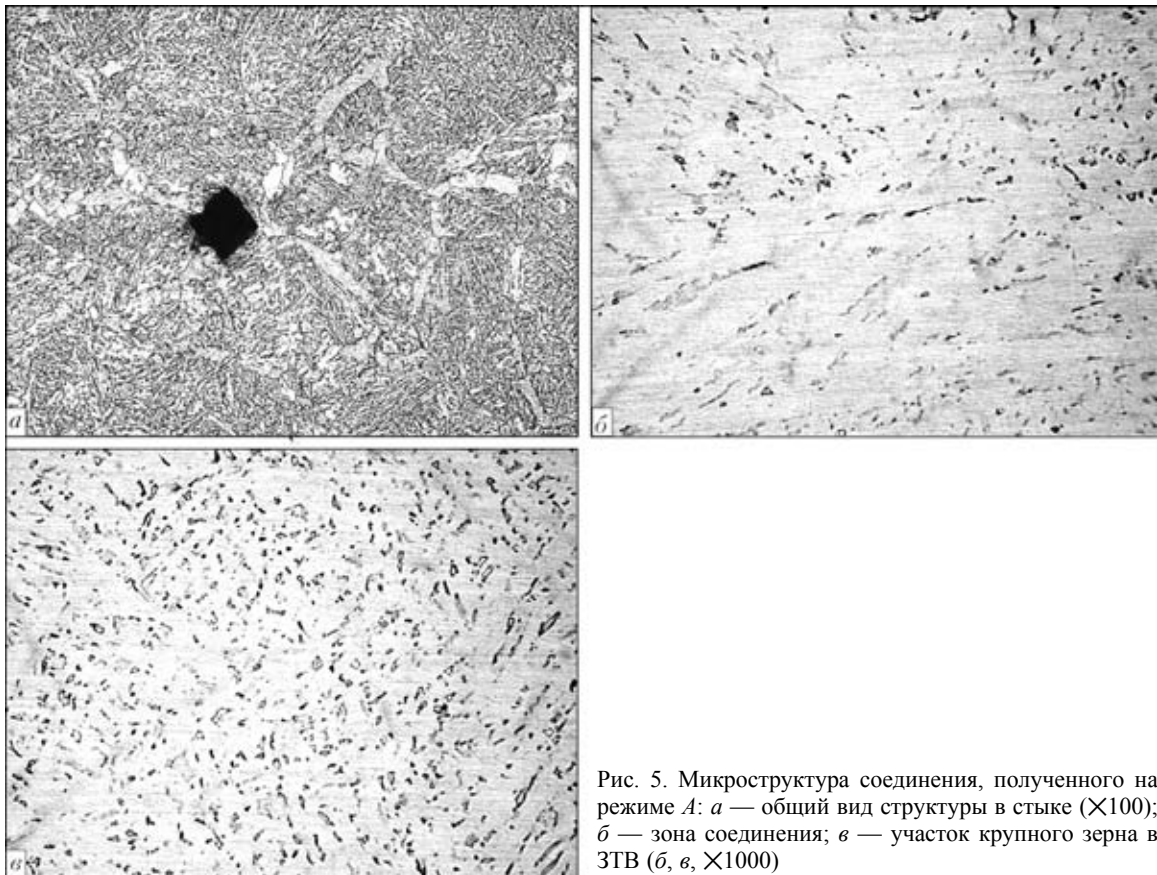


Рис. 5. Микроструктура соединения, полученного на режиме *A*: *a* — общий вид структуры в стыке ( $\times 100$ ); *б* — зона соединения; *в* — участок крупного зерна в ЗТВ (*б*, *в*,  $\times 1000$ )

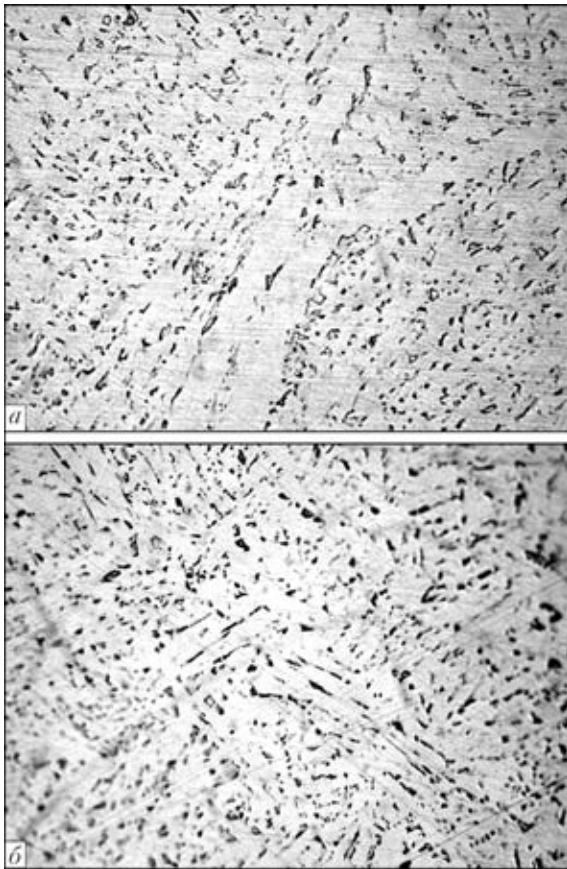


Рис. 6. Полигональный феррит (а) и феррит с УВФ (б) в стыке, сваренном на режиме А (а, б,  $\times 1000$ )

1200...1300 °С (см. рис. 1). Микроструктура сварного соединения, полученного на режиме А, представлена на рис. 5 и 6.

Для участка нормализации ЗТВ протяженностью примерно 11 мм, где металл нагревается от температуры несколько выше точки  $A_{c3}$  до 1100 °С, характерной является однородная структура с 7–8 баллом зерна, содержащая расположенные в ферритной матрице частицы МАК-фазы, более дисперсные, чем в предыдущих участках. Твердость участка нормализации составляет 2010...2020 МПа.

В ходе исследований структурного состояния образца, сваренного на режиме В (рис. 7), установлено, что в зоне соединения шириной 0,2 мм литой металл и оксидные пленки отсутствуют. В структуре присутствуют феррит преимущественно с размером зерна 6 баллов и редкие выделения МАК-фазы. Твердость этого участка равна 2010 МПа. Протяженность участка крупного зерна в металле ЗТВ составляет 0,8 мм. В структуре этого участка содержатся хаотически расположенные в ферритной матрице частицы МАК-фазы (2,55 %). Твердость металла на этом участке составляет 2400 МПа, размер зерна соответствует баллу 6.

Протяженность следующего структурного участка ЗТВ — участка нормализации — составляет 4,5 мм. Размер зерна на этом участке соответствует 7–10 баллам. Двухфазная структура — МАК-фаза в феррите — меняется незначительно.

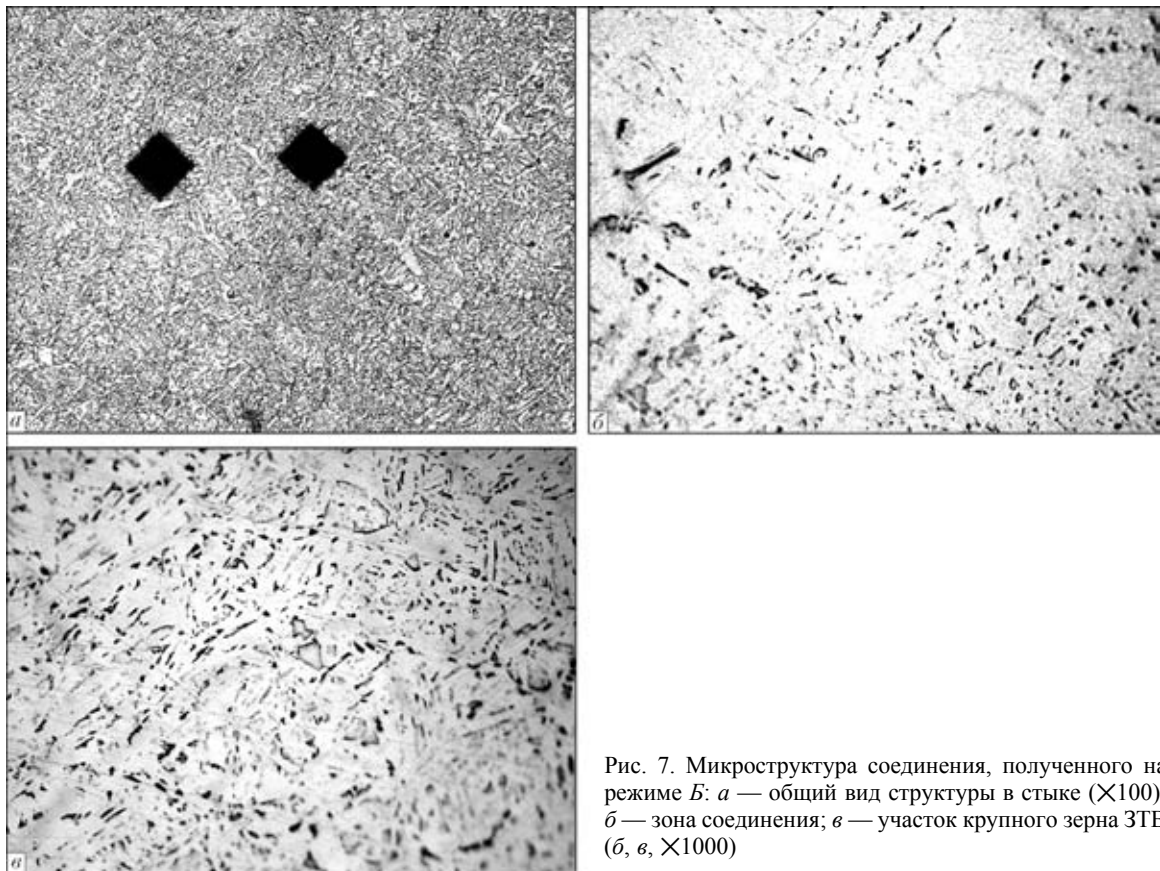


Рис. 7. Микроструктура соединения, полученного на режиме В: а — общий вид структуры в стыке ( $\times 100$ ); б — зона соединения; в — участок крупного зерна ЗТВ (б, в,  $\times 1000$ )



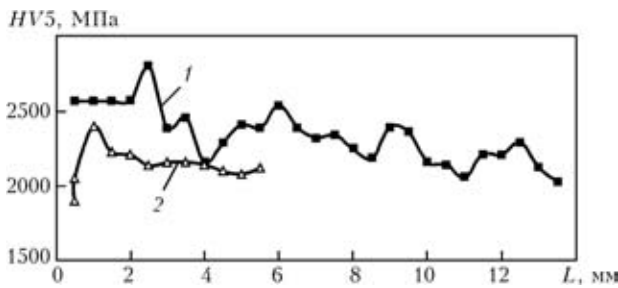


Рис. 8. Распределение твердости в зоне соединений, полученных КССО на режимах *A* (1) и *B* (2)

Можно отметить измельчение второй фазы по сравнению с зоной соединения и участком крупного зерна.

Характер распределения твердости в металле зоны соединения и ЗТВ сварных стыков, выполненных на режимах *A* и *B*, представлен на рис. 8. Как видно, твердость металла по зоне соединения соответственно равна 2500 и 2010 МПа. На участках крупнозернистой структуры ЗТВ твердость достигает значений 2800 и 2400 МПа. В участках нормализации исследованных соединений твердость металла равна 2010...2020 МПа. Наблюдаемое повышение твердости на участках крупнозернистой структуры может свидетельствовать о развитии в них процесса упрочнения металла, который может оказать отрицательное воздействие на ударную вязкость [9, 10].

В образце, сваренном на режиме *A*, в металле зоны соединения и крупнозернистой структуре ЗТВ зафиксированы наиболее низкие показатели ударной вязкости. В районе нормализации вязкость металла возрастает по мере удаления от участка крупного зерна и на расстоянии 3 мм от него достигает значений, близких к показателям основного металла (рис. 9, кривая 1). Все исследованные структурные участки в сварном образце, выполненном на режиме *B*, отличаются высокой ударной вязкостью (рис. 9, кривая 2).

Из анализа приведенных данных можно заключить, что наблюдаемые существенные отличия показателей ударной вязкости сварных соединений, полученных с разным энерговыделением, следует прежде всего связывать с изменением таких структурных факторов, как размер аустенитного зерна, структура зоны соединения и участки крупного зерна ЗТВ. Согласно современным представлениям ударная вязкость сварных соединений низколегированных низкоуглеродистых сталей в значительной мере определяется размером зерна. Укрупнение зерен оказывает отрицательное воздействие на ударную вязкость соединений [8]. Присутствие в структуре сварных соединений полигонального феррита [11, 12] и участков феррита с УВФ [13] также оказывают отрицательное влияние на ударную вязкость соединений. Принятые в настоящей работе термические циклы КССО

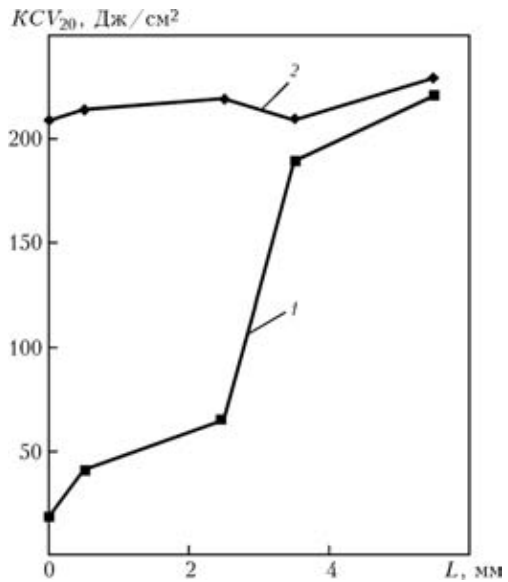


Рис. 9. Распределение ударной вязкости  $KCV_{20}$  в сварных соединениях, полученных КССО на режиме *A* (1) и *B* (2)

инициируют появление МАК-фазы в структуре стыков, сваренных на режимах *A* и *B*. В работах [9, 14] МАК-фаза отнесена к структурным факторам, вызывающим понижение пластичности и ударной вязкости металла швов из сталей указанного класса. Приняв во внимание изложенное выше, можно заключить, что выполнение сварки на режиме *A* способствует прежде всего укрупнению зерна в зоне соединения и на участке ЗТВ до 4 баллов, образованию полигонального феррита и участков феррита с УВФ, а также появлению МАК-фазы в их структуре с объемной долей до 3,72 %.

При сварке на режиме *B* структура зоны соединения и участка крупного зерна существенно отличается от описанной выше: размер зерна соответствует 6 баллам, в структуре отсутствуют полигональный феррит и феррит с УВФ, а объемная доля МАК-фазы не превышает 2,55 %.

Характерная для режима *A* крупнозернистая структура шва, наличие в ЗТВ полигонального феррита и участков феррита с УВФ являются основными факторами, определяющими низкие показатели ударной вязкости  $KCV$ . Отрицательную роль может играть присутствующая в структуре МАК-фаза. Для определения степени ее влияния на показатели ударной вязкости соединений, полученных КССО, необходимо проведение дополнительных исследований.

Ударные испытания исследуемых соединений показали, что предпочтительным является структурное состояние, формирующееся при сварке на режиме *B* с низким энерговыделением. В этом случае гарантируются высокие и стабильные свойства сварных соединений труб из низколегированных сталей класса прочности X70.

**Выводы**

1. Исследовано влияние энергозатрат при сварке низколегированных сталей 10Г2ФБ контактной стыковой сваркой оплавлением. Установлено, что получение качественных соединений, отвечающих требованиям стандартов, возможно при уменьшении энергозатрат в 3...4 раза по сравнению с принятыми технологиями. При этом механические свойства ( $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ ,  $\delta$ ,  $\alpha$ ) отличаются незначительно, а ударная вязкость  $KCV$  существенно зависит от принятых при сварке термических циклов.

2. При сварке на режимах, обеспечивающих нагрев, близкий к максимальному, который можно получить при непрерывном оплавлении, наблюдается значительное снижение ударной вязкости в зоне соединения и примыкающих к ней участках. Основной причиной снижения  $KCV$  следует считать формирование крупнозернистой структуры (размер зерна 4 балла), присутствие полигонального феррита, феррита с УВФ, и возможно, МАК-фазы. Развитие на участке крупного зерна упрочнения металла также способствует снижению пластичности соединения.

3. Уменьшение энергозатрат (расходуемой энергии) в 4 раза, сопровождаемое ускорением оплавления, позволило восстановить показатели  $KCV$  до уровня основного металла. Улучшение пластических свойств следует связывать прежде всего с измельчением структуры металла (размер зерна 6 баллов), отсутствием полигонального феррита и феррита с УВФ. При этом наблюдается также уменьшение объемной доли МАК-фазы на 1,17 %.

4. При КССО сталей класса прочности Х70 для получения высоких показателей ударной вязкости  $KCV$  следует применять режимы сварки, отличающиеся меньшим энергозатратом при повышенной концентрации нагрева в узком прилегающем слое. Эта рекомендация не всегда выполняется, поскольку связана с повышением установленной мощности источников энергообеспечения.

В таких случаях после сварки следует применять термическую обработку — нормализацию.

1. Мазур И. И., Серафин О. М., Карпенко М. П. Электроконтактная сварка трубопроводов: пути совершенствования // Стр-во трубопроводов. — 1988. — № 4. — С. 8–11.
2. API Standard 1104. Welding of pipelines and related facilities. — Publ. Sept. 1999.
3. СП 105-34-96. Свод Правил сооружения магистральных газопроводов. — Введ. 11.09.96.
4. Кучук-Яценко С. И., Лебедев В. К. Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1976. — 213 с.
5. Кучук-Яценко С. И., Жемчужников Г. В., Казымов Б. И. Влияние дефектов контактной стыковой сварки на прочность соединений при низких температурах // Автомат. сварка. — 1980. — № 12. — С. 1–3.
6. Атлас «Металлография железа» / Под ред. Ф. Н. Тавадзе. — М.: Металлургия, 1972. — Т.2. — 478 с.
7. Новая методика определения размеров ультрадисперсных неметаллических включений в металле сварных швов низколегированных сталей / Г. М. Григоренко, В. Ф. Грабин, В. В. Головкин и др. // Автомат. сварка. — 2003. — № 4. — С. 28–30.
8. Guidelines for the classification of ferritic steel weld metal microstructural constituents using the light microscope // Welding in the World. — 1986. — 24, № 7/8. — P. 144–148.
9. Гривняк И. Свариваемость современных высокопрочных сталей // Сб. тр. междунар. конф. «Сварка и родственные технологии — в XXI век» (Киев, нояб. 1998 г.). — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1998. — С. 41–55.
10. Статическая прочность и механика разрушения стали / Под ред. В. Даля, В. Антона. — М.: Металлургия, 1986. — 565 с.
11. Взаимосвязь микроструктуры с ударной вязкостью швов на трубной низколегированной стали / Д. П. Новикова, Ю. Л. Богачек, С. Л. Мандельберг и др. // Автомат. сварка. — 1973. — № 8. — С. 6–9.
12. Влияние никеля на структуру и механические свойства шва, выполненного электродами с основным покрытием / И. К. Походня, В. Д. Макаренко, А. О. Корсун, С. С. Миличенко // Там же. — 1986. — № 2. — С. 1–5.
13. Морфологические особенности микроструктуры металла швов низколегированных сталей с ультранизким содержанием углерода / В. Ф. Грабин, В. Ф. Головкин, В. А. Костин, И. И. Алексеенко // Там же. — 2004. — № 7. — С. 17–22.
14. Гривняк И., Мацуда Ф. Металлографические исследования мартенситно-аустенитной составляющей (МАС) в ЗТВ высокопрочных низколегированных сталей // Там же. — 1994. — № 3. — С. 22–30.

The effect of energy input in flash butt welding of 10G2FB steel pipes on ductile properties of welded joints was investigated. It is shown that impact toughness of metal of the welded joints is determined by its structural state and grain size. It is recommended to reduce energy consumption during the welding process to achieve consistently high ductile properties of the welded joints, as this provides formation of fine-grained two-phase structure in the weld metal, consisting of the MAC-phase in the ferritic matrix.

Поступила в редакцию 17.11.2006



## ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6

Академик НАН Украины Л. М. ЛОБАНОВ, Н. А. ПАЩИН, канд. техн. наук,  
В. П. ЛОГИНОВ, В. Н. СМИЛЕНКО, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние электродинамической обработки (ЭДО) на напряженно-деформированное состояние плоских образцов из сплава АМг6 при различных схемах предварительного нагружения. На основе неразрушающего ультразвукового метода разработана методика и проведены измерения остаточных напряжений в стыковых сварных соединениях. Установлено, что ЭДО позволяет снизить остаточные напряжения в сварных соединениях сплава АМг6 на 50...65 %.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, сварное соединение, остаточные напряжения, электродинамическая обработка, импульс тока, алюминиевые сплавы, предварительное нагружение, пластические деформации

Прогресс в развитии современной техники обусловлен применением сварных конструкций с высокими заданными технологическими и эксплуатационными характеристиками. Использование для сварных соединений таких традиционных способов обработки, как прокатка роликами, проковка, термическая обработка и др., не всегда способствует повышению ресурса работы конструкций в тяжелых условиях эксплуатации. В связи с этим в настоящее время особую актуальность приобрела проблема внешних энергетических воздействий на механические свойства металлов и сплавов, а также их сварных соединений. Экспериментальные исследования электрических токов большой плотности, высокоэнергетических полей, токов плазмы, ионной имплантации, лазерного излучения, а также их комбинированного воздействия на конструкционные материалы заложили основу для создания нового класса высокопроизводительных технологических процессов обработки сварных соединений.

В последние десятилетия XX в. значительно возросло количество работ, связанных с исследованием различных вариантов электромеханического эффекта (изменение свойств под действием электрических полей и токов) для полупроводниковых, диэлектрических материалов и в первую очередь для металлов и сплавов, применяемых в машиностроении.

Установлено, что воздействие импульсов тока на металлы и сплавы приводит к повышению их статической и усталостной прочности, а также к релаксации напряженно-деформированного состояния [1].

Одним из новых способов воздействия током на металлы и сплавы является электродинамическая обработка (ЭДО). Она основана на инициировании в материале электродинамических сил, возникающих при переходных процессах и сопровождающих прохождение в материале токового разряда [2]. При суммировании электродинамических сил со статическим нагружением в материале обрабатываемой конструкции могут возникать структурные изменения, положительно влияющие на ее ресурс. При этом воздействие импульсов тока на металл, который подвергается растяжению в упругой и пластической областях нагружения [3, 4], приводит к изменению его напряженного состояния.

Одной же из причин снижения работоспособности сварных конструкций являются остаточные сварочные напряжения (далее ОН), негативно влияющие на прочностные характеристики и вызывающие остаточное формоизменение изделий. Поскольку в шве и околошовной зоне (ОШЗ) имеют место напряжения растяжения, близкие к пределу текучести материала, ЭДО сварных соединений может инициировать процессы, снижающие общий уровень ОН сварных соединений. При этом, если для титановых сплавов [3] и теплоустойчивых сталей [4] проводили исследования механизма изменения напряженного состояния предварительно нагруженных образцов сварных соединений под воздействием импульсов тока, то для алюминиевых сплавов такие данные отсутствуют.

Целью настоящей работы является исследование влияния ЭДО на снижение напряженно-деформированного состояния сварных соединений алюминиевого сплава АМг6. Для предварительной оценки влияния ЭДО на ОН в указанном материале обработку проводили в условиях растяжения плоских образцов лопаточного типа. Для инициирования одиночных импульсов тока в ме-

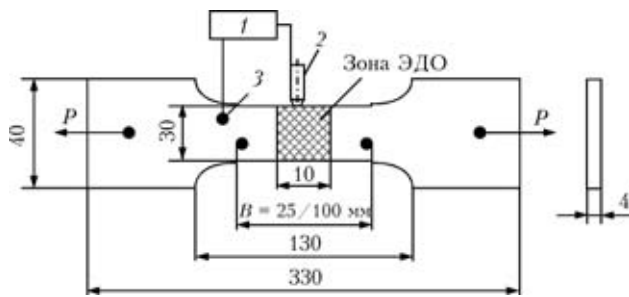


Рис. 1. Схема ЭДО образцов основного металла и сварного соединения сплава АМг6 для испытаний на одноосное растяжение: 1 — установка для ЭДО; 2 — электрод; 3 — крепление обратного провода;  $P$  — растягивающее усилие

талле использовали лабораторную установку, созданную на базе конденсаторной машины [4]. Разряд батареи конденсаторов передавали на образец посредством контакта медного электрода с поверхностью металла в зоне ЭДО. Схема ЭДО образца при одноосном растяжении представлена на рис. 1. Образцы основного металла вырезали вдоль проката из листовых заготовок ненагартованного алюминиевого сплава АМг6 толщиной 4 мм. На начальном этапе экспериментов ЭДО выполняли на образцах основного металла, предварительно нагруженного продольным одноосным растяжением в упругой, упругопластической и пластической областях деформирования. Проводили ЭДО также образцов сварных стыковых соединений из сплава АМг6 толщиной 4 мм (рис. 1), которые вырезали поперек шва из пластин размером  $500 \times 500 \times 4$  мм. Соединения были выполнены встык однопроходной автоматической сваркой неплавящимся электродом в аргоне на установке АС-ТВ-2М на следующем режиме: ток сварки 220 А; напряжение на дуге 18 В; скорость сварки 14 м/ч; присадочная проволока марки СвАМг6 диаметром 2,0 мм. Указанный режим обеспечивал гарантированный провар и удовлетворительное формирование соединения.

ЭДО образцов сварных соединений проводили вдоль ОШЗ, выбор которой в качестве зоны обработки продиктован наличием в ней продольных пластических деформаций сжатия  $\epsilon_{пл}$ . Суммирование значений  $\epsilon_{пл}$  со значениями пластических деформаций, инициируемых импульсами тока, вызывает в сплаве АМг6 релаксационные процессы, следствием которых может являться снижение уровня ОН.

Испытания образцов из сплава АМг6 выполняли на разрывной машине ЦДМ-10 с максимальным усилием растяжения 10 т при скорости деформирования 6 мм/мин. В течение всего цикла нагружения образцов проводили запись изменения растягивающего усилия до достижения указанным материалом требуемого напряженного состояния.

Задачей настоящих экспериментов являлось изучение пиков электродинамического эффекта,

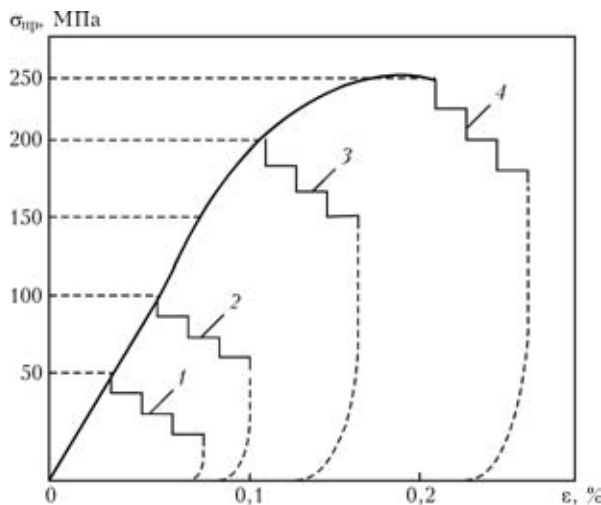


Рис. 2. Изменение упругого растяжения (1, 2) и растяжения в упругопластической области (3, 4) образцов сплава АМг6 при ЭДО:  $\sigma_{пр}$  — предварительное напряжение;  $\epsilon$  — относительная деформация

которые появляются при резком снижении сопротивления сплава АМг6 деформированию под действием разряда тока. Эффект проявлялся в виде характерного уменьшения деформирующего усилия на диаграммах растяжения (рис. 2).

Образец, закрепленный в захватах испытательной машины, растягивали до заданного значения и производили разряд с фиксацией падения деформирующего усилия с помощью самописца (входит в состав машины ЦДМ-10) и механического деформометра (на базе измерения  $B = 25$  и 100 мм). Исследовали три схемы нагружения образцов:

первая — растяжение выполняли дискретно с остановкой для ЭДО одиночными импульсами тока и фиксацией падения деформирующего усилия;

вторая — аналогично первой схеме, но с компенсацией падения деформирующего усилия со скоростью растяжения  $v = 6$  мм/мин;

третья — при непрерывном нагружении обрабатывали материал разрядами тока в процессе возрастания растягивающего усилия до разрушения образца.

Первая схема нагружения образцов отображала механизм напряженного состояния сварных стыковых соединений при ЭДО. При этом упругие растягивающие напряжения ОШЗ моделировали одноосным растяжением образца.

При исследовании характера изменения деформирующего усилия в широком диапазоне предварительного нагружения особое внимание уделяли изучению электродинамического эффекта при предварительных напряжениях, близких по значению к ОН в сварных соединениях сплава АМг6. ЭДО выполняли на следующем режиме: ток на электроде  $I_3 = 3500$  А; напряжение на электроде  $U_3 = 450$  В; продолжительность воздействия импульса тока  $\tau_{имп} = 0,5$  мкс; емкость батареи конденсаторов





$C_{кон} = 1400...2800$  мкФ. Значения предварительного нагружения  $\sigma_{пр}$  образцов основного металла и сварных соединений сплава АМгб, а также параметры, характеризующие его изменения в результате ЭДО, представлены в табл. 1.

На основании данных табл. 1 можно заключить, что ЭДО сплава АМгб по первой схеме обработки (серия № 1–3) вызывает в материале дискретное падение деформирующего усилия в исследуемом диапазоне нагружения. В отличие от выводов работ [3, 5], где говорится, что импульсы тока не оказывают влияния на падение усилия растяжения в упругой области нагружения материалов, на образцах серий № 1 и 2, подвергнутых растяжению в диапазоне нагрузок ниже предела пропорциональности, которые в сплаве АМгб составляют 130 МПа, наблюдали дискретное снижение усилия нагружения (15...30 % первоначального). При этом максимальные значения суммарного относительного падения растягивающих напряжений после цикла ЭДО  $\Sigma\Delta\sigma_{\%}$  (до 30 %) фиксировали при  $\sigma_{пр} = 116,7$  МПа (табл. 1, серия образцов № 2), что близко к реальным значениям

продольных растягивающих напряжений  $\sigma_x$  в сварных соединениях сплава АМгб.

При нагружении образцов серии № 4 выше условного предела текучести (образцы серии № 3) падение деформирующего усилия не превышало 15 %. Причем, чем ближе значения  $\sigma_{пр}$  и предела текучести, тем ниже значения  $\Sigma\Delta\sigma_{\%}$ , определяющие эффективность обработки.

Для каждой серии импульсов анализировали текущее относительное падение растягивающих напряжений после каждого разряда  $\Delta\sigma_{\%}$  (табл. 1), которое отражает текущее изменение единичного скачка деформирующего усилия при ЭДО в образцах при каждой серии испытаний. Отмечено, что при обработке образцов по первой схеме максимальное падение усилий растяжения в цикле обработки (50 % общего значения  $\Sigma\Delta\sigma_{\%}$ ) наблюдается во время первого разряда тока в серии импульсов. При последующих воздействиях тока эффективность этого процесса снижается, что объясняется «истощением» дислокационной структуры материала при нагружении его кристаллической решетки [1].

**Таблица 1.** Изменение деформирующего усилия образцов основного металла и сварных соединений сплава АМгб при ЭДО в условиях предварительного растяжения

№ серии образцов	<i>n</i>	$\sigma_{пр}$ , МПа	$\sigma_n$ , МПа	$\Delta\sigma_n$ , МПа	$\Delta\sigma_{\%}$ , %	$\Sigma\Delta\sigma_{\%}$ , %	$C_{кон}$ , мкФ
<i>Основной металл</i>							
1	—	52,9	—	—	—	~21	1400
	1		45,8	7,10	13,50		
	2		43,3	2,50	4,70		
	3		41,7	1,60	3,00		
2	—	116,7	—	—	—	~30	1400
	1		104,1	12,60	11,00		
	2		99,1	5,00	4,30		
	3		92,5	6,60	5,70		
	4		86,6	5,90	5,00		
3	—	258,0	—	—	—	~14	1400
	1		229	29,0	11,20		
	2		224	5,00	2,00		
	3		222	2,00	0,80		
4	—	52,9	—	—	—	~32	2800
	1		40,40	12,50	23,6		
	2		36,25	4,15	7,90		
5	—	116,7	—	—	—	~50	2800
	1		88,34	20,36	24,30		
	2		77,50	10,84	9,30		
	3		70,00	7,50	6,43		
	4		62,90	7,10	6,10		
	5	59,50	3,40	3,00			



№ серии образцов	<i>n</i>	$\sigma_{пр}$ , МПа	$\sigma_n$ , МПа	$\Delta\sigma_n$ , МПа	$\Delta\sigma_{\%}$ , %	$\Sigma\Delta\sigma_{\%}$ , %	$C_{кон}$ , мкФ
<i>Сварное соединение</i>							
6	—	100,0	—	—	—	~57	2800
	1		70,00	30,0	30,00		
	2		56,67	13,33	13,33		
	3		50,00	6,67	6,67		
	4		45,40	4,60	4,60		
	5		43,50	1,90	1,90		
7	—	80,5	—	—	—	2800	
	1	80,5	58,20	22,30	27,70		~28
	—	80,5	—	—	—		~17
	1	80,5	66,60	13,90	17,30		
	—	80,5	—	—	—		~14
	1	80,5	69,30	11,20	13,90		
	—	161,0	—	—	—		~22
	1	161,0	125,0	36,00	22,36		
	—	161,0	—	—	—		~17
	1	161,0	133,0	28,00	17,39		
	—	161,0	—	—	—		~19
	1	161,0	130,0	31,00	19,25		
	—	161,0	—	—	—		~19
	1	161,0	130,0	31,00	19,25		
	—	247,0	—	—	—		~21
	1	247,0	194,0	53,00	21,45		
	—	247,0	—	—	—		~19
	1	247,0	200,0	47,00	19,20		
	—	247,0	—	—	—		~17
	1	247,0	205,0	42,00	17,00		
	—	288,6	—	—	—		~17
	1	288,6	238,65	49,95	17,30		
	—	288,6	—	—	—		~16
	1	288,6	241,42	47,18	16,34		
—	288,6	—	—	—	~13		
1	288,6	249,75	38,85	13,46			
—	330,0 (перед разрушением)	—	—	—	~16		
1	330,0 (перед разрушением)	277,50	52,50	15,90			
—	291,0	—	—	—			

Проведены также исследования влияния повышения интенсивности ЭДО путем увеличения емкости батареи конденсаторов  $C_{кон}$  до 2800 мкФ (табл. 1, образцы серий № 4 и 5). Из данных таблицы видно, что с увеличением  $C_{кон}$  как при малых значениях  $\sigma_{пр}$  (образцы серии № 4), так и при близких к сварочным, значения  $\Sigma\Delta\sigma_{\%}$  возросли в 1,5...1,7 раза. Результаты исследования особенностей ЭДО сварного соединения пред-

ставлены в образцах серии № 6–8 (табл. 1). Значение  $\sigma_{пр}$  в образцах серии № 6 (как и в сериях № 2 и 5) выбирали близким к остаточным сварочным напряжениям в сплаве АМгб — 100 МПа. Установлено, что, как и в предыдущих сериях испытаний, при первом воздействии тока на материал  $\sigma_{пр}$  уменьшается до 50 %.

На образцах из сплава АМгб с помощью механического деформометра исследовали особен-



№ серии образцов	<i>n</i>	$\sigma_{пр}$ , МПа	$\sigma_n$ , МПа	$\Delta\sigma_n$ , МПа	$\Delta\sigma_{\%}$ , %	$\Sigma\Delta\sigma_{\%}$ , %	$S_{кон}$ , мкФ
<i>Сварное соединение</i>							
8	—	110,0	—	—	—	—	2800
	1		72,00	38,00	34,54	~35	
	—	138,7	—	—	—	—	
	1		80,47	58,23	41,98	~42	
	—	163,7	—	—	—	—	
	—		80,47	83,23	50,84	~51	
	—	0	—	—	—	—	
	—	47,0	—	—	—	—	
	1		47,00	0	0	0	
	—	83,25	—	—	—	—	
	1		83,25	0	0	0	
	—	133,20	—	—	—	—	
	1		133,20	0	0	0	
	—	138,75	—	—	—	—	
	1		138,75	0	0	0	
	—	194,25	—	—	—	—	
	1		97,10	97,15	50,01	~50	
	—	0	—	—	—	—	
	—	61,00	—	—	—	—	
	1		61,00	0	0	0	
	—	111,0	—	—	—	—	
	1		111,0	0	0	0	
	—	174,8	—	—	—	—	
	1		174,8	0	0	0	
—	202,5	—	—	—	0		
—		127,65	74,85	36,96	—		
—	219,22	—	—	—	~37		
1		122,26	96,96	44,22			
—	241,42	—	—	—	44		
1		149,85	91,57	37,92	—		
—	0	—	—	—	~38		
		290 (разрушение)					

Примечание.  $\sigma_{пр}$  — текущее растягивающее напряжение после разряда;  $\Delta\sigma_n = \sigma_n - \sigma_{n+1}$  — текущее падение растягивающих напряжений после каждого разряда; тире — отсутствие импульсов тока.

ности развития пластического течения материала под воздействием серий импульсов тока. На основании полученных данных можно заключить, что значения предварительного нагружения образцов сварного соединений (серия № 6) сопоставимы со значениями нагружений, принятыми для основного металла (образцы серий № 5). Если сравнить значения  $\Delta\sigma_{\%}$  у образцов серии № 5 и 6 серий, то у сварных соединений более ярко выражены деформационные процессы, которые оп-

ределяются падением предварительного усилия растяжения за время воздействия первых двух импульсов тока. При сопоставлении значений  $\Sigma\Delta\sigma_{\%}$  в основном металле и сварном соединении видно, что у последнего значения указанного параметра больше на 10 %, что можно объяснить более высокой пластичностью металла ОШЗ. Это доказывает, что ЭДО сварных соединений сплава АМг6 более эффективна по сравнению с основным металлом.



На образцах основного металла с помощью механического деформометра определяли особенности развития пластической деформации непосредственно в зоне обработки, т. е. на участке контакта электрода (см. рис. 1) с поверхностью металла. Предварительно в материале рабочей части образца была создана пластическая деформация сжатия, которая составляла около 0,1 %, после чего образцы подвергали растяжению до  $\sigma_{пр} = 110$  МПа. Данная силовая схема создает в материале напряженно-деформированное состояние, подобное наблюдаемому в ОШЗ сварных соединений сплава АМгб [5]. Нагруженные образцы подвергали ЭДО по режиму, указанному в табл. 1, при емкости батареи  $C_{кон} = 1400$  мкФ. После ЭДО с помощью механического деформометра ( $B = 25$  мм) определяли дискретное падение усилия нагружения  $\sigma_{пр}$  и соответственно снижение значений относительной деформации  $\epsilon$ , имеющее место после воздействия разряда тока. Расположение контактных баз прибора на поверхности образца показано на рис. 1. На рис. 3 представлены диаграммы зависимости

$\sigma_{пр} = f(n)$  и  $\epsilon = f(n)$  (здесь  $n$  — количество разрядов тока в цикле ЭДО). Из рисунка видно, что уже после первого ( $n = 1$ ) импульса тока металл при растяжении ниже предела упругости  $\sigma_{уп}$  теряет свои упругие свойства, а при дальнейшей обработке ( $n > 2$ ) находится в упругопластическом состоянии. После завершения цикла ЭДО и снятия нагрузки в металле образуется остаточная пластическая деформация растяжения  $\epsilon = 0,1$  %.

При сопоставлении рис. 3, а и б можно заключить, что предварительное пластическое деформирование сплава АМгб в сочетании с последующим упругим нагружением и ЭДО могут формировать в этом материале поля упругопластических деформаций. В то же время напряженно-деформированное состояние ОШЗ сварных соединений сплава АМгб характеризуется наличием пластических деформаций сжатия в сочетании с упругими растягивающими напряжениями. Таким образом, результаты испытаний, представленные на рис. 3, с достаточной степенью достоверности моделируют релаксационные процессы, происходящие в «активной» зоне соединения при его обработке импульсами тока. Формирование в процессе ЭДО полей пластических деформаций растяжения, «обратных» сварочным, может положительно повлиять на снижение общего уровня напряженного состояния сварных соединений.

Проведены измерения снижения эффективности электродинамического воздействия на материал при удалении от зоны обработки. С этой целью выполнены измерения дискретного падения значения  $\sigma_{пр}$  с помощью деформометра с переменной базой измерения —  $B = 25$  и 100 мм.

Текущие изменения значений относительных деформаций  $\epsilon$  при ЭДО исследовали исходя из предположения: если ЭДО носит локальный характер, то при каждом токовом разряде дискретному падению растягивающего усилия  $\Delta\sigma_{пр}$  будут соответствовать различные значения  $\epsilon$  ( $B = 25$  и 100 мм).

ЭДО образцов проводили на указанном в табл. 1 режиме при  $C_{кон} = 2800$  мкФ. При этом образец подвергали предварительному растяжению до 180 МПа, что соответствует упругопластической области деформирования сплава АМгб. Результаты исследований представлены в табл. 2. Из данных таблицы видно, что убывание значений  $\epsilon$  при ЭДО носит затухающий характер, что согласуется с данными табл. 1 о дискретном падении значений  $\sigma_{пр}$ . При этом электродинамическое воздействие локализовано в зоне ЭДО (см. рис. 1), поверхность которой подвергали обработке. Так, материал образца в зоне базы измерения  $B = 25$  мм после первого импульса тока находился в состоянии развитого пластического течения, а в зоне базы измерения  $B = 100$  мм испытывал дефор-

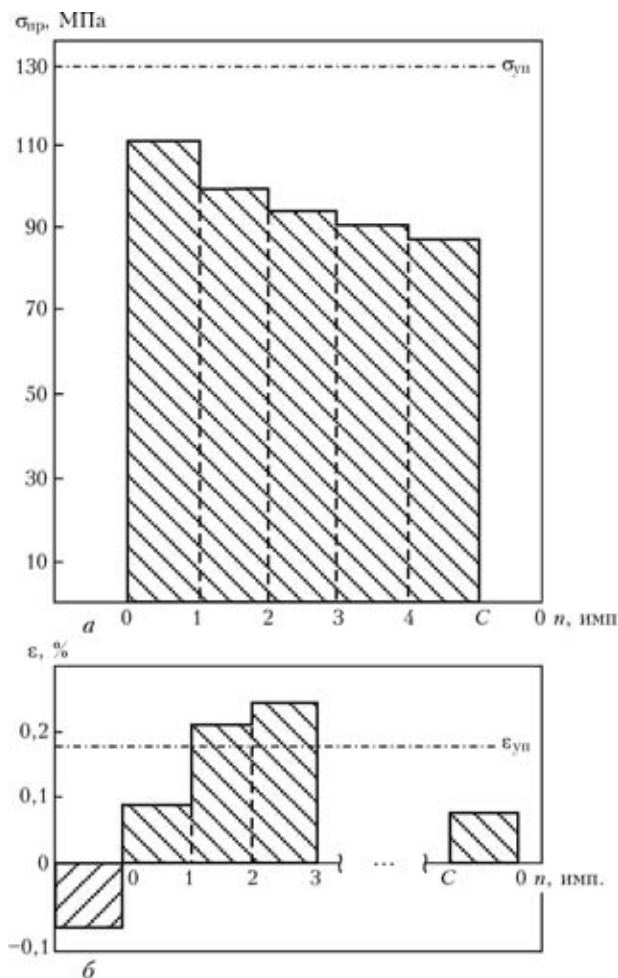


Рис. 3. Падение предварительного деформирующего усилия  $\sigma_{пр}$  (а) и изменение относительной деформации  $\epsilon$  (б) на образцах из сплава АМгб при ЭДО; С — сброс нагрузки после цикла ЭДО;  $\sigma_{уп}$  — предел упругости;  $\epsilon_{уп}$  — упругая деформация сплава АМгб; ... — данные отсутствуют





**Т а б л и ц а 2. Относительные деформации растяжения  $\varepsilon$  образцов сплава АМг6 при ЭДО при  $\sigma_{пр} = 180$  МПа**

n	$\Delta\sigma_{пр}$ , МПа	$\varepsilon$ , %	
		B = 25 мм	B = 100 мм
—	—	0,26	0,27
1	50	0,51	0,16
2	22	0,29	0,07
3	11	0,12	0,05
4	13	0,07	0,06
5	8	—	0,01

мации, незначительно превышающие предел упругости сплава АМг6. При последующих импульсах тока изменение значений  $\varepsilon$  носит затухающий характер, а разность показаний деформометра при B = 25 и 100 мм свидетельствует о снижении влияния электродинамического эффекта на свойства материала при удалении от зоны ЭДО.

Для изучения особенностей механизма ЭДО проводили обработку материала при нагружении по второй схеме. Для этого использовали образцы стыкового сварного соединения из сплава АМг6 (см. рис. 1). После предварительного упругого растяжения металла в упругопластической области растяжения и воздействия импульсами тока компенсировали падение усилия растяжения, используя при этом подтяжку подвижного захвата разрывной машины до уровня  $\sigma_{пр}$ . Характер изменения растягивающего усилия  $\Delta\sigma_n$  под влиянием ЭДО сварного соединения из сплава АМг6 при компенсации его текущего падения  $\Delta\sigma_n$ , вызванного электродинамическим воздействием, представлен в табл. 1 (образец серии № 7). На основании данных этой таблицы оценивали изменение единичного скачка деформирующего усилия после восстановления первоначальной нагрузки  $\sigma_{пр}$  в различных диапазонах предварительного растяжения. Если допустить, что снижение единичного скачка значений  $\sigma_{пр}$  в предыдущих сериях связано в основном с условиями закрепления по первой схеме, т. е. отсутствием возможности реализации перемещений вдоль продольной оси образца, то компенсация падения  $\sigma_{пр}$  путем повторной подтяжки должна способствовать стабилизации  $\sigma_n$  после каждого последующего воздействия импульсами тока. В то же время, проанализировав данные (образец серии № 7, табл. 1), можно видеть, что значения  $\Delta\sigma_{\%}$  в каждом диапазоне растягивающих нагрузок отличаются друг от друга. Разность в значениях  $\Delta\sigma_{пр}$  при первом (n = 1) и последнем (n = 4) разрядах тока при  $\sigma_{пр} \cong \cong 161$  МПа, т. е. при нагрузках, близких по своим значениям к максимумам продольных остаточных сварочных напряжений для сплава АМг6, состав-

ляет 25 %. Таким образом, в алюминиевых сплавах ЭДО можно создавать зоны упругопластического деформирования материала, что позволит регулировать напряженное состояние элементов сварных конструкций, находящихся под воздействием эксплуатационных нагрузок. Производство металлических конструкций способом предварительного упругого растяжения в сочетании с ЭДО представляется эффективным для повышения точности их изготовления.

Для изучения влияния режима непрерывного нагружения материала на электродинамический эффект при обработке алюминиевого сплава АМг6 плоский образец основного металла толщиной 4 мм подвергали силовому воздействию по третьей схеме нагружения при скорости деформирования материала v = 6 мм/мин (рис. 4). На основе данных работы [3] можно заключить, что обработка материала образца импульсами тока при его непрерывном растяжении приводит к повышению значений падения деформирующего усилия по сравнению с образцами, подвергнутыми ЭДО в условиях дискретного нагружения по первой схеме.

Для исследования ЭДО в режиме нагружения по третьей схеме образцы подвергали непрерывному растяжению. На первом этапе нагружения  $\sigma_{пр} = 110, 139$  и 164 МПа на рабочей поверхности образца инициировали одиночный импульс тока на описанном выше режиме ( $C_{кон} = 2800$  мкФ), при этом выполнялась запись скачка деформирующего усилия (рис. 4, а). После завершения серии импульсов тока производили полную разгрузку образца. При повторном нагружении (второй этап) (рис. 4, б) образец подвергали растяжению до 200 МПа, проводя ЭДО одиночными импульсами тока до достижения  $\sigma_{пр} = 85, 130$  и 200 МПа. Затем на третьем этапе нагружения (рис. 4, в) выполняли ЭДО до достижения  $\sigma_{пр} = 61, 111, 175, 202, 220$  и 242 МПа со сбросом до нуля и последующим растяжением образца до разрушения, наступившего при  $\sigma_{пр} = 290$  МПа. Значения падения деформирующего усилия в результате ЭДО при непрерывном растяжении образцов представлены в табл. 1 (образцы серии № 8).

Проанализировав данные табл. 1, можно видеть существенные отличия в характере дискретного падения усилия деформирования сплава АМг6 при третьей схеме нагружения.

Так, сравнив значения  $\Delta\sigma_{\%}$  после воздействия первого импульса в образцах серии № 5 ( $\sigma_{пр} = 116,7$  МПа), полученного без компенсации растяжения, где  $\Delta\sigma_{\%} = 24,30$  %, с образцами серии № 8 ( $\sigma_{пр} = 110$  МПа), где  $\Delta\sigma_{\%} = 34,54$  %, можно видеть повышение эффективности единичного воздействия тока импульсов при непрерывном растяжении образца. При увеличении нагрузки до

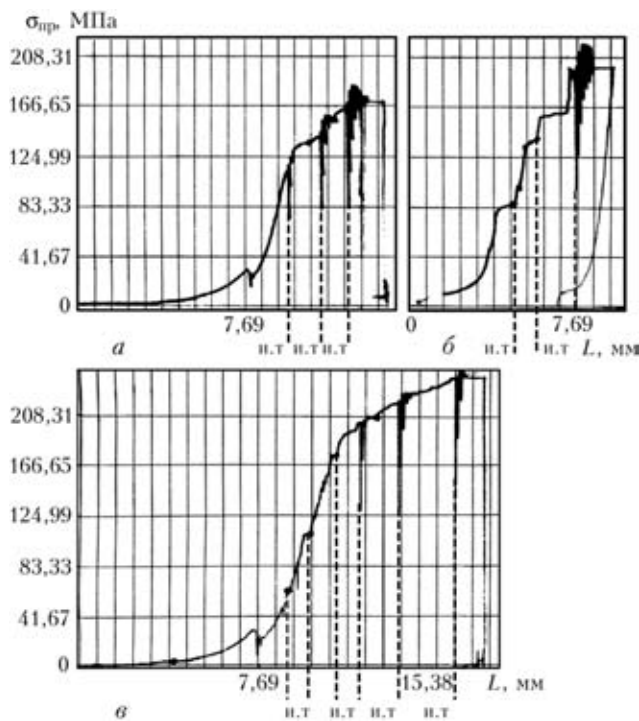


Рис. 4. Кривые релаксации деформирующего усилия  $\sigma_{пр}$  на образце из сплава АМг6 при третьей схеме нагружения: а — первый этап нагружения; б — второй; в — третий; и.т — импульс тока; L — расстояние между захватами разрывной машины

163,7 МПа наблюдали дальнейший рост значений деформирующего скачка до  $\Delta\sigma_{\%} = 50,84\%$ . При сопоставлении этих данных с полученными для образцов серии № 7 для первого токового воздействия при  $\sigma_{пр} = 161$  МПа, можно видеть, что в них более низкие значения  $\Delta\sigma_{\%}$  — 22,36%. Это можно объяснить тем [1], что при непрерывном деформировании поликристаллических структур в условиях токового воздействия образуются большое количество незавершенных сдвигов дислокаций вдоль полос скольжения (по сравнению с дискретным растяжением), подверженных влиянию импульсов тока.

При непрерывном нагружении образцов серии № 8 изучено влияние ЭДО на особенности падения деформирующего усилия после восстановления  $\sigma_{пр}$ . Следует отметить, что при достижении  $\sigma_{пр} = 163,7$  МПа и сбросе нагрузки до нуля и последующем растяжении образца скачок деформирующего усилия зафиксирован только после превышения первоначальной нагрузки (163,7 МПа) и достижения  $\sigma_{пр} = 194,25$  МПа. При последующем нагружении и уменьшении значений  $\sigma_{пр}$  до нуля наличие дискретного падения деформирующего усилия зафиксировано только при  $\sigma_{пр} \geq 202,5$  МПа.

Отсутствие скачка после повторного нагружения может быть объяснено по аналогии с явлениями, наблюдаемыми при исследовании процесса электроимпульсной обработки титановых спла-

вов [3]. В результате воздействия токового разряда на деформируемый образец происходит перестройка структуры материала, а именно, смещение части дислокаций в новое положение с большим уровнем энергии закрепления дислокаций на стопорах. Чем выше энергия отрыва со стопора (энергия активации) дислокаций, тем больше внешнее растягивающее напряжение, при котором произойдет отрыв дислокаций от стопоров. Таким образом, согласно [3] энергия активации определяется суммированием постоянной составляющей энергии импульса тока и переменной, связанной с непрерывно возрастающей деформацией образца. При повторном нагружении до получения значения  $\sigma_{пр}$ , меньше первоначального, энергия активации не позволяет инициировать отрыв дислокаций от стопоров, что исключает реализацию скачка деформирующего усилия.

Для изучения на натуральных образцах изменения остаточного напряженного состояния сварных соединений элементов тонкостенных конструкций в результате электродинамического воздействия изготовили плоские образцы из алюминиевого сплава АМг6 размером 450×400×4 и 500×500×3 мм. Пластины сваривали вдоль продольной оси симметрии по описанным выше технологии и режиме. Остаточные напряжения определяли неразрушающим ультразвуковым (УЗ) методом, который основан на зависимости скорости распространения ультразвуковых волн от напряжений в металле [6]. Этот метод позволяет оценивать одно- и двухосное напряженное состояние без нарушения целостности исследуемого объекта.

Особенностью УЗ метода является возможность определения ОН в натуральных конструкциях в ненагруженном и нагруженном состояниях. В настоящих исследованиях нагружением являлось воздействие на металл электродинамическими силами, инициируемыми одиночными импульсами тока.

УЗ метод позволил провести многократные измерения текущих значений ОН после каждого воздействия импульса тока в цикле ЭДО. С помощью указанного метода оценивали эффективность воздействия тока на материал образца путем снижения уровня ОН в зависимости от количества импульсов тока.

Измерения значений ОН проводили в центральном поперечном сечении пластины. Определяли продольную  $\sigma_x$  и поперечную  $\sigma_y$  компоненты плоского напряженного состояния материала образца до и после ЭДО. Обработку вдоль линии сплавления выполняли по всей длине шва. Образец стыкового соединения в процессе ЭДО находился в свободном состоянии без приложения к нему статических нагрузок, что позволило оценить влияние ЭДО на релаксацию сварочных напряжений.

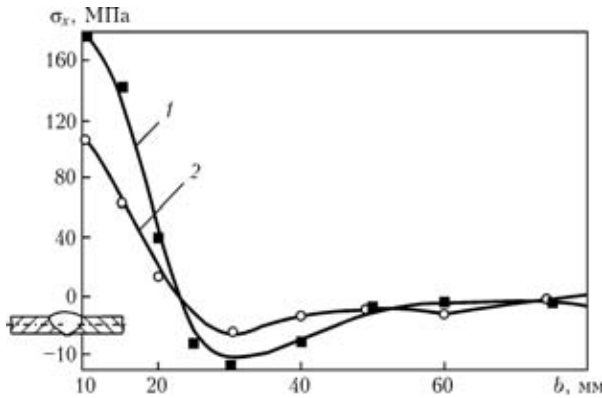


Рис. 5. Распределение продольных  $\sigma_x$  остаточных напряжений в образцах стыковых сварных соединениях сплава АМг6 без обработки (1) и после ЭДО (2);  $b$  — ширина шва

Распределение продольных остаточных напряжений после сварки в обработанных и необработанных образцах из сплава АМг6 представлено на рис. 5, из которого видно, что ЭДО сварного соединения способствует снижению продольных ОН  $\sigma_x$  на 45...50%. При этом после ЭДО имело место снижение поперечных ОН  $\sigma_y$  на 60...65% в ОШЗ.

The effect of electrodynamic treatment (EDT) on the stress-strain state of flat specimens of alloy AMg6 at different diagrams of preliminary loading was investigated. The measurement procedure based on the ultrasonic NDT method was developed, and residual stresses in butt welded joints were measured. As established, EDT allows residual stresses in the welded joints on alloy AMg6 to be decreased by 50...65%.

Таким образом, данные, приведенные в настоящей работе, свидетельствуют об эффективности применения ЭДО для регулирования напряженного состояния алюминиевых сплавов АМг6 и их сварных соединений.

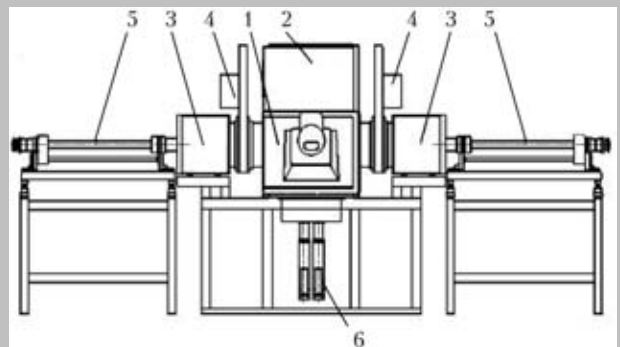
1. *Исследование влияния импульсной обработки на повышение ресурса металлических конструкций* / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов и др. // Автомат. сварка. — 2005. — № 11. — С. 28–32.
2. *Теория электрических аппаратов* / Г. Н. Александров, В. В. Борисов, В. Л. Иванов и др. — М.: Высш. шк., 1985. — 312 с.
3. *Акустическая эмиссия при электроимпульсной деформации титановых сплавов* / Н. А. Семашко, Р. Ф. Крупский, А. В. Купов и др. // Материаловедение. — 2004. — № 7 (Спецвыпуск). — С. 29–33.
4. *Влияние электродинамической обработки на напряженно-деформированное состояние теплоустойчивых сталей* / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. М. Скульский // Автомат. сварка. — 2006. — № 5. — С. 11–15.
5. *Регулирование термодинамических циклов при сварке листовых конструкций с применением теплопоглошителей* / Л. М. Лобанов, В. И. Павловский, В. П. Логинов и др. // Автомат. сварка. — 1990. — № 9. — С. 39–49.
6. *Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах* / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорт, О. Н. Гуца и др. — Киев: Наук. думка, 1974. — 108 с.

Поступила в редакцию 06.05.2006

## ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ УСТАНОВКА УЭ-207П

Промышленная установка УЭ-207П предназначена для нанесения всех вариантов защитных покрытий (жаро-, коррозионно- и эрозионностойких, термобарьерных, демпфирующих и др.) путем электронно-лучевого испарения и последующего осаждения паровой фазы на изделия заданной конфигурации, например, лопатки газотурбинных двигателей, а также осаждения функционально-градиентных покрытий.

Установка УЭ-207П в зависимости от конкретных требований может быть укомплектована традиционными испарителями (водоохлаждаемыми тиглями с вертикальными штоками для перемещения испаряемых слитков) и/или многопозиционными испарителями карусельного типа для испарения композиционных слитков при осаждении градиентных покрытий. На рисунке показана блок-схема установки, состоящей из рабочей камеры 1, камеры пушек 2, загрузочных камер 3, вакуумных затворов 4, горизонтального вала и механизма его перемещения и вращения 5 и механизмов подачи испаряемых материалов (слитков) 6.



**Контакты:** Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11, отд. № 13.

Международный центр электронно-лучевых технологий.

Тел.: (38044) 287 60 41; тел./факс: (38044) 287 31 66.

E-mail: movchan@paton-icebt.kiev.ua; <http://www.paton-icebt.kiev.ua>



## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МЕТАЛЛЫ И ИХ СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ (Обзор)

**С. И. МОРАВЕЦКИЙ**, инж., **Н. А. ПАРШЕНКОВ**, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**В. А. СОКИРКО**, канд. техн. наук (НПК ООО «ДС», г. Николаев)

Обобщены опубликованные данные об основных особенностях и механизмах электромагнитного воздействия на структуру основного металла и сварных соединений.

*Ключевые слова:* металлические материалы, сварные соединения, обработка, электромагнитные воздействия, пластическая деформация, механические свойства, остаточные сварочные напряжения

При изготовлении ответственных сварных конструкций выдвигаются требования к повышению пластических свойств металла шва и зоны термического влияния, претерпевших термомеханический цикл сварки (ТДЦС), а также к снятию остаточных сварочных напряжений (ОСН). Сущность любого способа послесварочной обработки для удовлетворения этим требованиям сводится к способу передачи энергии в объем металла, ее виду и роли. Под влиянием послесварочной обработки происходит релаксация упругой энергии, накопленной во время ТДЦС, путем протекания пластической деформации на разных масштабных уровнях металла. Последняя, протекая на уровне макроскопического металлического тела, обуславливает возможность снижения ОСН I рода, а на уровнях зерен, субзерен и кристаллической решетки металла является одним из ключевых факторов, влияющих на остаточные механические свойства металла сварных соединений. В известных к настоящему времени способах обработки металла используются такие виды энергии, как тепловая, химическая и механическая (энергия взрыва).

В силу объективных и субъективных обстоятельств до настоящего времени остается практически неизученным влияние электромагнитных воздействий (ЭМВ) на физико-механические свойства металла сварного соединения и уровень ОСН. Между тем многочисленные работы в области технической физики показывают, что энергия электромагнитного происхождения может оказывать весьма существенное влияние на протекание пластической деформации, напряженное состояние металлического тела и заметно изменять его механические характеристики. В связи с этим проведенные впервые в середине XIX в. [1] исследования такого рода начиная с 1950–

1960-х гг. приобрели систематический характер. В настоящее время исследуется изменение свойств и механическое поведение большой номенклатуры металлических материалов и неметаллов как без нагрузки, так и под активным нагружением, процесс ползучести или релаксации напряжений под воздействием импульсных и постоянных электрических (ЭП) и магнитных (МП) полей, а также электрического тока (ЭТ) широкого диапазона значений в интервале температур от 4,2 до  $1 \cdot 10^3$  К. Параллельно с получением опытных данных разрабатываются теории механизмов влияния ЭМВ, накопленные в этой области знания получили отражение в монографиях и обзорах [1–6]. Результаты некоторых работ приобрели прикладное значение, благодаря им созданы различные промышленные способы обработки металла с использованием ЭМВ, нашедшие широкое практическое применение.

В настоящее время среди публикаций по указанной тематике довольно мало работ по исследованию влияния ЭМВ на металл сварного соединения. Известно, что во время ТДЦС в металле свариваемых деталей протекают процессы термомеханического возбуждения и сопутствующие, но некомпенсирующие их процессы релаксации. При этом происходят упругие, диффузионные и пластические деформации. Имеет место большая неравномерность пространственного распределения последних как в макро-, так и в микрообъемах металла, приводящая к появлению очагов разрушения. Соединение после сварки представляет собой неравновесную систему с высоким уровнем накопленной упругой энергии, до 98 % которой приходится на внутренние напряжения III рода.

Авторы не претендуют на полноту обзора и исчерпывающую глубину понимания физической сути ЭМВ. Тем не менее представляется необходимым составить общую характеристику ЭМВ как потенциального инструмента для оказания влияния на сварочные процессы и процессы, лежащие в основе различных послесварочных обработок, и возможного создания новых самостоятель-





ных и комбинированных способов обработки сварных соединений. Небезынтересны, вероятно, и сложившиеся к настоящему времени представления о механизмах указанного влияния. Практическая полезность такого обзора состоит не столько в анализе фундаментальных физических обобщений, сколько в освещении и осмыслении прикладного значения фактов, полученных исследователями в различных областях физики металлов и изложенных в литературных источниках. Далее кратко излагаются основные особенности влияния ЭМВ на механические свойства материалов и их поведение под нагрузкой исходя из известных результатов исследований.

**Влияние электромагнитных воздействий на механическое поведение и свойства материалов.** В качестве критериев для оценки уровня ЭМВ можно принять классификацию МП, представленную в работе [1], согласно которой МП по напряженности  $H$  делят на сверхслабые ( $1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^2$ ), слабые ( $1 \cdot 10^2 \dots 1 \cdot 10^5$ ), средние ( $1 \cdot 10^5 \dots 5 \cdot 10^6$ ), сильные ( $5 \cdot 10^6 \dots 80 \cdot 10^6$ ) и сверхсильные (более  $80 \cdot 10^6$  А/м). ЭТ можно оценивать в рамках той же классификации по напряженности создаваемого им МП, максимум которого в случае прямолинейного бесконечного проводника круглого сечения приходится на его поверхность и вычисляется просто.

В многочисленных работах В. И. Спицина, О. А. Троицкого, В. И. Сташенко и других исследователей импульсы ЭТ плотностью  $j \sim 1 \cdot 10^2 \dots 1 \cdot 10^3$  А/мм<sup>2</sup>, длительностью  $\tau \sim 1 \cdot 10^{-4}$  с приводили к многократному увеличению деформации, накопленной образцом из цинка с поперечным сечением приблизительно 1 мм<sup>2</sup> за время испытания в режиме ползучести при температуре 78 К. При воздействии импульсного МП ( $H \sim 1 \cdot 10^5$  А/м), а также переменного, постоянного и импульсного ЭТ при равной эффективной плотности  $10^2 \dots 10^3$  А/мм<sup>2</sup> происходит заметное (5...130 %) увеличение скорости деформации из образцов индия, свинца, олова и цинка, нагружаемых в режиме ползучести [7]. Под воздействием импульсов на диаграммах растяжения образцов наблюдаются синхронные сбросы растягивающего усилия [1, 2], что, по мнению исследователей [2], свидетельствует о разупрочнении металла в момент импульса.

С помощью сильных ЭМВ в некоторых случаях можно интенсивно пластически деформировать металлические образцы без приложения к ним механической нагрузки. Так, импульсами МП вызывали остаточную деформацию образцов из сплавов меди [1, 8] и алюминия [9], а импульсами ЭТ ( $500 \dots 7000$  А/мм<sup>2</sup>) существенно изменяли рельеф полированной поверхности фольг из меди за счет выхода на нее дислокаций и перегруппировки исходных неровностей [10].

Заметное влияние на механическое поведение материалов оказывают также слабые ЭМВ. При испытаниях таких металлов, как алюминий, кобальт, медь, железо, никель и титан, а также сплавов Д16, ХН77ТЮ, Х18Н10Т и других, на ползучесть при  $T = 20 \dots 1150$  °С отмечен многократный рост скорости ползучести при наложении ЭП (напряженность электрического поля  $E = 10$  В/мм), МП ( $H = 1,6 \dots 40$  кА/м) и протекании постоянного ЭТ ( $j = 0,15$  А/мм<sup>2</sup>). Степень проявления эффекта указанных воздействий была максимальной в первые несколько минут после их начала, с течением времени она уменьшалась, и приблизительно через 0,5 ч деформирования в условиях ЭМВ скорость ползучести снижалась примерно до своего исходного значения [11–14].

Экспозиция материалов (LiF, NaCl, кремния и алюминия) в слабом МП или во время протекания через проводящие твердые тела ЭТ ( $j < 0,3$  А/мм<sup>2</sup>) при некоторых условиях позволяет увеличить от нескольких десятков до нескольких сотен процентов пробег дислокаций за фиксированное время нагружения образцов [6, 15–17]. Эффект увеличения подвижности дислокаций наблюдается не только при совмещении ЭМВ с нагружением, но и после завершения пятичасовой экспозиции кремния в слабом МП он сохранялся практически неизменным первые 150 ч и уменьшился вдвое через 400 ч [16]. Постэффекты наблюдались также и при сильных ЭМВ [2].

Применение рентгеновских и электронных методов исследования позволяет выявить в микроструктуре материалов широкую гамму изменений, вызываемых ЭМВ [2]. Так, изучалось влияние обработки импульсами тока с чередующейся полярностью ( $j = 6,0 \dots 16,4$  А/мм<sup>2</sup>;  $\tau = 2,0 \dots 2,5$  с при паузе 4...10 с) образцов из высокопрочной стали АК-25, имитирующих соединения, полученные электронно-лучевой сваркой. Рентгеноструктурным анализом установлено снижение плотности дислокаций и напряжений II рода в металле образцов, полученных электронно-лучевой сваркой, после обработки [18]. При этом также наблюдались заметные изменения структурно зависимых магнитных характеристик материала. В целом изменения микроструктуры, вызываемые ЭМВ, весьма разнообразны, и их исследования могли бы стать предметом отдельной статьи. Для нас целесообразнее рассмотреть изменение структурно зависимых механических свойств материалов, подвергшихся ЭМВ.

Механические свойства оцениваются как после завершения ЭМВ (остаточные), так и во время ЭМВ. Во втором случае ЭМВ имеют место в течение всего времени испытания или на определенных его стадиях, например, по достижении заданного значения деформации или напряжения, на стадии неустановившейся ползучести и пр.



Электромагнитная обработка несколькими импульсами тока ( $\tau \sim 10^{-2} \dots 10^{-1}$  с,  $j \sim 10^2$  А/мм<sup>2</sup>), не исключая тепловое воздействие, обеспечивает высокие остаточные пластические свойства сплавов титана и алюминия [19, 20]. Авторы этих работ сообщают о повышении относительного остаточного удлинения на 30...60 %, ударной вязкости на 20...50 % и снижении предела текучести на 30...50 % по сравнению с исходным состоянием сплавов с заданным наклепом. При этом ударная вязкость и характеристики трещиностойкости сплавов алюминия на 10...15 % превышают уровень, который обеспечивается традиционным отпусканием этих сплавов в течение 1 ч, а временное сопротивление  $\sigma_b$  может как возрастать на 5...30 %, так и значительно снижаться.

ЭМВ оказывают влияние при циклическом нагружении материалов. Электромагнитной обработкой (в том числе постоянным ЭТ,  $j \sim 0,1$  А/мм<sup>2</sup>, совмещенным с усталостными испытаниями) в 2...3 раза увеличивали долговечность армко-железа, сталей и сплавов титана [21–23].

Изменение механических свойств материалов при совмещении ЭМВ с процессом испытаний весьма разнообразно, но не всегда благоприятно с точки зрения практических потребностей и зависит от многих факторов (природы и исходного состояния материала, вида и параметров электромагнитного воздействия, внешней среды, температуры, скорости деформации и др.). Оно исследовалось в основном для коррозионностойких сталей, сплавов титана, алюминия и меди [1], но есть также данные о высокочистом и техническом железе [11].

В работах М. Л. Бернштейна, В. Н. Пустовойта [4] и других авторов показана высокая эффективность совмещения операций термообработки и ЭМВ, которая выражается в появлении под влиянием слабых и сильных МП полезных для практики устойчивых изменений в структуре, фазовом составе и механических свойствах сталей различных классов.

Воздействие МП позволяет полностью реализовать механизмы упрочнения углеродистых и легированных конструкционных сталей при закалке на мартенсит. Так,  $\sigma_b$  сталей 45Х и 30ХГСА, закаленных с наложением МП ( $H \sim 10^6$  А/м), оказалось в 1,5 раза выше, чем после закалки без МП. Изучение характеристик изломов и диаграмм растяжения показало при закалке в МП наличие пластической деформации, предшествовавшей разрушению, и позволило определить условный предел текучести, что было бы невозможным при закалке без МП.

Наложение МП на процесс бейнитного превращения низколегированных сталей может приводить как к разупрочнению сталей (1...3 % для 30ХГСА и 45Х), так и к их упрочнению (3...8 %

для 65Г и 14Х2ГМР), но при этом во всех случаях имело место увеличение ударной вязкости  $KCU$  на 11...87 %. Наложение МП на перлитное превращение заэвтектоидных углеродистых сталей приводит к упрочнению с некоторым снижением пластичности и ударной вязкости. Доэвтектоидные стали, претерпевшие перлитное превращение в МП, существенно разупрочняются и имеют заметно увеличенное относительное остаточное удлинение при несколько меньшем относительном остаточном сужении по сравнению со сталями, прошедшими превращение без МП [4].

Воздействие постоянным МП ( $H = 66$  кА/м) во время отпуска стали 40Х при температуре 550 °С позволило избежать отпускного охрупчивания, вызванного диффузией серы и фосфора к границам зерен. В этом случае сталь после указанной обработки имела ударную вязкость в 3 раза выше, чем после отпуска без МП при равной твердости [24].

**Представления о механизмах электромагнитных воздействий.** Накоплен значительный массив экспериментальных данных, свидетельствующих о том, что с применением различного вида ЭМВ с легко измеряемыми или рассчитываемыми параметрами связаны то или иное изменение механических свойств материалов, которые также несложно определить. Однако промежуточные звенья этой причинно-следственной цепи до сих пор остаются вне поля зрения исследователей в силу сложности непосредственного наблюдения процессов на микроуровне вещества. В то же время физической науке известно многообразие проявлений взаимодействия электромагнитного поля и вещества.

Такое положение дел пока не позволило объяснить все экспериментально наблюдаемые эффекты с позиций одной универсальной теории. Вместо этого отдельными исследователями и физическими школами в качестве механизмов ЭМВ обсуждаются представления и гипотезы о связи явлений на малоизученных структурных уровнях твердого тела с видимым изменением его механических характеристик [1–6, 25].

При объяснении влияния мощного импульсного ЭТ на механическое поведение высокочистых монокристаллов и технических сплавов ключевая роль нередко отводится явлению электрон-дислокационного взаимодействия (ЭДВ) [1, 3, 26]. Квантово-механическому описанию ЭДВ посвящены работы В. Я. Кравченко, аналитически предсказавшего это явление, а также ряда других исследователей [27–29]. При характеристике ЭДВ используют аналогию между динамическим действием обычного ветра на неподвижные предметы и воздействием электронов проводимости, образующих ЭТ «электронный ветер», на дислокации, предполагая, что электронный газ, как и всякий



газ, отличается определенной вязкостью [26]. В силу указанного воздействия электронного газа имеет место ускорение скользящих дислокаций и облегчение срыва со стопоров закрепленных дислокаций, что и является причиной интенсификации пластической деформации и снижения сопротивления металла деформированию.

Рассчитано напряжение  $\sigma(j)$ , характеризующее механический эквивалент воздействия электронного ветра, на скользящие и неподвижные дислокации, которое зависит от плотности тока и квантово-механических характеристик решетки металла. Вычислен также порядок плотности тока ( $1 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^5$  А/мм<sup>2</sup>), при котором будет происходить размножение дислокаций в результате работы источников Франка–Рида без внешней механической нагрузки.

Обсуждаемое взаимодействие обратимо: направленный поток любых структурных дефектов приводит к возмущению электронной подсистемы кристалла и появлению электрического поля или тока [27, 28, 30], что и подтверждается в ходе наблюдений при сварке давлением [31].

Результаты многочисленных экспериментальных и теоретических исследований Ю. И. Головина, В. М. Финкеля, А. А. Слеткова и других ученых показали, что вершины макро- и микротрещин, неметаллические включения и другие неоднородности структуры металла при прохождении по нему импульса ЭТ большой плотности являются концентраторами электромагнитного и температурного полей.

В зависимости от параметров ЭТ и вида неоднородностей температура, до которой нагреваются смежные с этими дефектами малые локальные объемы металла, может достигать значений температуры его рекристаллизации и даже плавления. При этом температура за пределами этих объемов не превышает своих значений, заметно влияющих на исходную структуру. Эти явления оказывают влияние на рост развивающейся трещины, ускоряя и подавляя его [32].

В работе [19] принято обоснованное результатами экспериментов и опытов Ю. И. Головина с сотрудниками положение о том, что если в металл вводится удельная энергия, равная приблизительно  $1 \cdot 10^8 \dots 1 \cdot 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup>, за время  $\tau$ , меньшее чем время  $\tau^*$  выхода температурного поля в установившийся режим ( $\tau^* \sim \rho c \lambda^{-1} l^2$ , где  $\rho$  — плотность;  $c$  — удельная теплоемкость;  $\lambda$  — теплопроводность материала;  $l$  — характерный структурный размер материала, принятый приблизительно  $1 \cdot 10^{-4}$  м), то вводимая энергия будет рассеиваться преимущественно в микрообъемах металла с электрической проводимостью ниже матричной (структурные неоднородности, микро- и субмикродомены), вызывая там значительный нагрев. Для

металлов расчет  $\tau^*$  дает порядок  $1 \cdot 10^{-4}$  с. При  $t < \tau^*$  понятие общего нагрева макрообъема металла теряет смысл, поскольку температурное поле за время  $\tau$  не успевает выравняться между зонами преимущественного тепловыделения и остальным объемом металла, т. е. имеет локально-неоднородный (мозаичный) характер. Повышение остаточных пластических свойств металлов, обработанных мощными электрическими импульсами, авторы указанной выше работы объясняют действием в локальных объемах электромагнитных и термоупругих усилий, вызывающих микропластическую деформацию, способствующую процессам рекристаллизации и «залечивания» микродефектов структуры. Снижение же сопротивления металлов деформированию в момент импульса согласно данной научной школы обусловлено наступлением «состояния динамической (высокоскоростной) сверхпластичности» [19].

Специфические процессы в ферромагнетиках под воздействием внешнего МП оказывают влияние на структуру, фазовый состав и микропластическую деформацию соответствующих сталей. Они способствуют измельчению продуктов превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$ , а также более раннему и полному его протеканию. Как следует из работы [4], основное влияние оказывают следующие факторы: изменение магнитного состояния аустенита выше точки Кюри, приводящее к самопроизвольному появлению малых однодоменных ферромагнитных областей, возникающих и аннигилирующих в парамагнитной  $\gamma$ -матрице по статистическим законам; снижение термодинамического потенциала ферромагнитных фаз сталей; появление магнитотриксционных локальных напряжений; анизотропия смещений атомов кристаллической решетки, нарушающая структурную эквивалентность октаэдрических пустот и меняющая ход диффузионных процессов.

В частности, смещения доменных границ в ферромагнитных кристаллах при намагничивании способствуют откреплению дислокаций от стопоров и вызывают скольжение незакрепленных дислокаций на расстояния приблизительно  $1 \cdot 10^{-6}$  м [33, 34].

Рассматривают и такой фактор интенсификации пластической деформации с помощью ЭТ и МП, как пондеромоторное действие — электродинамическое действие электрических и магнитных полей, вызывающее объемную силу  $F$ , сжимающую материал проводника в радиальном направлении (пинч-эффект). В работах [1, 9, 25] утверждается, что пинч-эффект в условиях импульсных МП при сильно выраженном скин-эффекте может оказать доминирующий вклад в пластическое деформирование металлов. Степень его проявления зависит от напряженности МП, глу-



бины его проникновения в материал и природы материала проводника. В различных работах вклад пинч-эффекта при протекании через проводник ЭТ оценивают по формулам, которые сводятся к известному выражению:

$$\mathbf{F} = \mathbf{j}\mathbf{B}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{j}$  — вектор плотности тока;  $\mathbf{B}$  — вектор магнитной индукции, создаваемой этим током.

Проведены эксперименты [7, 35] по выяснению роли пинч-эффекта, в которых последний создавался изолированно от ЭДВ. Из результатов экспериментов и расчетов по (1) вытекает, что напряжения, вызываемые пинч-эффектом, пренебрежимо малы даже при значительной плотности тока. Однако следует отметить, что используемые методики [7, 35] не безупречны с точки зрения соответствия характера, специально создаваемого МП в материале образца при прохождении через него ЭТ. Вывод о малости рассчитанного по (1) значения объемного усилия может быть применим к диа- и парамагнетикам. Однако в случае ферромагнетиков индукция  $\mathbf{B}$  внутри материала может быть представлена как  $\mathbf{B} = B_0 + \mathbf{B}_j$  (здесь  $B_0$  — вектор индукции внешнего МП,  $\mathbf{B}_j$  — вектор индукции, обусловленной намагниченностью самого тела). При намагничивании ферромагнетика  $\mathbf{B}_j$  может меняться в широких пределах и при определенных условиях достигать значений напряжений поля Вейсса [36]. Это поле обусловлено обменным взаимодействием электронов незаполненных *d*- и *f*-подуровней атомов переходных ферро- и антиферромагнитных металлов и имеет место внутри их доменов. Напряженность поля Вейсса составляет  $1 \cdot 10^8 \dots 1 \cdot 10^9$  А/м [37], что соответствует плотности тока  $1 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$  А/мм<sup>2</sup>. Кроме того, изменения магнитной проницаемости  $\mu$  и плотности  $\gamma$  ферромагнетиков, помещенных во внешнее МП, также влияют на  $\mathbf{F}$ .

На этом основании объемная радиальная сила пинч-эффекта для проводника из ферромагнитного материала должна определяться из выражения [38]:

$$\mathbf{F} = \mathbf{j}\mathbf{B} - 1/2H^2 \text{grad } \mu + 1/2 \text{grad } (H^2 \gamma \delta \mu / \delta \gamma), \quad (2)$$

где первое слагаемое представляет собой силу, сжимающую проводник с током в МП, второе — усилие, обусловленное пространственным изменением магнитной проницаемости, третье — усилие, вызванное зависимостью магнитной проницаемости от плотности ферромагнетика. Составляющие  $\mathbf{F}$  могут меняться в широких пределах. Так, начальная магнитная проницаемость  $\mu_n$  магнитомягких и магнитотвердых материалов составляет  $40 \dots 35000$  ед. При определенном значении внешнего МП  $\mu_n$  снижается до единицы, следо-

вательно, ее изменение может составлять  $1 \cdot 10 \dots 1 \cdot 10^4$  раз.

Можно подсчитать, что порядок плотности ЭТ, достаточный для пластической деформации ферромагнитного образца в результате пинч-эффекта, составляет  $1 \cdot 10^5$  А/мм<sup>2</sup> [38, 39]. При этом возникают трудности в планировании и проведении экспериментов как по выбору мощных источников тока, так и по способам интенсивного теплоотвода, исключающего тепловое действие тока. Очевидно, в случае ферромагнитного материала трудности могут быть устранены при использовании поля Вейсса, создающего объемные усилия, достаточные для пластического деформирования образца. Известно [40], что возбуждение поля Вейсса при соблюдении определенных условий возможно при прохождении через ферромагнетик тока плотностью всего  $8 \dots 12$  А/мм<sup>2</sup>.

Влияние слабых ЭМВ (магнитная индукция  $B \cong 1$  Тл,  $j \cong 10^{-1}$  А/мм<sup>2</sup>) на скорость ползучести, подвижность дислокаций невозможно объяснить их силовым или энергетическим действием по изложенным выше механизмам, поскольку энергия, сообщаемая такими ЭМВ любому структурному элементу, обычно ниже порога активации любых изменений. В этом случае пластическое течение в материале представляют как совокупность химических реакций между межузельными атомами, атомами из состава примесных атмосфер — стопоров дислокаций — и атомами в составе ядер дислокаций.

Тогда в рамках теории спин-зависимых проявлений в химической физике предлагается механизм влияния слабых МП на синглет-триплетные переходы (спиновую конверсию) в атомах, составляющих комплекс взаимодействующих дислокаций и стопора. Высота создаваемого примесью потенциального барьера движению дислокации определяется спиновыми характеристиками, радиусами и зарядами ионов, их количеством в комплексе. МП изменяет состояние электронов, обеспечивающих ковалентную связь в комплексе дислокация – стопор, снимая или налагая спиновые запреты на те или иные термодинамически возможные реакции. В ряде случаев это делает возможным уменьшение доли ковалентной связи в общей энергии взаимодействия стопора и дислокации, тем самым снижается высота потенциального барьера, облегчается срыв дислокаций со стопоров и уменьшается концентрация центров примесей, способных стать эффективными стопорами. В работе [25] предполагается, что, кроме ковалентной составляющей энергии взаимодействия стопора и дислокаций, МП может снижать и долю электростатического их взаимодействия. Указанные факторы обуславливают наблюдаемое увеличение подвижности дислокаций. На пластичность химически чистых, механически ненаг-



руженных материалов, а также при высокой частоте изменения МП (приблизительно  $1 \cdot 10^2$  Гц) слабые МП влияют неэффективно [6].

Кроме основных физических процессов, рассмотренных выше, изучается и обсуждается также роль явлений на внутренних и внешних поверхностях раздела [3, 14, 25], макронеоднородных температурных полей [1, 25], роль динамической неравновесности скоплений дислокаций [25], джоулевого нагрева и др.

**Практическое использование электромагнитных воздействий.** Результаты исследований влияния ЭМВ на протекание пластической деформации в металлах позволили предложить новые способы обработки металлов давлением (например, электропластическое волочение проволок и трубок малого диаметра [2, 41], электростимулированная прокатка тонких лент из ванадия и молибдена, а также из сплавов [26, 42]), а также способы обеспечения высоких эксплуатационных свойств конструкций.

Данные работ М. А. Кривоглаза, В. Д. Садовского, М. Л. Бернштейна, В. Н. Пустовойта создают предпосылки для весьма перспективного применения термообработки, совмещенной с наложением МП. Например, закалка и отпуск в МП быстрорежущей стали обеспечивает ее фазовый состав и механические свойства на том же уровне, что и традиционная термообработка, т. е. закалка и трехкратный отпуск. Вместе с тем, экспозиция в МП сверл после традиционной обработки малоэффективна (их износостойкость заметно возрастает лишь при малых скоростях резания) [4], либо вообще неэффективна [43].

В основе некоторых способов обработки металла лежит возможность осуществления сверхбыстрого нагрева и охлаждения его тонкого поверхностного слоя с помощью импульсных ЭМВ [44].

В области сварочного производства широко используют электромагнитные воздействия на зону сварки для управления массопереносом, кристаллизацией и формой шва.

Однако известны единичные попытки использования электромагнитной энергии для обработки металла сварных соединений. В частности, осуществление процесса электрошлаковой сварки с сопутствующей электроразрядной обработкой позволило отказаться от нормализации соединений стали перлитного класса, а также повысить коррозионную стойкость соединений стали 10X18N10T, полученных способом электрошлаковой сварки с электроразрядной обработкой [45]. Имеются данные [5] о том, что обработка импульсами тока оказывает благоприятное влияние на прочностные и пластические свойства неоднородных материалов типа биметаллов, полученных сваркой взрывом.

Таким образом, установлено, что ввод электромагнитной энергии в металл вызывает в нем широкую гамму сложных процессов, происходящих на макро-, микро- и субмикроскопическом уровне. Это может оказать влияние на поведение металла, а также на его остаточные механические свойства. Целесообразны дальнейшие исследования по оценке влияния электромагнитных воздействий на металл сварных соединений.

1. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В.* Прочность сплавов криогенной техники при электромагнитных воздействиях. — Киев: Наук. думка, 1990. — 160 с.
2. *Спицин В. И., Троицкий О. А.* Электропластическая деформация металлов. — М.: Наука, 1985. — 168 с.
3. *Савенко В. С.* Механическое двойникование металлов в условиях внешних энергетических воздействий. — Минск: Технопринт, 2000. — 212 с.
4. *Бернштейн М. Л., Пустовойт В. Н.* Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле. — М.: Машиностроение, 1987. — 256 с.
5. *Методы оценки механических свойств металлических материалов в условиях электрических воздействий / А. И. Тананов, Н. Н. Беклемишев, Б. Н. Журкин и др. // Завод. лаб. — 1983. — № 7. — С. 59–66.*
6. *Головин Ю. И.* Магнитопластичность твердых тел // Физика твердого тела. — 2004. — 46, № 5. — С. 769–803.
7. *Спицин В. И., Троицкий О. А.* Влияние электрического тока и импульсного магнитного поля на скорость ползучести металла // Докл. АН СССР. — 1974. — 216, № 6. — С. 1266–1269.
8. *Стрижало В. А., Воробьев Е. В.* Скачкообразная деформация металла в условиях воздействия импульсного магнитного поля и криогенных температур // Пробл. прочн. — 2003. — № 1. — С. 137–142.
9. *Головин Ю. И., Тялин Ю. Н., Умрихин В. М.* Поле механических напряжений и прочность цилиндрических проводников в пинчующих электромагнитных полях // I Всесоюз. конф. «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность металлов и сплавов», г. Юрмала, 29 сент. – 1 окт. 1987 г.: Тез. докл. — М.: Ин-т машиноведения им. А. А. Благонравова АН СССР, 1987. — С. 37.
10. *Щербаков И. П., Чураев Д. В., Светлов В. Н.* Исследование изменения субмикрорельефа поверхности медных образцов при пропускании по ним импульсов электрического тока большой плотности // Журн. техн. физики. — 2004. — 74, № 4. — С. 139–142.
11. *Каменецкая Д. С., Пилецкая И. Б., Ширяев В. И.* О влиянии магнитного поля на пластическую деформацию железа // Докл. АН СССР. — 1971. — 199, № 6. — С. 1289–1291.
12. *Кишкин С. Т., Клытин А. А.* Эффекты электрического и магнитного воздействия на ползучесть металлов и сплавов // Там же. — 1973. — 211, № 2. — С. 325–327.
13. *Клытин А. А.* О влиянии магнитного и электрического полей на ползучесть // Металловедение и терм. обраб. металлов. — 1973. — № 8. — С. 2–6.
14. *Клытин А. А.* О пластической деформации металлов при наличии электрического воздействия // Пробл. прочн. — 1975. — № 7. — С. 20–25.
15. *Дацко О. И., Абрамов В. С.* Влияние импульсов слабого магнитного поля на процессы микропластической деформации и деформационного старения // Физ. и техн. высоких давлений. — 2003. — 13, № 1. — С. 84–90.
16. *Бадьлевич М. В., Иунин Ю. Л., Кведер В. В.* Влияние магнитного поля на стартовые напряжения и подвижность индивидуальных дислокаций в кремнии // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 2003. — 124, № 3. — С. 664–669.



17. Дацко О. И. Дислокационное внутреннее трение материала с вакансиями в импульсах слабого магнитного поля // Физ. твердого тела. — 2002. — 44, № 2. — С. 289–293.
18. Исследование остаточных напряжений в металле сварных соединений / В. А. Сокирко, Е. Ю. Бережинская, П. П. Дивак, Ю. Л. Надеждин // Всесоюз. науч.-техн. конф. «Электронно-лучевая сварка в машиностроении», г. Николаев, 12–14 сент. 1989 г.: Тез. докл. — Николаев: ВНИИТСМ «Сириус», 1989. — С. 104.
19. Пластичность и прочность металлических материалов при импульсном воздействии высокоэнергетического электромагнитного поля / Н. Н. Беклемишев, Н. М. Горбунов, Н. И. Корягин и др. / АН СССР. Ин-т пробл. механики. — Препр. — М., 1989. — 56 с.
20. Валеев И. Ш., Барыкин Н. П., Трифонов В. Г. Изменение структуры и механических свойств алюминиевого сплава АМГб при воздействии мощными импульсами тока // Физ. мет. и металловедение. — 2003. — 96, № 4. — С. 85–89.
21. Влияние электрического тока на малоцикловую усталость стали / Г. В. Карпенко, О. А. Кузин, В. И. Ткачев, В. П. Руденко // Докл. АН СССР. — 1976. — 227, № 1. — С. 85–86.
22. Эволюция ферритоперлитной структуры при импульсном воздействии электроток / О. В. Соснин, Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов и др. // Физ. и хим. обраб. материалов. — 2003. — № 4. — С. 63–69.
23. Лоскутов С. В., Левитин В. В. Влияние электроимпульсной обработки на структуру и долговечность титановых сплавов // Журн. техн. физики. — 2002. — 72, № 4. — С. 133–135.
24. Пудов В. И., Соболев А. С. Оптимизация физико-механических свойств поликристаллических многокомпонентных ферромагнитных материалов методом термомагнитной обработки. Ч. 2. Термомагнитная обработка легированных сталей // Физ. и хим. обраб. материалов. — 2004. — № 5. — С. 94–97.
25. Батаронов И. Л. Механизмы электропластичности // Соросовский образовательный журн. — 1999. — № 10. — С. 93–99.
26. Климов К. М., Шнырев Г. Д., Новиков И. И. Об «электропластичности» металлов // Докл. АН СССР. — 1974. — 219, № 2. — С. 323–324.
27. Фикс В. Б. Увлечение и торможение подвижных дефектов в металлах электронами проводимости. Роль закона дисперсии электронов // Журн. эксп. и теорет. физики. — 1981. — 80, № 4. — С. 1539–1542.
28. Фикс В. Б. О взаимодействии электронов проводимости с одиночными дислокациями в металлах // Там же. — 1981. — 80, № 6. — С. 2313–2316.
29. Нацик В. Д., Маковоз Д. Б. Взаимодействие плазменных колебаний электронов проводимости металла с дислокациями // Физ. мет. и металловедение. — 1987. — 63, № 4. — С. 645–653.
30. Кравченко В. Я. О возможности наблюдения движения дислокаций в проводящих кристаллах по электрическим эффектам // Физ. твердого тела. — 1967. — 9, № 4. — С. 1050–1056.
31. Харченко Г. К., Фальченко Ю. В., Игнатенко А. И. О механоэлектрическом эффекте при сварке давлением // Автомат. сварка. — 1997. — № 1. — С. 50.
32. Слетков А. А. Торможение трещин импульсами электрического тока: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Воронеж, 1977. — 18 с.
33. Чеботкевич Л. А., Урусовская А. А., Ветер В. В. Движение дислокаций под действием магнитного поля // Кристаллография. — 1965. — 10, № 5. — С. 688–691.
34. Взаимодействие блоховских стенок с дислокациями в слабых полях / Л. А. Чеботкевич, А. А. Урусовская, В. В. Ветер, А. Д. Ершов // Физ. твердого тела. — 1967. — 9, № 4. — С. 1093–1097.
35. Стицин В. И., Троицкий О. А. Электропластический эффект в металлах // Вест. АН СССР. — 1977. — № 11. — С. 10–15.
36. Паршенков Н. А. Оценка влияния индуктивной составляющей намагничивания ферромагнитных конструкций на сварочные процессы // Автомат. сварка. — 1991. — № 5. — С. 23–28.
37. Гуденаф Дж. Магнетизм и химическая связь / Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1963. — 325 с.
38. Шимони К. Теоретическая электротехника / Пер. с нем. — М.: Мир, 1964. — 773 с.
39. Киттель Ч. Элементарная физика твердого тела / Пер. с англ. — М.: Наука, 1965. — 366 с.
40. Латышев А. П. Теория размагничивания. — Л.: ВМОЛА, 1960. — 350 с.
41. Троицкий О. А. Электропластическая деформация стали растяжением и волочением // Сталь. — 1974. — № 5. — С. 450–453.
42. Климов К. М., Новиков И. И. О перспективах развития методов электростимулированной прокатки металлов // Металлы. — 2004. — № 3. — С. 45–51.
43. Структура та властивості поверхневого шару інструменту з сталі Р6М5 після магнітно-абразивної обробки / М. М. Бобіна, В. С. Майборода, Н. В. Ульяненко, А. В. Бобін // Фізика і хімія твердого тіла. — 2002. — 3, № 4. — С. 577–580.
44. Дудкина Н. Г., Захаров И. Н. Исследование микротвердости поверхностного слоя углеродистых сталей после электромеханической обработки // Металлы. — 2004. — № 4. — С. 64–70.
45. Дудко Д. А., Кузьменко А. Б. Виброимпульсное воздействие на кристаллизующийся металл сварочной ванны при ЭШС // Автомат. сварка. — 1997. — № 11. — С. 32–36.

Data on the main features and mechanisms of electromagnetic action on the structure of the base metal and welded joints are described.

Поступила в редакцию 23.07.2006





УДК 621.791.4

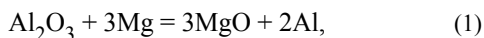
## СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ КОМПОЗИТА АМg5+23% SiC

Г. К. ХАРЧЕНКО, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН Украины А. Я. ИЩЕНКО, Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, А. Н. МУРАВЕЙНИК, инж., Г. Н. ГОРДАНЬ, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана технология сварки в вакууме дисперсно-упрочненного композиционного материала АМg5+23%SiC. Установлено, что при сварке в формирующей матрице с циклическим приложением давления промежуточная прослойка из алюминия технической чистоты насыщается магнием и марганцем, происходит упрочнение прослойки и повышение прочности на срез сварных соединений.

*Ключевые слова:* сварка давлением, сварные соединения, композит, алюминиево-магнийный сплав, упрочняющая фаза, прочность соединений, формирующие устройства, сублимация

В работах [1–4] установлено, что при сварке давлением в твердой фазе композиционных материалов (КМ), имеющих матрицу на алюминиевой основе, образование качественного сварного соединения зависит от содержания магния в композите и в промежуточной прослойке. В работе [1] сделано предположение, что магний при диффузионной сварке диффундирует из композита (Al–Mg–Cu) к стыкуемым поверхностям и взаимодействует с оксидом алюминия, что приводит к разрушению пленки оксида алюминия (рис. 1). Согласно работе [1] магний, находящийся в композите, реагирует с оксидом алюминия по следующей реакции:



Подобный механизм взаимодействия магния с алюминием при диффузионной сварке задолго до работы [1] был предложен в работе [5]. Он заключается в том, что в процессе нагрева (без приложения давления) магний сублимирует и оседает на поверхности алюминия. Процесс сублимации определяется глубиной вакуума, временем нагрева и температурой. Затем происходит взаимодействие оксида алюминия с магнием и образуется шпинель  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ , через которую атомы алюминия диффундируют быстрее, чем атомы магния (диаметр атома алюминия меньше диаметра атома магния).

Прочность соединений композитов группы Al–C с прослойками из сплавов Al–Mg оценивали испытаниями на срез [2, 4]. Установлено, что с увеличением содержания магния в прослойке от 0,95 до 6 % прочность на срез сварного соединения возрастает. Авторы работы [2, 4] объясняют уве-

личение прочности тем, что магний, вероятно, связывает частицы графита в стойкие соединения в виде карбидов, которые не блокируют процесс массопереноса в зоне контакта.

Авторами статьи представляется другой механизм влияния содержания магния в металле прослойки на показатели прочности на срез. Известно, что участок соединения в виде промежуточной прослойки, металл которой имеет предел текучести меньше, чем металл соседних участков, принято называть мягкими прослойками. Роль последних в сварных соединениях композитов выполняют прослойки из технического алюминия и его сплавов с магнием. В работах О. А. Бакши [6] показано, что при сдвиге в отличие от растяжения пластические деформации в мягких прослойках не сдерживаются более прочными частями соединения, поэтому контактное упрочнение в них не наблюдается. Таким образом, увеличение показателей прочности соединений композитов с прослойками из сплавов алюминия с магнием при испытаниях на сдвиг обусловлено снижением пре-

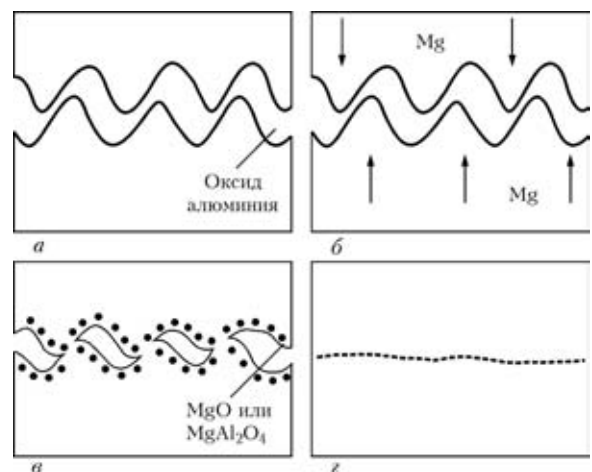


Рис. 1. Схемы стадий образования сварного соединения [1]: а — физический контакт; б — диффузия магния к соединяемым поверхностям; в — взаимодействие магния с оксидом алюминия; г — металлическая связь



дела текучести материала прослоек, в которых повышается содержание магния.

Анализ известных публикаций по изучению свариваемости в твердой фазе дисперсно-упрочненных КМ на алюминиевой основе, содержащих частицы кремния [1] или углерода [2–4], позволяет сделать вывод о влиянии магния на свариваемость, т. е. для повышения качества сварных соединений следует ускорить процессы его массопереноса.

В работе [7] показано, что циклическое воздействие давления при сварке в твердом состоянии вызывает непрерывное восстановление высокой скорости пластической деформации соединяемых металлов, инициирует развитие физического контакта, повышает количество активных центров и уменьшает энергию активации образования химических (металлических) связей, что в совокупности обуславливает увеличение скорости химического взаимодействия (возрастание прочности).

В работе [8] установлено, что циклическое воздействие давления приводит к увеличению подвижности атомов в металле на несколько порядков. Причем температура нагружения в этих условиях не является доминирующим фактором. Показано, что в условиях циклического воздействия массоперенос происходит по межузельному механизму миграции атомов, а подвижность атомов уменьшается с увеличением их размеров.

Следует отметить, что в литературе нет сведений об изменении химического состава прослойки в процессе деформации, а также возможности уравнивания в процессе сварки давлением химического состава исходной прослойки из чистого алюминия с химическим составом матрицы композита. Это и послужило целью представленных ниже исследований.

Исследования проводили на КМ на основе сплава алюминия АМг5 с 23%-й упрочняющей фазой SiC, который был изготовлен литейным способом — замешиванием керамических частиц SiC в расплав материала матрицы с последующим прессованием. В исходном состоянии структура композита представлена  $\alpha$ -твердым раствором алюминия, светлыми включениями интерметаллидов  $Al_3Mg_2$ ;  $Al_6(FeMn)$ ;  $Mg_2Si$ , и др., присущих матричному алюминиевому сплаву, и частицам карбида кремния. Упрочняющие частицы SiC размером 6...20 мкм достаточно равномерно распределены в объеме матрицы, они имеют угловатую форму и межчастичное расстояние 3...25 мкм.

Твердость КМ в исходном состоянии составляет *HRB* 94...95, химический состав матричного сплава композита приведен в таблице.

Сравнительный анализ свариваемости композита проводили методом диффузионной сварки в вакууме (ДСВ) при циклическом приложении давления в условиях свободной деформации или с принудительным деформированием зоны контакта при использовании формирующих устройств. Образцы КМ размером 15×15×6 мм сваривали без прослойки и с применением промежуточной прослойки из алюминия технической чистоты АД1 (таблица) толщиной 0,15 мм (данная толщина прослойки определена как оптимальная в ранее проведенных авторами исследованиях по свариваемости КМ [3]).

ДСВ проводили при температуре  $T = 560$  °С, времени сварки  $t = 15...20$  мин, давлении осадки  $P = 0,9...1,2$  МПа, вакууме в рабочей камере  $V = 1,33 \cdot 10^{-3}$  Па. Применяли пять циклов нагружения при средней продолжительности одного цикла 3 мин. Степень пластической деформации образцов задавали на уровне  $\epsilon = 40$  %. Общее время процесса сварки (нагрев до температуры сварки до 60 мин, выдержка под давлением 15...20 мин, охлаждение изделия) составляло порядка 2,5...3 ч.

Подготовка образцов под сварку заключалась в снятии напильником нагартованного поверхностного слоя толщиной порядка 0,2...0,3 мм и зачистки шабером. Из основного материала и сварных соединений изготавливали образцы для механических испытаний и шлифы для изучения микроструктуры, исследования которой проводили на металлографических шлифах в нетравленном состоянии, после химического травления и электролитического полирования в уксусно-хлорном электролите. Химическое травление образцов проводили в растворе реактива «Келлера» или в 5%-м растворе плавиковой кислоты. Исследования микроструктуры выполняли на микроскопах МИМ-8, «Neophot-32», сканирующем электронном микроскопе GSM-840. Микротвердость образцов измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,2 Н. Элементный состав определяли на рентгеновском микроанализаторе САМЕВАХ. Образцы исходного КМ и сварные соединения испытывали на срез.

Оценку содержания магния на свариваемых поверхностях КМ и в промежуточной прослойке после их нагрева перед сваркой (560 °С в течение 30 мин с минимальным давлением, достаточным только для схватывания по отдельным микровы-

**Химический состав алюминиевого сплава (матрица композита) и промежуточной прослойки, %**

Сплав	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Ti	Zn	Al
АМг5	0,10	4,8...5,8	0,3...0,8	0,5	0,5	0,02...0,1	0,2	Остальное
АД1	0,05	0,05	0,025	0,3	0,3	0,15	0,1	99,3

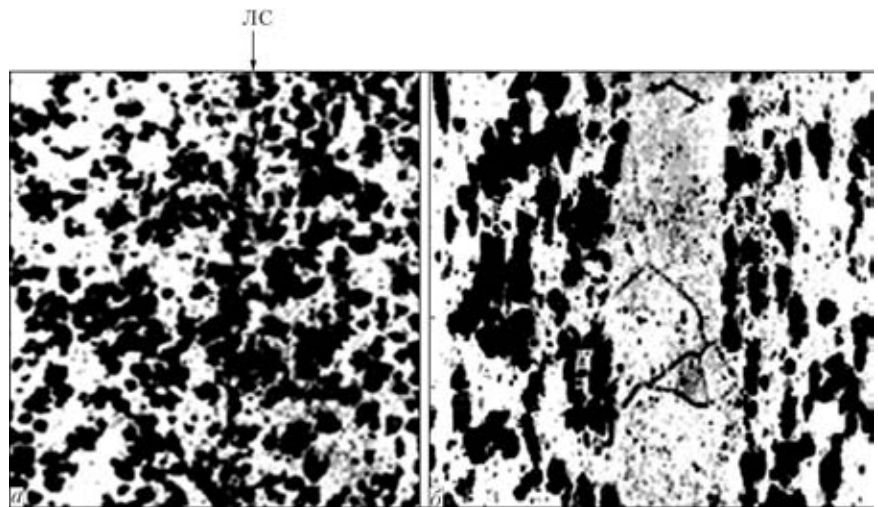


Рис. 2. Микроструктура сварных соединений ( $\times 400$ ), полученных ДСВ без промежуточной прослойки (а) и с прослойкой (б)

тупам) проводили методом растровой микроскопии. После нагрева полученные соединения разрушали по линии контакта. На поверхности алюминиевой прослойки выявлена повышенная концентрация магния (до 1,6 %).

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что на стадии предварительного нагрева перед приложением сварочного давления в стыке происходит диффузия магния к свариваемым поверхностям, разрушение оксидной пленки на композите, сублимация магния и его осаждение на алюминиевой прослойке, т. е. создаются условия для восстановления магнием пленки оксидов на композите и промежуточной прослойке из алюминия технической чистоты АД1.

Металлографические исследования сварных соединений показали, что при непосредственной сварке КМ с КМ армирующие частицы, интерметаллиды матрицы, оксиды концентрируются по линии соединения (ЛС). Особенно четко она выявляется в местах скопления армирующих частиц (рис. 2, а), где наблюдаются поры и несплошности. Прочность соединений на срез составляет  $\sigma_{ср} = 9$  МПа, что объясняется большой жесткостью композита и малой пластичностью приконтактных слоев материала, поэтому в дальнейшем применяли промежуточную прослойку из алюминия.

В сварных соединениях КМ, полученных ДСВ в условиях свободной деформации, в стыке между прослойкой и матричным алюминием скопления армирующих частиц не наблюдается (рис. 2, б). Толщина алюминиевой прослойки в процессе сварки уменьшается со 150 до 100...120 мкм. Микротвердость алюминиевой прослойки составляет 650 МПа. Оптической микроскопией установлено, что характер распределения армирующих частиц в зоне сварки не изменяется. Прочность соединений на срез составляет 20...30 МПа. Разрушение сварных соединений происходит по шву.

Свариваемость КМ с прослойкой АД1 изучали при циклическом приложении давления и с ис-

пользованием формирующего устройства для локализации пластической деформации непосредственно на прослойке и обеспечения в стыке направленного течения приконтактных слоев металла. Дефекты в зоне контакта в сварном соединении не выявлены. Степень деформации прослойки составляет 46...60 %. Толщина слоя алюминия изменяется от 80 мкм в центральной части образца до 60 мкм по его краям, т. е. по краям сварного соединения прослойка тоньше, чем в его центральной части. Обнаруженные особенности связаны с тем, что на периферии стыка более интенсивно действуют сдвиговые деформации. Микротвердость алюминиевой прослойки в зоне соединения составляет 750 МПа, прочность соединений  $\sigma_{ср} = 124...132$  МПа, разрушение происходит по основному металлу. Одной из главных отличительных особенностей сварных соединений, полученных в формирующей матрице, является наличие грата, в который при сварке вовлекается не только мягкая прослойка, но и прилегающие к ней слои КМ, что способствует более интенсивному разрушению оксидной пленки на свариваемых поверхностях.

Микрорентгеноспектральным анализом установлено, что при сварке в формирующих устройствах происходит насыщение промежуточной прослойки из АД1 марганцем примерно до 0,1 и магнием до 3 %. Сравнив исходный химический состав (см. таблицу) прослойки из алюминия технической чистоты АД1 и ее состав после сварки в формирующих устройствах (рис. 3), можно заключить, что после сварки содержание магния в прослойке возросло до 60, а марганца — до 4 раз. Таким образом, в стыке исходная промежуточная прослойка из АД1 в процессе сварки трансформируется в сплав алюминия Al-Mg, который имеет более высокие показатели прочности и более низкие показатели пластичности, чем АД1. Такое изменение механических свойств промежуточной прослойки обуславливает увеличение показателей прочности при испытаниях сварных соединений на срез. Если при сварке в свободном

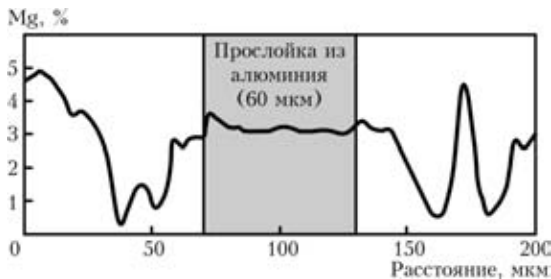


Рис. 3. Характер распределения магния в переходной зоне сварных соединений КМ при ДСВ в формирующих устройствах

состоянии прочность соединения на срез составляла 20...30, то при сварке с использованием формирующих устройств прочность соединения соответствует прочности композита — 120...130 МПа, т. е. возрастает до шести раз.

В заключение следует отметить, что разработанная технология ДСВ композита АМg5 + 23 % SiC позволяет повысить прочность на срез сварных соединений до уровня прочности композита благодаря использованию формирующих устройств и циклического приложения давления сварки, а также упрочнению промежуточной прослойки из алюминия технической чистоты АД1 в результате

диффузии магния и марганца из матрицы композита.

1. *Bushby R. S., Scott V. D.* Joining of particulate silicon carbide reinforced 2124 aluminium alloy by diffusion bonding // *Mat. Sci. and Tech.* — 1995. — **11**, № 8. — P. 753–758.
2. *Сварка дисперсноупрочненного материала Al+4%С / В. Р. Рябов, Г. К. Харченко, В. П. Гуриенко и др.* // *Автомат. сварка.* — 1996. — № 1. — С. 59–61.
3. *Особенности формирования структуры сварных соединений дисперсно-упрочненного композита Al+4%С при диффузионной сварке / В. Р. Рябов, А. Н. Муравейник, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко* // Там же. — 2003. — № 12. — С. 7–10.
4. *Болотов Г. П., Ганеев Т. Р.* Диффузионное зварювание дисперсноупрочненных композиционных материалов группы Al-C // *Вісн. Черніг. держ. техн. ун-ту. Сер. Технічні науки.* — 2004. — № 21. — С. 107–110.
5. *Диффузионная сварка магния с алюминием в вакууме / И. Г. Корсунская, А. Н. Люличев, Г. И. Максименко* // *Свар. пр-во.* — 1970. — №7. — С. 19–21.
6. *Бакиш О. А.* Механическая неоднородность сварных соединений. Ч. 1. — Челябинск: Челяб. политехн. ин-т, 1981. — 56 с.
7. *Абрамов В. В., Каракозов Э. С., Петров В. А.* Кинетика образования соединения при сварке в твердом состоянии статическим и циклическим нагружением с подогревом // *Физика и химия обработки материалов.* — 1970. — №4. — С. 107–113.
8. *Массоперенос и фазообразование в металлах при импульсных воздействиях / В. М. Миронов, В. Ф. Мазанко, Д. С. Герцрикен, А. В. Филатов.* — Изд-во Самар. ун-та, 2001. — 231 с.

The technology was developed for vacuum welding of precipitation-hardened composite material AMg5 + 23 % SiC. It was established that the interlayer of commercial-purity aluminium is saturated with magnesium and manganese, the interlayer is hardened, and shear strength of the welded joints grows during welding in the forming matrix with a cyclic application of pressure.

Поступила в редакцию 30.06.2006

## ПОЛЕЗНАЯ КНИГА

**Лясоцкая В. С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов.**  
— М.: Экомет, 2003. — 352 с.



Рассмотрены фазовые превращения, протекающие при сварочном цикле и термической обработке в титановых сплавах, структура и свойства сварных титановых соединений, выполненных сваркой плавлением, влияние примесей на их свойства. Описаны традиционные виды термической обработки, включающие отжиг, закалку и старение, применяемые для сварных соединений титановых сплавов разных структурных классов. Большое внимание уделено новым видам термической обработки, в частности, термодиффузионной, термоводородной, локальной обработке с применением концентрированных источников нагрева (электронным и световым лучом, ТВЧ). Даны практические рекомендации по технологии термической обработки разных сварных конструкций из титановых сплавов.

Предназначена для сварщиков, металлургов, инженерно-технических работников, занимающихся исследованием титановых сплавов и их сварных соединений.

**Справки по телефонам: (095) 699-97-85, 699-96-23, (095) 251-64-95  
Факс: (095) 755-90-40, (095) 251-64-95 E-mail: intermet@aha.ru**



# ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ РАСПЛАВЛЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ ПОД ФЛЮСОМ

А. Д. РАЗМЫШЛЯЕВ, д-р техн. наук, А. А. ДЕЛИ, М. В. МИРОНОВА, аспиранты  
(Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Уточнены причины повышения производительности процесса расплавления электрода при дуговой наплавке под флюсом на токе обратной полярности в продольном магнитном поле (ПРМП). Показано, что эффект увеличения коэффициента расплавления электродной проволоки зависит от ее магнитных свойств и проявляется не только для постоянного ПРМП, но и для знакопеременного частотой 50 Гц.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, продольное магнитное поле, капля электродного металла, коэффициент расплавления электрода, магнитные свойства, ферромагнетика

В работах [1, 2] показано, что при дуговой сварке под флюсом в постоянном продольном магнитном поле (ПРМП) коэффициент расплавления электродной проволоки  $\alpha_p$  при прямой полярности процесса повышается на 50, при обратной — на 30, при сварке на переменном токе — на 40 %. Установлено также [2], что переменное ПРМП с частотой 50 Гц не влияет на  $\alpha_p$  проволоки вследствие высокой инерционности расплава капли на торце электрода. Обнаруженные особенности наблюдали при использовании ферромагнитных электродных проволок Св-08А диаметром 3...5 мм.

Повышение  $\alpha_p$  проволоки в процессе сварки при воздействии постоянного ПРМП в работах [2, 3] объясняют тем, что капля в этом случае вращается под действием электромагнитных сил, при этом уменьшается ее толщина в направлении оси электрода и время существования, что улучшает условия теплопередачи через каплю.

Представления о том, что при воздействии ПРМП капля вращается (или может вращаться), подтверждают расчеты электромагнитных сил, выполненные в работе [4], а также данные кинограмм поведения капли при сварке в аргоне немагнитной проволокой ЭИ-395 с воздействием ПРМП [5].

В работах [1–4] вращение капли при воздействии ПРМП объясняют действием объемных электромагнитных сил, вектор которых в каждом элементарном объеме капли направлен по касательной, т. е. азимутально. При этом полагают, что электромагнитные силы в капле возникают от взаимодействия осевой составляющей индукции ПРМП с радиальной компонентой плотности тока

в капле. В работе [3] принято допущение, что на радиальную составляющую плотности тока в капле приходится половина полной плотности тока в капле, которое, на наш взгляд, не является обоснованным по следующим причинам.

Данные о размере капель на торце электрода, плавящегося дугой под флюсом, которые приведены в работе [6], получены рентгено съемкой процесса сварки под флюсом и только их следует признавать достоверными. По этим данным для обратной полярности процесса сварки масса капли (в диапазоне токов сварки 500...750 А, в котором осуществляли наплавки под флюсом) не превышает 0,28 г. Тогда объем капли (в виде шара при плотности жидкого металла 7,0 г/см<sup>3</sup>) составит 0,04 см<sup>3</sup>, а ее диаметр  $d_k = 4,3$  мм, т. е. диаметр капли меньше диаметра электрода  $d_k < d_s$  (в работе [6] электрод по площади сечения соответствовал диаметру 5,3 мм). При указанных соотношениях диаметров капли и электрода можно полагать, что активное пятно дуги полностью охватывает каплю. В наших исследованиях наплавку осуществляли проволоками диаметрами 5 и 4 мм, поэтому можно принять, что указанное соотношение  $d_k < d_s$  также выполнялось.

В работе [7] путем моделирования процесса методом RR сеток было установлено, что радиальная плотность тока в капле незначительна даже при условии, что пятно дуги полностью охватывает каплю.

При воздействии ПРМП вращающаяся капля не может иметь форму, отличную от эллипсоидной, вследствие неустойчивости других форм ее поверхности [8, 9], что также принято в работе [3]. Маловероятным представляется предположение о том, что при воздействии ПРМП активное пятно дуги размещается на участках жидкой капли, расположенных вне диаметра электрода (что привело бы к увеличению радиальной составляющей плотности тока в капле). Наиболее вероятным представляется, что как в обычном про-

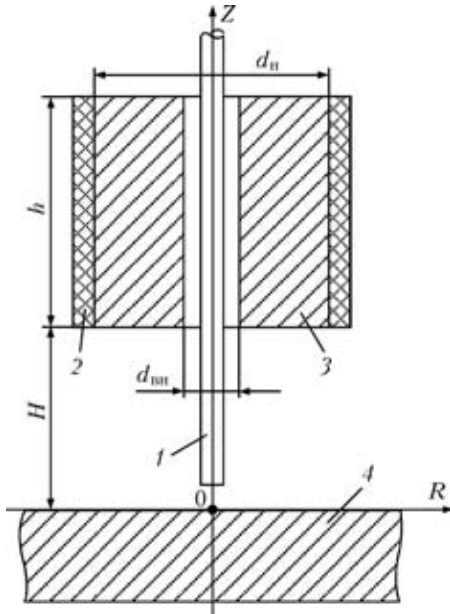


Рис. 1. Схема системы тел для расчета распределения индукции магнитного поля: 1 — электродная проволока; 2 — обмотка соленоида; 3 — сердечник соленоида; 4 — изделие (пластина)

цессе дуговой сварки, так и в процессе сварки с воздействием ПРМП радиальная составляющая плотности тока в капле значительно меньше ее осевой составляющей.

По методике, изложенной в работах [10, 11], выполнены расчеты индукции ПРМП в немагнитном зазоре ( $\Delta = 5$  мм) между торцом электродной проволоки и изделием (рис. 1). Принято, что капля, расположенная в этом зазоре (пространстве), при плавлении проволок из ферромагнитных материалов является немагнитной ( $\mu = 1$ ), температура нагрева проволоки на вылете (рис. 1) ниже точки Кюри. Проволока является ферромагнитной с постоянным значением  $\mu$  (принято, что  $\mu = 500$ ), а длина участка вылета проволоки, примыкающего к капле и нагретого выше точки Кюри, как показали расчеты, не превышала 1 мм. В расчетах принято также значение  $\mu = 500$  для ферромагнитного сердечника 3 и для изделия 4, если оно является ферромагнетиком.

Расчеты показали, что при наплавке в ПРМП электродными проволоками из магнитных материалов (например, проволокой Св-08А) на пластины из магнитных и немагнитных материалов в дуговом промежутке (в зоне у торца электрода) радиальная компонента индукции  $B_r$  достигает значения 0,3...0,5 по отношению к продольной  $B_z$  (рис. 2). В связи с этим можно предположить, что электромагнитные силы в капле, обуславливающие ее вращение, возникают вследствие взаимодействия осевой плотности тока в капле (а не радиальной) с радиальной составляющей индукции  $B_r$  ПРМП. При наплавке немагнитной проволокой ( $\mu = 1$ ) на изделие из ферромагнитных

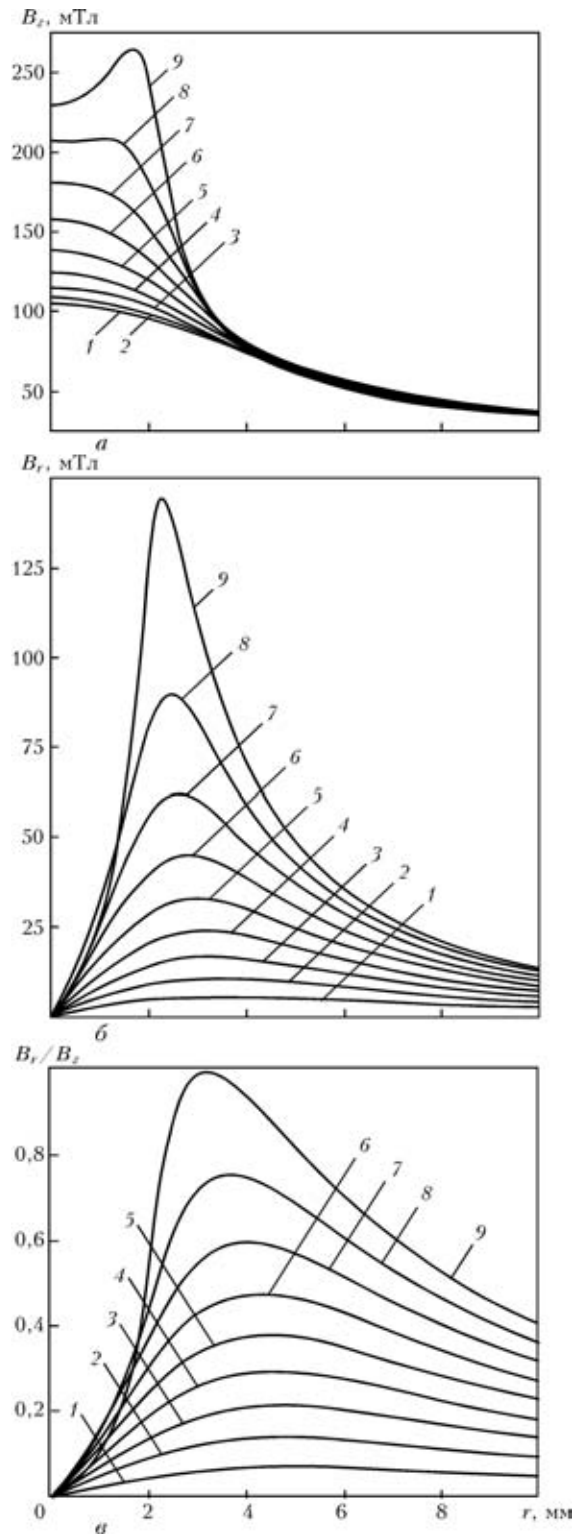


Рис. 2. Распределение компонент индукции  $B_z$  (а),  $B_r$  (б) и отношения  $B_r/B_z$  (в) вдоль оси  $r$  (последовательно при различных  $Z$ ) для случая, когда проволока и изделие — ферромагнетики ( $\mu = 500$ ): 1–9 —  $Z = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5$  мм;  $I_w = 2000$  А

материалов радиальная компонента индукции  $B_r$  в зоне капли пренебрежимо мала (рис. 3), поэтому электромагнитная сила будет также незначительной, и ожидаемый эффект повышения  $\alpha_p$  электрода будет также незначительным.





Настоящая работа посвящена уточнению механизма, обуславливающего вращение капли на торце электрода и повышению  $\alpha_p$  электрода при воздействии ПРМП в процессе наплавки постоянным током обратной полярности под флюсом.

Поскольку увеличение коэффициента расплавления электрода  $\alpha_p$  при воздействии ПРМП адекватно уменьшению тока наплавки, то в данной работе уровень повышения  $\alpha_p$  оценивали через относительное уменьшение тока наплавки  $\Delta I_n$ , т. е. как  $\Delta I_n / I_n$  ( $I_n$  — ток наплавки после включения ПРМП).

Экспериментальные наплавки выполняли автоматом АДС-1002 с независимой от напряжения дуги скоростью подачи электрода от выпрямителя ВДУ-1201 с падающей внешней характеристикой на токе обратной полярности под флюсом АН-348А. При наплавке выполняли запись параметров режима наплавки  $I_n$ ,  $U_d$  самопишущими приборами типа НЗ90. Во всех экспериментах параметры режима наплавки без воздействия ПРМП, установленные предварительно по стрелочным приборам, составляли для  $d_3 = 4$  мм:  $I_n = 500 \dots 520$  А;  $U_d = 28 \dots 30$  В; для  $d_3 = 5$  мм:  $I_n = 700 \dots 750$  А;  $U_d = 30 \dots 32$  В, скорость наплавки  $v_n = 30$  м/ч. Во всех экспериментах измеренная продольная компонента индукции составляла  $B_z = 70 \dots 85$  мТл, расстояние от торца электрода до поверхности пластины  $\Delta = 5$  мм, для  $d_3 = 5$  мм вылет электрода  $H = 40$  мм, для  $d_3 = 4$  мм  $H = 35$  мм. Нижний торец соленоида, генерировавшего ПРМП, находился также на указанном расстоянии от наплавляемой пластины (соответственно 40 и 35 мм). По истечении 20...30 с процесса наплавки включали постоянное либо знакопеременное ПРМП частотой 50 Гц и продолжали процесс наплавки с записью параметров режима наплавки ( $I_n$ ,  $U_d$ ) в течение 20...30 с. На каждом режиме выполняли по 5...10 наплавов. Усредненные экспериментальные данные приведены в таблице.

В серии экспериментов № 1 выполняли наплавки проволокой Св-08А (ферромагнитный материал) диаметром 4 мм на пластину толщиной

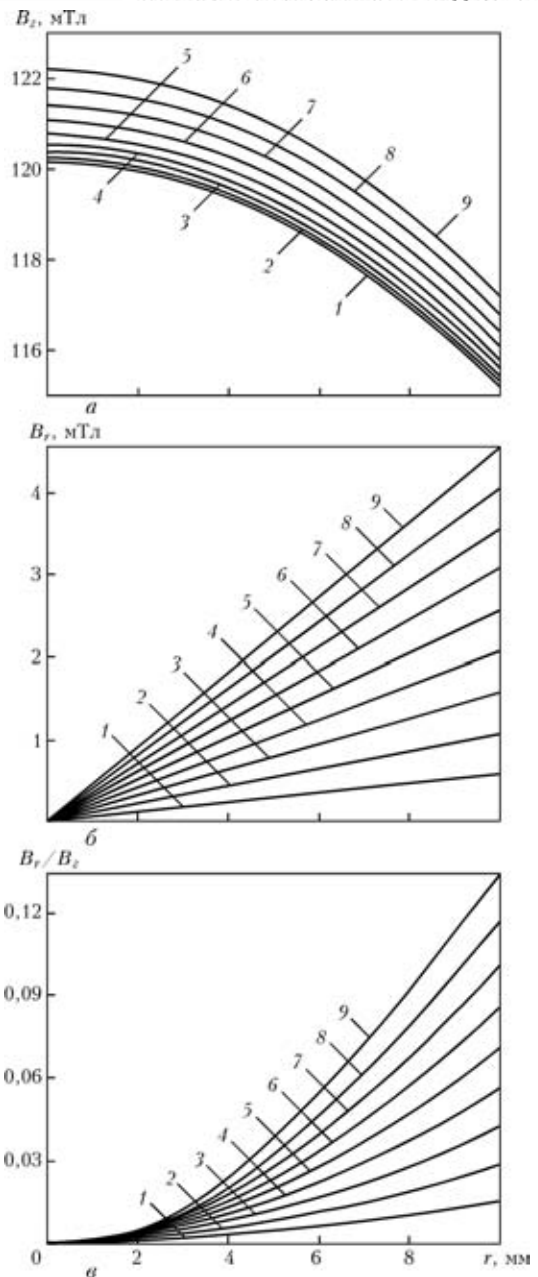


Рис. 3. Распределение компонент индукции  $B_z$  (а),  $B_r$  (б) и отношения  $B_r/B_z$  (в) вдоль оси  $r$  (послойно при различных  $Z$ ) для случая, когда проволока немагнитная ( $\mu = 1$ ), а изделие — ферромагнетик ( $\mu = 500$ ); обозначение кривых 1–9 см. на рис. 2

**Условия выполнения экспериментальных наплавов с различным коэффициентом расплавления электрода**

Номер серии эксперимента	Диаметр проволоки, мм	Сварочная проволока	Основной металл	Частота ПРМП, Гц	Повышение $\alpha_p$ , %
1	4	Св-08А	09Г2С	Постоянная ПРМП	30,3
2	4	Св-12Х18Н10Т	09Г2С	» »	0
3	4	Св-08А	12Х18Н10Т	» »	34,5
4	4	Св-08А	09Г2С	50	22
5	4	Св-12Х18Н10Т	09Г2С	50	0
6	5	Св-08А	09Г2С	Постоянная ПРМП	32
7	5	Св-08А	09Г2С	50	18,1
8	5	Св-12Х18Н10Т	09Г2С	Постоянная ПРМП	0

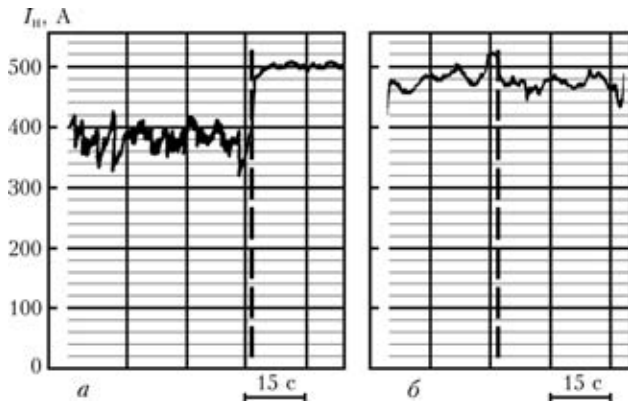


Рис. 4. Диаграммы тока при дуговой наплавке под флюсом ферромагнитной проволокой Sv-08A (а) и немагнитной проволокой Sv-12X18N10T (б): участки справа — наплавка без воздействия ПРМП; слева — с воздействием ПРМП

20 мм из стали 09Г2С (также ферромагнитный материал). При включении постоянного ПРМП происходило уменьшение тока наплавки  $I_n$  (рис. 4, а) и увеличение напряжения на дуге  $U_d$ . Данные показали, что уменьшение  $\Delta I_n / I_n$  (а следовательно, и повышение  $\alpha_p$ ) в этом случае составляет 30,3 %, что соответствует данным работ [1, 2].

При наплавке с использованием немагнитной проволоки Sv-12X18N10T диаметром 4 мм (серия № 2, таблица) включение постоянного ПРМП не привело к уменьшению тока наплавки, т. е.  $\Delta I_n = 0$  (рис. 4, б), и повышение  $\alpha_p$  электрода не происходило.

При наплавке с использованием проволоки Sv-08A диаметром 4 мм на пластину из немагнитной стали 12X18N10T (серия № 3, таблица) при включении постоянного ПРМП происходило уменьшение  $\Delta I_n / I_n$  на 34,5 % (а следовательно, увеличение  $\alpha_p$ ). Эффект повышения  $\alpha_p$  электрода при воздействии ПРМП в этом случае не меньше, чем в серии № 2 экспериментов, поскольку соотношение компонент индукции  $B_r / B_z$  (рис. 5) не меньше, чем для случая, когда изделие изготовлено из ферромагнитной стали (см. рис. 2).

Эксперименты показывают, что если сварочная проволока из немагнитного материала и компонента  $B_r$  индукции ПРМП в зоне расположения электродной капли равна нулю, то при воздействии ПРМП эффекта повышения  $\alpha_p$  электрода не наблюдается. При плавлении электрода из ферромагнитного материала, когда компонента  $B_r$  индукции ПРМП значительна, происходит увеличение  $\alpha_p$  электрода. Таким образом, подтверждается высказанное предположение о том, что вращение капли на торце плавящегося электрода в условиях ПРМП (а следовательно, улучшение условий передачи тепла дуги через каплю и повышение  $\alpha_p$ ) происходит под действием электромагнитных сил в капле от взаимодействия радиальной составляющей индукции ПРМП (в капле) с осевой (вдоль

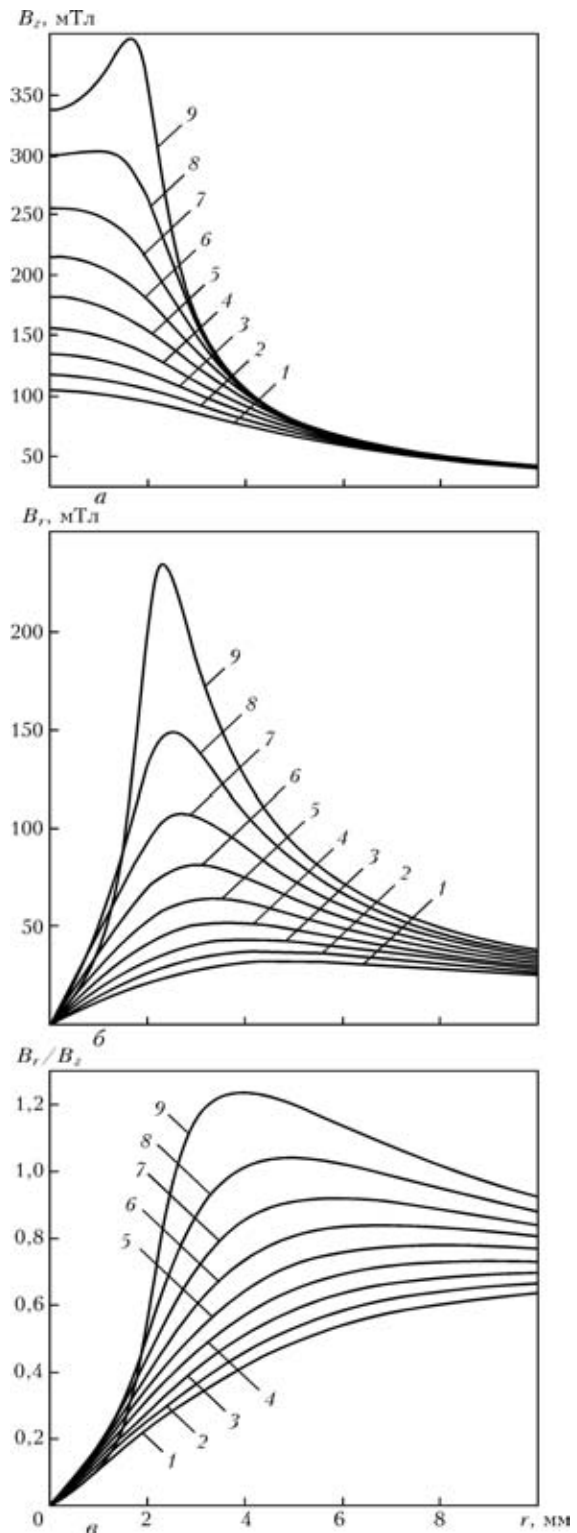


Рис. 5. Распределение компонент индукции  $B_z$  (а),  $B_r$  (б) и отношения  $B_r / B_z$  (в) вдоль оси  $r$  (последно при различных  $Z$ ) для случая, когда проволока — ферромагнетик ( $\mu = 500$ ), а изделие из немагнитного материала ( $\mu = 1$ ); обозначение кривых 1–9 см. на рис. 2;  $I_w = 2700$  А

оси электрода) составляющей плотности тока, растекающегося в капле.

Наплавки выполняли проволокой Sv-08A диаметром 4 мм на пластину из стали 09Г2С с воздействием ПРМП частотой 50 Гц ( $B_z = 85 \dots 89$  мТл).



В этом случае также имело место уменьшение тока наплавки (22 %, серия № 4, таблица), а при наплавке проволокой Св-12Х18Н10Т диаметром 4 мм на сталь 09Г2С при воздействии ПРМП частотой 50 Гц изменений  $I_n(\alpha_p)$  не произошло (серия № 5, таблица). Аналогичные эффекты наблюдали и при наплавке проволокой диаметром 5 мм (серии № 6–8, таблица).

Таким образом, в процессе дуговой наплавки постоянным током под флюсом при воздействии постоянного ПРМП происходит уменьшение толщины капли в направлении оси электрода, улучшение условий теплопередачи через каплю, обусловленное вращением капли под действием электромагнитных сил от взаимодействия радиальной компоненты индукции ПРМП с осевой компонентой плотности тока в капле. В этом состоит отличие результатов настоящей работы от данных работ [2, 3], в которых полагали, что электромагнитные силы при наплавке в условиях постоянного ПРМП образуются от взаимодействия продольной компоненты индукции ПРМП с радиальной плотностью тока в капле. Установлено, что в отличие от данных, приведенных в работе [2], знакопеременное ПРМП частотой 50 Гц также повышает  $\alpha_p$  электрода диаметром 4 и 5 мм, однако в меньшей степени, чем постоянное ПРМП. Кроме того, эффект повышения  $\alpha_p$  электрода зависит от магнитной проницаемости материала электрода и можно полагать, что при воздействии ПРМП будет пропорционален увеличению значения  $\mu$  электрода.

Необходимо также исследовать эффект возрастания  $\alpha_p$  при воздействии знакопеременного ПРМП частотой до 50 Гц. Аналогичные исследования необходимо выполнить и для прямой полярности процесса наплавки под флюсом с воздействием ПРМП.

## Выводы

1. Применение электродной проволоки из ферромагнитного материала приводит к значительной радиальной компоненте индукции в капле, что обуславливает искажение структуры магнитного поля в области под торцом электрода. При использовании электродов из немагнитных материалов радиальная компонента индукции ПРМП  $B_r$  незначительная.

2. Вращение капель электродного металла на торце электрода при дуговой сварке и наплавке с воздействием ПРМП и связанное с этим увеличение  $\alpha_p$  электрода обусловлено электромагнит-

ными силами в жидком металле капли от взаимодействия радиальной (а не продольной) компоненты индукции ПРМП с осевой (а не радиальной) компонентой плотности сварочного тока в капле.

3. Увеличение коэффициента расплавления электрода происходит при воздействии постоянного ПРМП, а также ПРМП частотой 50 Гц при наплавке ферромагнитной проволокой на изделия из ферромагнитных и немагнитных материалов. При наплавке в ПРМП проволоками из немагнитных материалов увеличение коэффициента расплавления электрода не наблюдается.

1. Болдырев А. М., Биржев В. А., Черных А. В. Повышение производительности расплавления электродной проволоки при сварке в продольном магнитном поле // Свароч. пр-во. — 1989. — № 4. — С. 18–19.
2. Биржев В. А. Теоретические и технологические основы повышения производительности дуговой сварки и наплавки во внешнем аксиальном магнитном поле: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Липецк, 1997. — 37 с.
3. Болдырев А. М., Биржев В. А., Черных А. В. Особенности плавления электродного металла при сварке во внешнем продольном магнитном поле // Свароч. пр-во. — 1991. — № 5. — С. 28–30.
4. Пацкевич И. Р., Зернов А. В., Серафимов В. С. Влияние продольного магнитного поля на плавление и перенос электродного металла // Там же. — 1973. — № 7. — С. 8–10.
5. Поведение дуги и перенос электродного металла при сварке в продольном магнитном поле / В. Д. Кузнецов, И. В. Малинкин, В. В. Сыроватка и др. // Там же. — 1972. — № 4. — С. 3–4.
6. Походня И. К., Костенко Б. А. Плавление электродного металла и взаимодействие его со шлаком при сварке под флюсом // Автомат. сварка. — 1965. — № 10. — С. 16–22.
7. Воропай Н. М., Колесниченко А. Ф., Лунькова О. Н. Электромагнитные силы в каплях при оплавлении цилиндрического электрода дугой // Техн. электродинамика. — 1982. — № 6. — С. 11–15.
8. Численный метод определения свободной поверхности капель электродного металла при его переносе в магнитном поле сварочных дуг / А. Ф. Колесниченко, Н. М. Воропай, О. Н. Лунькова и др. // Магн. гидродинамика. — 1977. — № 3. — С. 121–126.
9. Березовский Б. М., Судник В. А. Математическое моделирование образования капли на торце плавящегося электрода при дуговой сварке // Сварка — контроль. Итоги XX века: Материалы 19-й науч.-техн. конф. Сварщиков Урала. — Челябинск: ЗАО «МТ», 2000. — С. 24–27.
10. Лазаренко М. А., Размышляев А. Д., Чичкарев Е. А. Расчет на ЭВМ управляющих магнитных полей для процессов сварки и наплавки // Вестн. Приазов. гос. техн. ун-та. — 1999. — Вып. 8. — С. 147–150.
11. Размышляев А. Д., Дели А. А., Миронова М. В. Расчет индукции управляющего продольного магнитного поля с учетом магнитных свойств сердечника, проволоки и изделия применительно к дуговой наплавке // Автомат. сварка. — 2006. — № 8. — С. 12–15.

Causes of increase in productivity of the process of electrode melting in submerged-arc cladding at a reverse-polarity current in the longitudinal magnetic field (LMF) were checked. It is shown that the effect of increase in the coefficient of melting of electrode wire depends upon its magnetic properties and shows up not only in the case of permanent LMF, but also in the case of the alternating one at a frequency of 50 Hz.

Поступила в редакцию 01.11.2006



## ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАРОПРОВОДОВ ТЭС С УЧЕТОМ ВОДОРОДНОЙ ДЕГРАДАЦИИ ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО МЕТАЛЛА\*

Г. Н. НИКИФОРЧИН, О. З. СТУДЕНТ, доктора техн. наук  
(Физико-механический ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины),

С. М. СТЕПАНЮК, канд. техн. наук, А. Д. МАРКОВ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Потерю трудоспособности деградированного металла оценивали из разных зон эксплуатируемого ( $\sim 2 \cdot 10^5$  ч) и модельного (ремонтного) сварных соединений паропроводов острого пара ТЭС. Установлено, что текущее состояние эксплуатируемого основного металла можно оценивать лишь по локальным (кратковременная трещиностойкость), а металла шва, кроме того, еще и по интегральным (прочность, пластичность, твердость) механическим показателям. Показано, что механические свойства металла шва при эксплуатации ухудшаются интенсивнее по сравнению с основным металлом. Рекомендовано учитывать выявленные особенности деградации металла сварных соединений при оценке текущего состояния металла шва и определении остаточного ресурса сварных конструкций.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, паропровод ТЭС, деградация металла, водородное охрупчивание, сварное соединение, металл шва, кратковременная трещиностойкость, интегральные механические характеристики

Для Украины в настоящее время оценка работоспособности теплоэнергетического оборудования особенно важна. Во-первых, по состоянию на конец 2005 г. количество блоков ТЭС со сроком эксплуатации свыше 30 лет составило около 80 % [1], поэтому для обоснования периодичности их обследований и возможности дальнейшей эксплуатации необходимо достоверно оценить текущее состояние деградированного в эксплуатационных условиях металла. Во-вторых, при монтаже любых крупногабаритных объектов нельзя обойтись без сварных соединений (СС), а статистика эксплуатационных повреждений свидетельствует, что именно они часто оказываются наиболее уязвимым звеном конструкций.

Методология оценки текущего состояния эксплуатируемого металла должна учитывать наибольшее количество факторов, которые влияют на его работоспособность. Это прежде всего влияние остановок и запусков оборудования при работе блоков ТЭС, что сопровождается нагревом и охлаждением элементов конструкций с соответствующим возникновением термических напряжений. Вместе с рабочими напряжениями они могут достигать сверхкритического уровня [2–4]. Кроме то-

го, в СС крупногабаритных конструкций не всегда можно избежать микродефектов. При одновременном влиянии высоких напряжений и технологических сред (пара или воды высоких температуры и давления) они могут превращаться в макротрещины [5]. Результаты исследований свойств эксплуатируемого металла (свыше  $2 \cdot 10^5$  ч) свидетельствуют, что разрушение паропроводов часто возникает даже вопреки сохранению на удовлетворительном уровне характеристик прочности и ударной вязкости [3, 4]. Поскольку причиной является значительное снижение трещиностойкости [6–9], то в первую очередь именно этот фактор следует учитывать при определении работоспособности паропроводов. Эксплуатация их при температуре  $540^\circ\text{C}$  и давлении пара до 22 МПа, а также расположение вне границ котла делает сквозные повреждения паропроводов особо опасными для персонала. Периодический ультразвуковой контроль СС позволяет обнаруживать и устранять поврежденные участки. Вследствие макронеоднородности структуры и химического состава металл СС особенно уязвимым к совместному продолжительному влиянию высокотемпературной среды и нагрузкам [3]. Микропустоты в металле шва (МШ) [2] и структурные дефекты являются энергетически удобными ловушками для локализации водорода, который попадает в металл во время сварочных работ [6], а также из технологической среды [4]. Известно [4], что локальная концентрация водорода вблизи поверхностей изломов из поврежденных в процессе эксплуатации элементов паропроводов на порядок выше средней концентрации в деградированном

\* Статья подготовлена по результатам выполнения целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» (2004–2006 гг.).

Химический состав металла из разных зон ремонтного и эксплуатируемого СС, %

Металл СС	C	Cr	Mo	V	Ni	Mn	Si	Cu	S	P	Ti	Al	Co
Эксплуатируемый:													
МШ	0,050	1,06	0,68	0,20	0,18	1,09	0,344	0,21	0,016	0,031	0,002	0,0122	0,016
ОМ	0,154	1,33	1,02	0,26	0,17	0,59	0,423	0,20	0,011	0,021	0,002	0,0167	0,015
Ремонтный:													
неэксплуатируемый ОМ	0,157	1,39	0,97	0,29	0,20	0,91	0,296	0,22	0,017	0,021	0,001	0,0114	0,017
эксплуатируемый ОМ	0,136	1,33	1,02	0,25	0,12	0,75	0,285	0,02	0,012	0,027	0,003	0,0440	0,009
неэксплуатированный МШ	0,090	1,13	0,57	0,19	0,07	0,69	0,184	0,10	0,009	0,021	0,030	0,0113	0,010

металле, что свидетельствует о необходимости учета водородного фактора при развитии повреждения металла.

Целью настоящей работы является оценка механических свойств металла из разных зон СС после эксплуатации на паропроводе ТЭС и сравнение эксплуатируемого и неэксплуатируемого металла относительно склонности к водородному охрупчиванию.

**Объект и методики исследований.** Исследован металл из разных зон СС труб из стали 15Х1М1Ф, внешний диаметр и толщина стенки которых составляли соответственно 325 и 60 мм. Одно СС вырезали из паропровода ТЭС после эксплуатации в течение  $19 \cdot 10^4$  ч, другое — из неэксплуатируемого (ремонтного) СС. Оба СС были получены многопроходной электродуговой сваркой с соблюдением технологического регламента на ведение соответствующих работ. Ремонтным СС моделировали замену поврежденного участка трубы на неэксплуатируемую трубу. В этом СС с одной стороны был эксплуатируемый основной металл (ОМ), а с другой — неэксплуатируемый ОМ. МШ такого СС не эксплуатировался, поэтому условно его считали как МШ в исходном состоянии и сравнивали его свойства с МШ после эксплуатации. Химический состав ОМ и МШ, эксплуатируемого и неэксплуатируемого СС, приведен в таблице.

Состояние металла оценивали по показателям, предусмотренным действующими нормативными документами (твердость *HRB*, характеристики прочности и пластичности), а также статической трещиностойкости. Гладкие цилиндрические образцы диаметром рабочей части 3 мм, ориентированные поперек стенки трубы, растягивали на машине УМЕ-10ТМ при скорости перемещения активного зажима  $3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Образцы предварительно электролитически наводороживали в электролите (5%-й раствор  $\text{H}_2\text{SO}_4$  в воде с добавлением 0,05 % тиосульфата натрия) в течение 15 мин при плотности тока  $0,05 \text{ А/см}^2$ . Одну часть нагружали до разрушения при условии наводороживания, а другую — без наводороживания на воздухе. Статическую трещиностойкость при ак-

тивной нагрузке (критическое значение *J*-интеграла  $J_{Ic}$ ) оценивали в соответствии с требованиями [7] на одном образце, многократно частично разгружая его. Фрактографические исследования изломов образцов после испытаний проводили на сканирующем микроскопе.

**Результаты и их обсуждение.** В исходном состоянии твердость МШ ремонтного СС выше твердости ОМ (рис. 1), что удовлетворяет требованиям действующих нормативных документов. Поскольку твердость исследуемого СС из эксплуатируемого паропровода перед эксплуатацией неизвестна, предполагали, что она одного порядка с твердостью ремонтного СС и выше твердости ОМ.

После продолжительной эксплуатации твердость ОМ с обеих сторон СС почти не изменилась, что указывает на низкую чувствительность интегральных механических характеристик прочности и твердости к деградации низколегированных теплостойких сталей [8]. Вместе с тем зафиксировано существенное уменьшение твердости МШ (приблизительно от *HRB* 100 в исходном состоянии против *HRB* 75 после эксплуатации). Это дает основания утверждать, что такой интегральный показатель, как твердость является достаточно чувствительным к высокотемпературной деградации, лишь когда она происходит с высокой интенсивностью во времени и достигает уровня твердости эксплуатируемого МШ, т. е. становится уже недопустимо ниже твердости ОМ. Полученные ре-

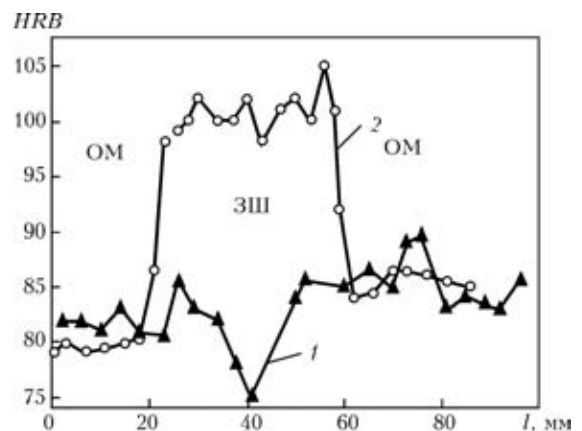


Рис. 1. Твердость *HRB* поперек эксплуатируемого (1) и неэксплуатируемого (2) СС

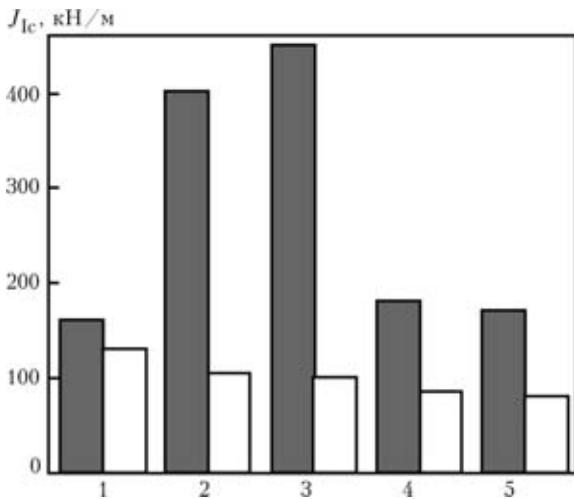


Рис. 2. Трещиностойкость  $J_{1c}$  эксплуатируемого (светлые столбики) и неэксплуатируемого (темные) металла из разных зон СС: 1, 5 — ОМ по разные стороны ремонтного (1 — эксплуатируемый, 5 — неэксплуатируемый) и эксплуатируемого СС; 2, 4 — ЗТВ; 3 — МШ

зультаты также свидетельствуют о том, что именно МШ (сравнительно с ОМ) является особенно чувствительным к высокотемпературной деградации.

В ходе исследований кратковременной трещиностойкости разных зон СС [9], включая зону термического влияния (ЗТВ), установлено (рис. 2), что МШ и ЗТВ в ремонтном СС со стороны неэксплуатируемого ОМ имеют наибольшие значения  $J_{1c}$  по сравнению с ОМ и ЗТВ со стороны эксплуатируемого металла. Следовательно, МШ перед эксплуатацией имеет наилучшие свойства не только по твердости, но и по трещиностойкости, которая во всех зонах эксплуатируемого СС является более низкой по сравнению с ре-

монтным СС. Однако максимальное ее уменьшение зафиксировано именно для МШ, что согласуется с результатами измерения твердости и подтверждает, что именно МШ присуща наивысшая склонность к деградации во время продолжительной эксплуатации.

Таким образом, вследствие деградации МШ в эксплуатационных условиях снижаются и твердость, и кратковременная трещиностойкость. Если предположить, что прочность (твердость, как обычно, коррелирует с прочностью) характеризует сопротивление вязкому, а трещиностойкость — сопротивление хрупкому разрушению, то зафиксированное снижение твердости эксплуатируемого МШ свидетельствует о его малом сопротивлении вязкому, а трещиностойкость — хрупкому разрушению. Следовательно, более интенсивная деградация МШ при эксплуатации может облегчать разрушение сварных конструктивных элементов как по вязкому, так и хрупкому механизмам.

Более интенсивную деградацию МШ подтверждают также фрактографические исследования изломов образцов, испытанных на трещиностойкость [9]. Образование (старт) трещины в МШ ремонтного и эксплуатируемого СС происходит по вязкому механизму путем образования, роста и объединения микропустот. Напротив рельефность деталей излома в эксплуатируемом МШ существенно меньше, а количество элементов скола и вторичного растрескивания с увеличением трещины возрастает (рис. 3, б, в). Все это признаки уменьшения энергозатрат на разрушение, которые согласуются с результатами испытаний на трещиностойкость.

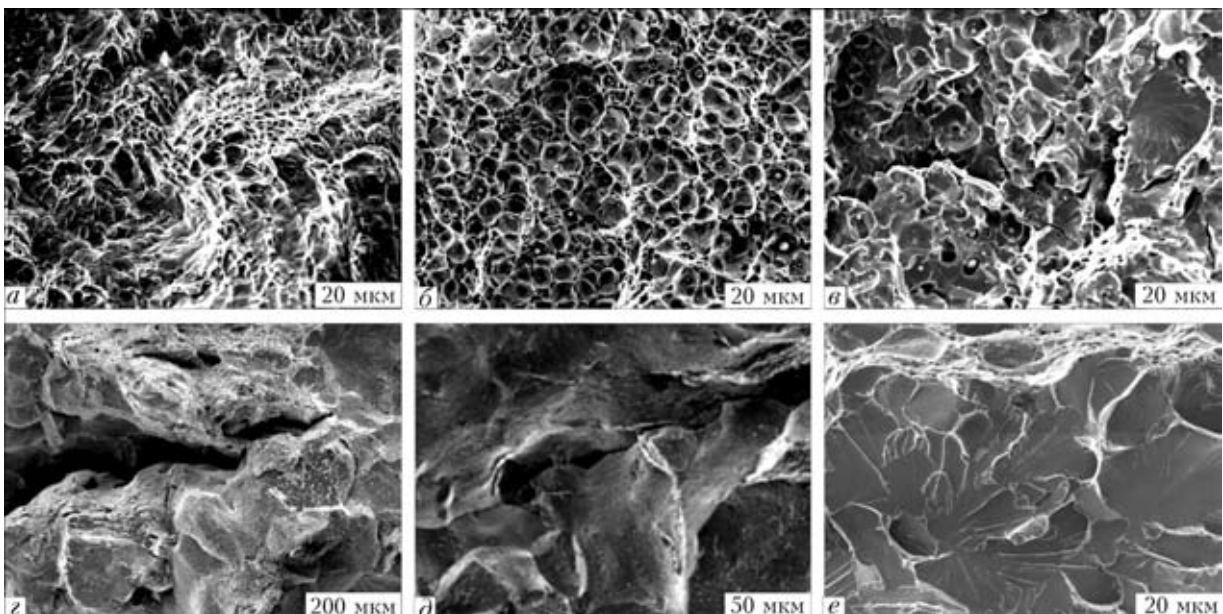


Рис. 3. Фрактографические особенности изломов после испытаний на статическую трещиностойкость МШ (а-в), ЗТВ (с, д), ОМ (е): а, с — ремонтное СС; б-е — эксплуатируемое СС



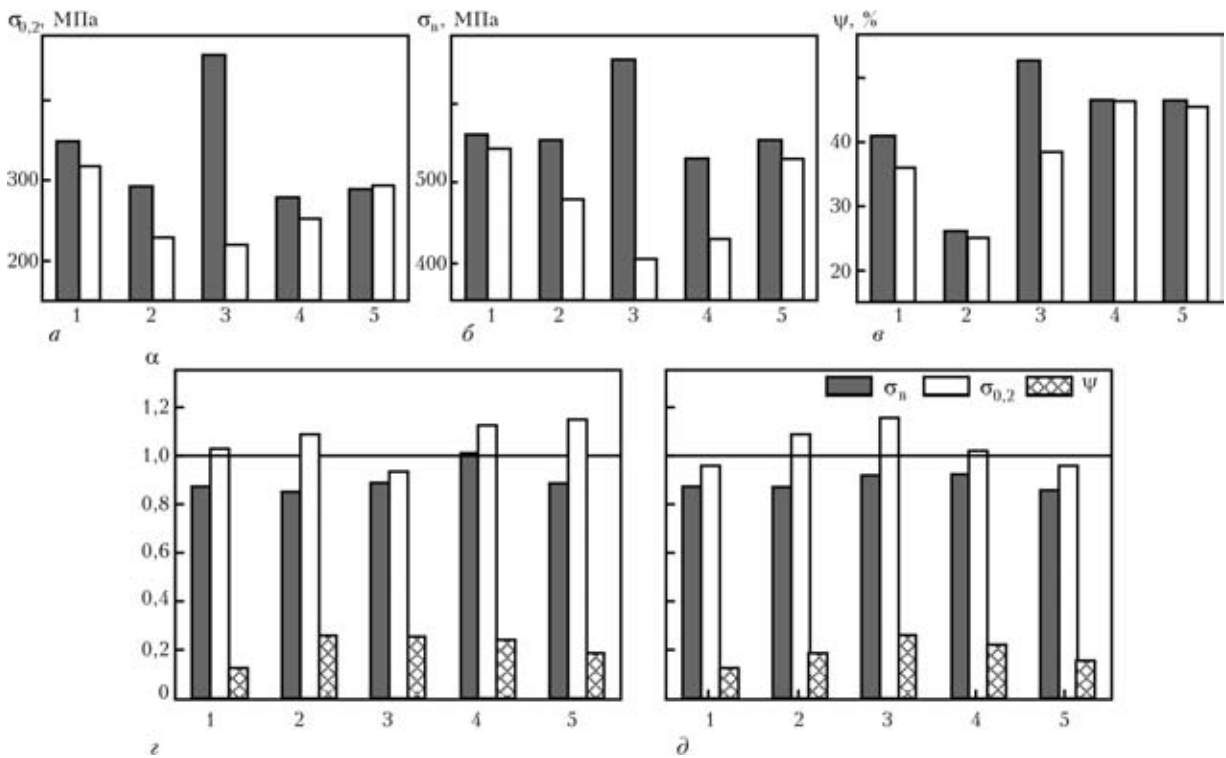


Рис. 4. Механические свойства металла из разных зон ремонтного (темные столбики) и эксплуатируемого (светлые) СС при испытаниях на воздухе (а–в) и сравнение механических свойств разных зон ремонтного (з) и эксплуатируемого (д) СС по коэффициенту влияния наводороживания  $\alpha$ , как соотношение соответствующих показателей для наводороженного и ненаводороженного металла (обозначение 1–5 зон СС см. на рис. 2)

Для обоих СС (в ремонтном СС со стороны эксплуатируемого ОМ) старт трещины в ЗТВ происходит также на основе вязкого механизма с образованием характерной зоны вытягивания. Тем не менее после незначительного роста трещины разрушение происходит межзеренно с глубокими вторичными микротрещинами (рис. 3, з, д). Большие конгломераты зерен формируют грубый рельеф, а на межзеренных фасетках идентифицируются следы локальной пластической деформации в виде гребней отрыва.

Классический вязкий излом в неэксплуатируемом ОМ изменяется на классический механизм скаса с образованием веерообразных рельефов на фасетках сколов в эксплуатируемом (рис. 3, е). Последнее вместе с фрактографическими особенностями разрушения ЗТВ свидетельствует о наиболее низких энергозатратах на разрушение, что, вероятно, связано не только с деградацией металла, но и с влиянием водорода, который накопился в нем при эксплуатации.

По результатам испытаний на воздухе гладких образцов, вырезанных из разных зон ремонтного и эксплуатируемого СС, установлено, что характеристики прочности  $\sigma_{0.2}$ ,  $\sigma_b$  и пластичности  $\psi$  в ОМ после эксплуатации остаются практически неизменными (рис. 4, а–в), что согласуется с результатами [8] о слабой чувствительности интегральных показателей работоспособности к изменению состояния металла вследствие деградации

в эксплуатационных условиях. После эксплуатации характеристики прочности металла ЗТВ немного уменьшаются. Однако больше всего снижаются характеристики прочности и пластичности именно для МШ ( $\sigma_{0.2}$  — на 53 %,  $\sigma_b$  — на 37 % и у  $\psi$  — на 28 %). Причем, если прочность МШ в исходном состоянии выше, чем для ОМ, и удовлетворяет технологическим требованиям сварочных работ, то после эксплуатации характеристики прочности МШ ниже значений ОМ, что делает их дальнейшую эксплуатацию не допустимой. Эти результаты согласуются с данными измерений твердости СС, поэтому можно утверждать, что в отличие от ОМ характеристики прочности МШ более чувствительны к высокотемпературной водородной деградации. Кроме того, они также подтверждают более интенсивную деградацию МШ по сравнению с другими зонами СС.

Влияние наводороживания на свойства металла из разных зон ремонтного (рис. 4, з) и эксплуатируемого (рис. 4, д) СС оценивали по коэффициенту  $\alpha$ , который характеризует относительное изменение соответствующих показателей прочности и пластичности в течение электролитического наводороживания, а также на воздухе. Наводороживание несколько снижает границу прочности металла практически у всех зон и ремонтного, и эксплуатируемого СС. И наоборот, после наводороживания граница текучести  $\sigma_{0.2}$  металла в большинстве зон СС несколько повы-

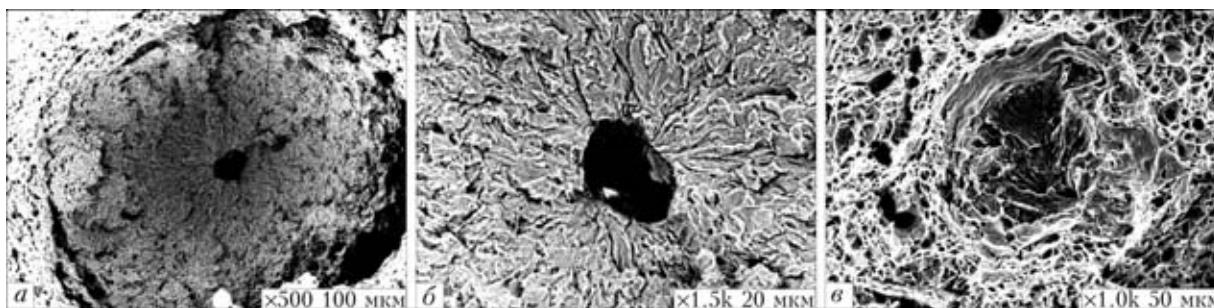


Рис. 5. Фрактографические особенности изломов после растяжения на воздухе предварительно наводороженных гладких образцов, вырезанных из зоны сварки (а, б) и (е)

шается. Не обнаружено влияния наводороживания лишь на уровень  $\sigma_{0,2}$  МШ ремонтного СС (рис. 4, з) и ОМ эксплуатируемого СС (рис. 4, д). Только относительное сужение  $\psi$  для всех зон без исключения и в эксплуатируемом, и в ремонтном СС под влиянием наводороживания извне однозначное и существенно снижается. Отметим, что вследствие наводороживания относительное изменение интегральных показателей прочности и пластичности является практически величиной одного порядка для соответствующих зон эксплуатируемого и ремонтного СС. Таким образом, по изменению коэффициента  $\alpha$  практически нельзя оценить изменение состояния деградированного металла, что обусловлено электролитическим наводороживанием образцов как перед, так и во время испытания. Это обеспечило влияние водорода и в зоне объемного растяжения в центральной части разреза образца (внутренний водород), и со стороны образующей поверхности образца (внешний водород).

Возможно при используемом режиме наводороживания энергозатраты на зарождение локальных повреждений от образующей поверхности образцов из эксплуатируемого и неэксплуатируемого металла практически не отличаются, поскольку стимулируется разрушение от поверхности образцов практически идентичными потоками водорода вдоль линий скольжения. Фрактографический анализ (рис. 5) изломов образцов при электролитическом наводороживании подтверждает, что практически во всех случаях (независимо от того, из какой зоны СС взят металл) наблюдалось много локальных зародышей разрушения от боковой поверхности образцов, которые в процессе растяжения сливались между собой путем вязущего разрушения перегородок между ними. В сердцевине излома несмотря на вязкие элементы ямочного рельефа кое-где встречаются хрупкие участки в виде круга с большой ямкой по центру и характерной радиальной ориентацией гребней отрыва, которые разделяют участки локальных сколов в параллельных, но удаленных в пространстве плоскостях (рис. 5, а). Эти элементы могут быть проявлением внутреннего водорода, который,

мигрируя в область объемно-напряженного состояния, молизируется на дефектах, создает высокое давление, которое приводит к таким локальным разрушениям.

Для проверки этой гипотезы исследовали поверхности изломов образцов из разных зон СС, испытанных после предварительного электролитического наводороживания, но на воздухе. При этом исключили попадание водорода в металл вдоль полос скольжения и имели влияние лишь внутреннего водорода. Результаты наблюдений подтвердили, что вопреки макровязкому характеру излома типа чашка–конус в его центральной части наблюдали на фоне типичного ямочного рельефа разные по размеру практически круглые участки скольного характера с отверстиями по центру (рис. 5, б, в). Поскольку в ненасыщенном водородом металле такого не наблюдали, то логично предположить, что эти элементы излома являются проявлением внутреннего водорода. Причем их количество было большим, но по размерам они меньше, чем при совместном влиянии внешнего и внутреннего водорода. Кроме того, эти особенности рельефа в неэксплуатируемом металле следует рассматривать как исключения, тогда как в эксплуатируемом они доминируют, а значит, их площадь могла бы служить количественным фрактографическим показателем состояния деградированного металла.

Таким образом, продолжительная высокотемпературная эксплуатация СС при действии наводороженной среды приводит к деградации металла всех зон СС. При этом существенно снижаются интегральные характеристики прочности, пластичности и твердости МШ, которые для металла из других зон СС остаются практически неизменными. Кратковременная трещиностойкость позволяет оценить уровень деградации всех зон СС, однако максимальное ее снижение обнаружили для МШ. Наиболее высокая чувствительность к водородному охрупчиванию металла зафиксирована по показателю относительного сужения образцов. Фрактографически деградация металла всех зон СС представляет собой низкоэнергетическое межзеренное или скольное разрушение, что согласуется со снижением статической тре-

щиностойкости — локального показателя состояния деградированного в эксплуатационных условиях металла. Показана перспектива фрактографической оценки состояния деградированного металла по площади локальных сколов в зоне действия объемных напряжений, вызванных внутренним водородом.

1. *Забара Ю.* Вихід завжди є // Обрій ПБ. — 2002. — 82, № 24.
2. *Карзов Г. П., Леонов В. П., Тимофеев Б. Т.* Сварные сосуды высокого давления. — Л.: Машиностроение, 1982. — 287 с.
3. *Бугай Н. В., Мухонад Г. В., Красовский А. Я.* Повышение надежности котлов электростанций. — Киев: Техніка, 1986. — 176 с.
4. *Вайнман А. Б., Мелехов Р. К., Смян О. Д.* Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления. — Киев: Наук. думка, 1990. — 272 с.
5. *Колачев Б. А.* Водородная хрупкость металлов. — М.: Металлургия, 1985. — 217 с.
6. *Походня И. К.* Проблемы сварки высокопрочных низколегированных сталей // Сучасне матеріалознавство ХХІ століття. — Киев: Наук. думка, 1998. — С. 31–69.
7. *Влияние длительного термомеханического воздействия на трещиностойкость стали 12Х1МФ / О. Н. Романив, А. Н. Ткач, И. Р. Дзьоба и др. // Физ.-хим. механика материалов. — 1989. — № 2. — С. 87–92.*
8. *Студент О. З., Лонюк Б. П.* Ріст утомних тріщин у сталі 15Х2МФА, витриманій у високотемпературному водні // Физ.-хим. механика матеріалів. — 1997. — 33, № 4. — С. 121–126.
9. *Деградація зварних з'єднань парогонів теплоелектростанцій у наводнювальному середовищі / Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, І. Р. Дзьоба та ін. // Там же. — 2004. — 40, № 6. — С. 105–110.*

Loss of service properties of degraded metal was evaluated from different zones of the operating ( $\sim 2 \cdot 10^5$  h) and model (repair) welded joints of HPS live steam lines. It is established that the current condition of the base metal in operation can be evaluated only by local (short-term crack resistance), and that of the weld metal also by integral (strength, ductility, hardness) mechanical indices. It is shown that the mechanical properties of the weld metal deteriorate more intensively in operation, compared to the base metal. It is recommended to allow for the revealed features of degradation of the welded joint metal at evaluation of the current condition of the weld metal and determination of the residual life of welded structures.

Поступила в редакцию 26.01.2007

## ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЙ ПЕРЕПЛАВ СТАБИЛЬНО АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ КРИОГЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*В ИЭС им. Е. О. Патона совместно с Челябинметзаводом (ЧМЗ) была разработана технология ЭШП сверхнизкоуглеродистой стали 03Х20Н16АГ6 в кристаллизатор диаметром 425 мм. Для ЭШП использовали квадратные электроды сечением 220×255 мм и специальные флюсы. По данной технологии на ЧМЗ было выполнено около 100 плавок.*

*Разработанная технология ЭШП стали 03Х20Н16АГ6 с участием ИЭС освоена на НКМЗ и заводе «Днепроспецсталь». На НКМЗ использовали кристаллизаторы диаметром 800...850, 880...950, 1100...1150, 1200...1240 мм в печах ЭШП-10Г и ЭШП-150. При этом масса слитков ЭШП была в пределах 4,5...5,0 т. На заводе «Днепроспецсталь» с участием ИЭС разработаны и освоены технологии выплавки стали 03Х20Н16АГ6 в 60-тонном агрегате и ЭШП листовых слитков массой 12,5 т по бифилярной схеме.*

*Прокатка стали 03Х20Н16АГ6 на листы и плиты толщиной до 190 мм освоена на ОАО «Азовсталь», ковка на заготовки широкого сортамента — на НКМЗ.*

*Сталь 03Х20Н16АГ6 электрошлакового переплава характеризуется исключительно высокой пластичностью и ударной вязкостью при сверхнизких (вплоть до 4,2 К) температурах. Эта сталь предназначена для всех видов сварных конструкций, работающих в условиях криогенных и повышенных температур ( $\approx 900$  К), при радиационном облучении и импульсных нагрузках, в частности, несущие детали ротора криогенератора КТГ-2-4.*

*Технологии ЭШП и передела на листы, трубы и поковки сверхнизкоуглеродистой стабильно аустенитной стали 03Х20Н16АГ6 разработаны и освоены промышленностью Украины.*

**Контакты:** Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,  
03680, Киев-150, ул. Боженко, 11, отд. № 19.  
Академик НАНУ К. А. Ющенко, канд. техн. наук Л. В. Чекотило.





## ВТОРИЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СВАРНЫХ МОСТОВЫХ КРАНАХ

**О. А. ЕМЕЛЬЯНОВ**, канд. техн. наук (Донбасская гос. машиностроит. акад., г. Краматорск),  
**Р. Л. СЛАВИНСКИЙ**, инж. (ЗАО «Новокраматорский машиностроительный завод»),  
**Д. В. ЯРЕМЕНКО**, асп. (Харьковский политехн. ун-т)

Рассмотрено образование вторичных напряжений и их влияние на усталость сварных крановых мостов.

*Ключевые слова:* сварные мостовые краны, вторичные напряжения, места генерации, усталостная прочность, циклическая долговечность

Основной причиной непригодности кранов для дальнейшей эксплуатации являются усталостные повреждения металлоконструкции моста, происходящие только при действии переменных нагрузок. Крановая нагрузка — это все внешние силы, действующие на кран, главные из которых собственный вес и опорные реакции. Изменение нагрузки происходит в случае изменения весовых нагрузок или места их приложения, а также некоторых силовых и деформационных факторов.

Лаборатория технической диагностики Донбасской государственной машиностроительной академии с 1978 г. проводит исследования по совершенствованию сварных конструкций грузоподъемных машин. За это время проведена диагностика 1800 мостовых кранов. Установлено, что до 60 % обследованных машин имеют усталостные повреждения.

Целью настоящей работы является выяснение причин массовых усталостных повреждений «слабонагруженных» мест конструкций сварных крановых мостов.

Работу, которую выполняет кран, можно разделить на три периода: подъем-опускание груза, перемещение его тележкой и перемещение груза мостом крана вдоль пролета.

В первом периоде груз висит на крюке. При работе механизма подъема вес груза последовательно по цепочке барабан — опоры барабана — опоры редуктора и двигателя механизма подъема — рама грузовой тележки — колеса тележки — главные балки моста — концевые балки — колеса моста передается на подкрановые балки. Каждый из перечисленных выше узлов передает почти равную нагрузку от крюка на подкрановые балки, значение которой равно массе поднимаемого груза с учетом потерь на трение и т. п. Место передачи нагрузки на каждый узел и ее значение могут быть определены достаточно точно.

Во втором периоде груз, висящий на крюке, перемещается на тележке по главным балкам моста. Места передачи нагрузки на главные и концевые балки и усилия в каждом сечении могут быть точно определены по линиям влияния. Следовательно, в первом периоде переменность нагрузки получаем вследствие изменения силы натяжения в канатах подвески, во втором — при изменении положения тележки на главных балках.

Сопротивление усталости (циклическая долговечность) для сварных узлов кранового моста и его элементов в случае их работы в первом и втором периодах с достаточной для практики точностью может быть определено по методике (третий период), изложенной в СНиП 11-23-81 [1].

Далее (третий период) груз, висящий на крюке, перемещается при движении крана вдоль пролета, значение нагрузки и место ее приложения на конструкции не изменяется. Формально усталостные повреждения не должны происходить, однако в действительности они наблюдаются.

Обнаруженные особенности можно объяснить следующим образом. В третьем периоде электродвигатель привода механизма передвижения крана (или грузовой тележки) совершает работу, затрачиваемую на передвижение крана вдоль пролета и различные непроизводительные потери — деформацию и износ деталей, составляющих конструкции крана, образование вторичных напряжений и усталостных трещин и т. д. В этой ситуации переменность усилий в элементах моста может появиться, если работа непроизводительных потерь будет влиять на значение его опорных реакций, т. е. вертикальные и горизонтальные силы в контакте ходовое колесо — рельс. Эти силы, непрерывно изменяясь при качении колес, вызовут изменение усилий в деталях металлоконструкции моста и привода передвижения крана [2, 3], способствуя протеканию в них усталостных повреждений.

Следовательно, сопротивление усталости металлоконструкции кранов в третьем периоде зависит от непроизводительных потерь мощности

привода передвижения крана в процессе его движения вдоль пролета.

Потери определяются рациональностью схемно-конструктивного решения моста и конструктивного оформления его сварных узлов; точностью изготовления деталей, качеством сборки узлов; состоянием элементов подкранового пути и привода передвижения крана, а также нарушением правил безопасной эксплуатации.

На мостовом кране обычно устанавливаются механизмы приводов подъема, передвижения тележки и передвижения моста. КПД каждого привода зависит от условий выполняемой работы и особенностей оформления конструкции. Чем меньше деталей, элементов и кинематических пар механизма, крана и эстакады включается в ее выполнение, тем меньше непроизводительные потери энергии, вырабатываемой двигателем привода, и выше его КПД. Наиболее высокий КПД у механизма подъема, наиболее низкий — у привода передвижения крана.

В зависимости от КПД приводов при работе крана как в первом, так и втором периоде в результате потерь энергии, вырабатываемой двигателем, могут образоваться и поддерживаться колебательные процессы вторичных напряжений, способствуя протеканию усталостных повреждений в конструкции моста.

Практика эксплуатации сварных крановых мостов показывает, что усталостные повреждения в них образуются после 1...3 лет работы, т. е. значительно раньше, чем это регламентируется различными нормативами. Преждевременные трещины появляются в тех элементах, в которых они не ожидалась, и поэтому расчету на усталость не подвергались.

Усталостные трещины наблюдаются во всех типах сварных стальных пролетных строений, особенно в тех, где имеются приваренные к балкам ребра жесткости, фасонки и поперечные балки, а также различные вырезы для пропуска сварных швов.

Большинство крановых мостов, в которых наблюдаются трещины, подвержены циклическим нагрузкам, однако количество нагружений до момента образования трещин было небольшим. Дж. Фишер и Д. Мертц [4] считают, что образование таких трещин вызывается вторичными напряжениями, обусловленными деформацией пролетного строения моста и его отдельных элементов.

Практика эксплуатации подъемно-транспортных механизмов показывает, что проблема образования и влияния вторичных напряжений на циклическую долговечность крановых мостов является актуальной и требует своего решения.

Переменные нагрузки, действующие на кран и вызываемые ими усилия и напряжения в кон-

струкции моста, в зависимости от причин их образования целесообразно классифицировать на две группы: основные и вторичные.

Основными называются напряжения, которые вызываются увеличением или уменьшением усилий в элементах конструкции моста крана при изменении места установки тележки на главных балках моста, или усилия натяжки в подвеске от груза  $G_{гр}$ , поднимаемого или опускаемого краном.

Значение основных усилий в элементах моста и опорных реакций, уравнивающих весовые нагрузки, может изменяться при изменении усилия в подвеске механизма подъема в процессе его натяжения до отрыва груза от основания (или ослабления при укладке его на основание) или места установки тележки на главных балках моста.

Балки нагружаются поперечным изгибом, кручением и местным давлением, в них образуются основные усилия  $M$ ,  $Q$ ,  $M_p$ ,  $F$  и основные напряжения  $\sigma_x$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\sigma_{fy}$ ,  $\sigma_{loc, y}$  [1, п. 13, 14]. В некоторых случаях, кроме основных, могут образоваться и переменные вторичные напряжения, которые вызываются перемещениями вспомогательных элементов и конструкций моста (перильные фермы, тормозные площадки, площадки для обслуживания, лестницы, кабины и т. п.) при их вынужденных деформациях совместно с основными, несущими конструкциями, к которым они прикреплены электросваркой.

Под влиянием вторичных напряжений усталостные трещины появляются в основной несущей конструкции, уже нагруженной основными напряжениями, в местах крепления к ней различных вспомогательных конструктивных элементов.

Прикрепляемая сваркой вспомогательная деталь является дополнительным концентратором напряжений, в зоне которого добавляются остаточные напряжения от сварки и вторичные напряжения от нагрузки, действующей на вспомогательную деталь. Следовательно, появляется дополнительный очаг возможного образования усталостной трещины, но уже с учетом побочного влияния вторичных напряжений. Чем больше подобных участков, тем больше повреждений, которые в зависимости от обстоятельств могут появиться уже на ранней стадии эксплуатации моста, в слабонагруженных местах.

На рисунке показан пример образования усталостной трещины в основной несущей конструкции — нижнем поясе главной балки 1 моста крана, соединенного электросваркой с верхним поясом вспомогательной фермы 2 диагональным раскосом 3. Прогиб главной балки при наезде тележки с грузом вызывает растяжение раскоса 3 и совместный прогиб вспомогательной фермы 2. Растягивающее усилие раскоса 3 изгибает фасонку 4 и вызывает образование усталостных трещин

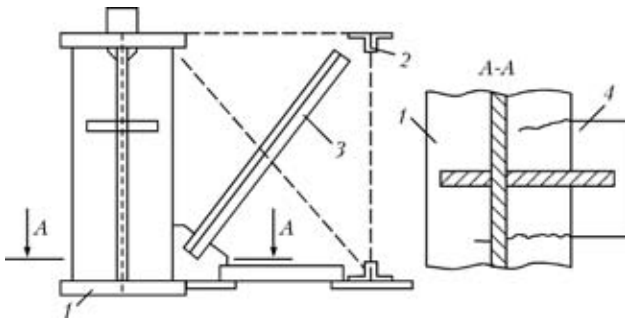


Схема образования трещины в нижнем поясе главной балки по краям горизонтальной фасонки, приваренной встык (обозначения см. в тексте)

в месте прикрепления фасонки к поясу главной балки.

Возможны и другие места образования вторичных напряжений на главных и концевых балках кранового моста. Это объясняется тем, что в зависимости от совершенства конструкции механизма привода передвижения крана и его фактического состояния часть энергии, вырабатываемой двигателем, расходуется на различные непроизводительные потери (деформацию и износ деталей, составляющих конструкцию, образование вторичных напряжений и усталостных трещин и т. п.).

Значение опорных реакций при движении мостового крана в основном зависит от обеспечения прямолинейности и равномерности движения крана (грузовой тележки) вдоль рельсового пути, а также от:

- значения и направления угла монтажного перекоса колеса относительно направления скорости движения крана;

- отклонения уровня головки рельса от его номинального значения по высоте, вблизи стыков и между колоннами в ряду;

- значения коэффициента трения в контакте колесо – рельс;

- пластического наволакивания металла на контактирующую поверхность колеса и рельса.

Из приведенного выше видно, что непосредственно для оценки сопротивления усталости эта информация непригодна, требуется создание методики, позволяющей определять место генерации, причину образования и влияние на долговечность работы крана вторичных напряжений в третьем периоде.

В инженерной практике справедливы два принципа: местная прочность (накладки, усиливающие ребра, бонки, местные утолщения или уширения элементов конструкции и т. п.) и местная непрочность (отверстия, люки, вырезы, входящие углы, местные утонения и сужения и т. п.), которые приводят к общей непрочности, так как местные изменения жесткости конструкции вызывают концентрацию напряжений (КН) и опасны. Как правило, КН способствует протеканию усталостных

повреждений при переменных нагрузках. В этих случаях у кранов необходимо устранить КН в элементах его моста или снизить размах опорных реакций в процессе его движения по пролету.

Вторичные напряжения образуются в основных несущих элементах моста, в местах расположения различных конструктивных концентраторов напряжений, которые могут образовываться в местах приварки вспомогательных элементов к основной детали.

Высокие напряжения в местах прикрепления вспомогательных элементов к основным получают в результате суммирования передаваемого ими силового потока с остаточными напряжениями от сварки, а также с концентрацией основных напряжений, образующихся в местах пристыковки вспомогательных элементов к основным. Этим объясняется образование усталостных трещин в местах конструкции, «слабонагруженных» основными напряжениями.

Методы повышения сопротивления усталости сварных соединений и конструкций кранов можно разделить на три принципиально отличные группы: повышение сопротивления усталости местной обработкой сварных швов, рациональное конструктивное оформление сварных узлов и рациональное схемно-конструктивное решение крановых мостов в целом.

Первая группа методов подробно рассмотрена в работе [2] и широко применяется в настоящее время для повышения сопротивления усталости сварных соединений.

Вопросы рационального конструктивного оформления сварных узлов, входящих в мост крана, описаны в работе [3]. Этот метод позволяет обеспечить равномерную передачу силового потока в элементах конструкции моста, входящих в узел, т. е. устранить КН конструктивным путем в пределах сварного узла и примыкающих к нему элементах, уменьшить влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости сварных швов и узла в целом, устранить деформационное старение стали в сварных соединениях.

Третья группа разработана в Донбасской государственной машиностроительной академии. Она включает методы устранения факторов [3], вызывающих усталостные повреждения сварного моста при его движении вдоль пролета. Эти методы основаны на совершенствовании схемно-компоновочного решения моста и крана в целом с целью устранить или существенно уменьшить размах сил реакций в контактах колесо – рельс, т. е. устранить изменение усилий и напряжений в конструкции моста при движении крана по путям, имеющим отклонения от проектных размеров, а также устранить возможность появления вибрации.

Следовательно, нагруженность моста можно снизить выравниванием вертикальных и умень-





шением горизонтальных опорных реакций. Все методы, позволяющие решить эту проблему, целесообразно назвать «повышением ходовых качеств кранов».

Первые два метода — пассивные, так как не влияют на общую нагруженность крана и подкрановой эстакады, а также непроизводительные потери энергии, потребляемой на передвижение крана. Третий — конструктивный, снижает нагруженность моста и подкрановой эстакады при движении крана, а также непроизводительные потери энергии, снижает или устраняет размах амплитуд усилий и напряжений в конструкции. Метод основан на улучшении ходовых качеств крана.

В течение 20 лет эксплуатации мостовых кранов усталостные трещины могут образовываться в основном под действием вторичных напряжений, выраженных в продавливании листа верхнего пояса рельсом, отрыве «петушков», прикрепляющих рельс к балке, отрыве тупиковых упоров тележки, образованием трещин в местах приварки к стенкам балок кронштейнов рам для установки приводов и шкафов с электрооборудованием, в местах крепления главных балок к концевым и т. п.

Очевидно, что в этих случаях предупредить усталостные повреждения главных балок нагрузками при перемещении грузов лебедкой, подъема

и тележкой можно путем устранения факторов, вызывающих появление вторичных напряжений.

### Выводы

1. Достигаемая в условиях производства циклическая долговечность сварных крановых мостов, изготавливаемых по нормативам для режимов Т и ВТ, в большинстве случаев значительно ниже расчетной, так как не учитывается влияние вторичных напряжений.

2. С целью дальнейшего увеличения усталостной прочности сварных конструкций мостов требуется исследование причин образования и мест генерации переменных вторичных напряжений.

3. Необходимо продолжить работы по совершенствованию уже имеющихся и созданию новых модификаций статически определимых кранов, которые позволяют существенно снизить вторичные напряжения при их движении.

1. СНиП 11-23-81.
2. Груфяков В. И. Повышение сопротивления усталости сварных соединений и конструкций // Автомат. сварка. — 1998. — № 11. — С. 11–19.
3. Усталостные повреждения сварных крановых мостов / О. А. Емельянов, В. П. Шепотько, Ю. В. Пихота и др. // Там же. — 2004. — № 5. — С. 33–39.
4. Фишер Дж., Мерц Д. Трещинообразование в стальных мостах // Гражданское стр-во. — 1985. — № 2. — С. 9–13.

Formation of secondary stresses, which are usually not taken into account, and their effect on fatigue of welded overhead travelling cranes are considered.

Поступила в редакцию 04.12.2006

## НКМЗ СДАЛ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ЭКСКАВАТОР НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ НА СТОЙЛЕНСКОМ ГОКе

*Новокраматорский машиностроительный завод (Краматорск Донецкой обл.) сдал в эксплуатацию на Стойленском ГОКе (Россия) экскаватор ЭШ 6,5/45.*

*Новый драглайн НКМЗ создан на базе традиционной модели после переработки проекта с целью улучшения технических параметров и минимизации затрат.*

*По словам главного механика ГОКа Порфирия Бойко, предпочтение новокраматорскому экскаватору отдано ввиду его большей, чем у других изготовителей этой техники, приспособленности к работе в усложняющихся горно-геологических условиях карьера, производительности, комфортности и, вместе с тем, экономичности и простоте в управлении. Свидетельство тому — еще один контракт с этим ГОКом на производство такой же машины.*



## ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В УСЛОВИЯХ СВАРКИ

Г. П. БОЛОТОВ, канд. техн. наук (Черниг. гос. технолог. ун-т)

Определено влияние катодных процессов на устойчивость тлеющего разряда. Показано, что в условиях нагрева сильноточным тлеющим разрядом наличие на поверхности анода неоднородных диэлектрических пленок вследствие его загрязнения в процессе работы приводит к образованию на аноде локальных участков с повышенной плотностью тока, наличие которых способствует переходу тлеющего разряда в дуговой.

*Ключевые слова:* электроды, низкотемпературная плазма, тлеющий разряд, устойчивость, состояние поверхности

Низкотемпературная плазма тлеющего разряда среднего (1...15 кПа) давления, горящего в инертных или активных газах, успешно используется в качестве источника энергии в технологических процессах, сопровождающихся существенным длительным нагревом изделий — при химико-термической обработке, диффузионной сварке и пайке. Обрабатываемые или соединяемые детали в этих процессах являются одним из электродов разряда — катодом. Через катодное пятно на их поверхности осуществляется нагрев.

В то же время тлеющий разряд не отличается достаточной устойчивостью и при определенных условиях переходит в электрическую дугу. В возникающих при этом локальных пятнах нагрева возрастает концентрация энергии, что приводит к прожогам и оплавлению отдельных участков соединяемых деталей с образованием неисправимых дефектов. Для электрических разрядов в газах особо важными являются процессы, происходящие на катоде и в прикатодной области.

В настоящее время в многочисленных исследованиях [1–3], касающихся проблемы устойчивости тлеющего разряда, рассматривается в основном влияние катодных процессов на форму разряда. Установлено, что вероятность перехода тлеющего разряда в электрическую дугу определяется характеристиками поверхностного слоя материала катода (химическим составом, микрорельефом, наличием оксидных пленок и загрязнений, обеспечивающих существование точек повышенной эмиссии электронов), а также формированием на катоде щелей и зазоров определенного размера, где возможно появление эффекта полого катода со значительным локальным возрастанием плотности тока. Обработка деталей по 3–5-му классу чистоты, промывка их в растворителях, устранение из зоны

нагрева щелей и зазоров размером 0,01...1,00 мм являются достаточными мерами для того, чтобы избежать перехода тлеющего разряда в дуговой.

В [4] показано, что при геометрии электродов, используемых при сварке в тлеющем разряде (стальной проволоочный контур–анод и относительно массивные детали–катод), плотность тока в прианодной области в 5...8 раз больше, чем на катоде, что делает эту область весьма чувствительной к локальным флуктуациям плотности тока и может влиять на устойчивость разряда даже при отсутствии неблагоприятных факторов на катоде.

Замечено, что в процессе работы вначале слабое равномерное анодное свечение постепенно изменяет свое состояние. На аноде появляются отдельные светящиеся пятна, расположенные произвольно (рис. 1, вверху, а), из которых с течением времени начинают формироваться каналы повышенной проводимости (рис. 1, вверху, б). Увеличение тока разряда приводит к развитию в этих каналах электрической дуги (рис. 1, вверху, в). Это вызвано тем, что в процессе работы состояние поверхности анода существенно изменяется вследствие осаждения на ней полимеризовавшихся в разряде паров масел, попадающих в камеру из вакуумных насосов и трубопроводов, окисления поверхности анода из-за наличия в газах примесей кислорода, осаждения на аноде частиц материала катода, распыленных ионной бомбардировкой. Все это приводит к появлению на поверхности анода неконтролируемых пленок, имеющих более высокое, чем материал анода, сопротивление и способствующих замыканию тока тлеющего разряда на аноде.

Исследование характера проводимости тока на поверхности анода (рис. 2, а) выполняли с помощью метода вращающегося зонда с записью результатов на светолучевом осциллографе. Анод выполнен из отрезка прутка из стали Ст3 диаметром 0,005 м и длиной 0,05 м. Для имитации состояния поверхности анода, возникающего в

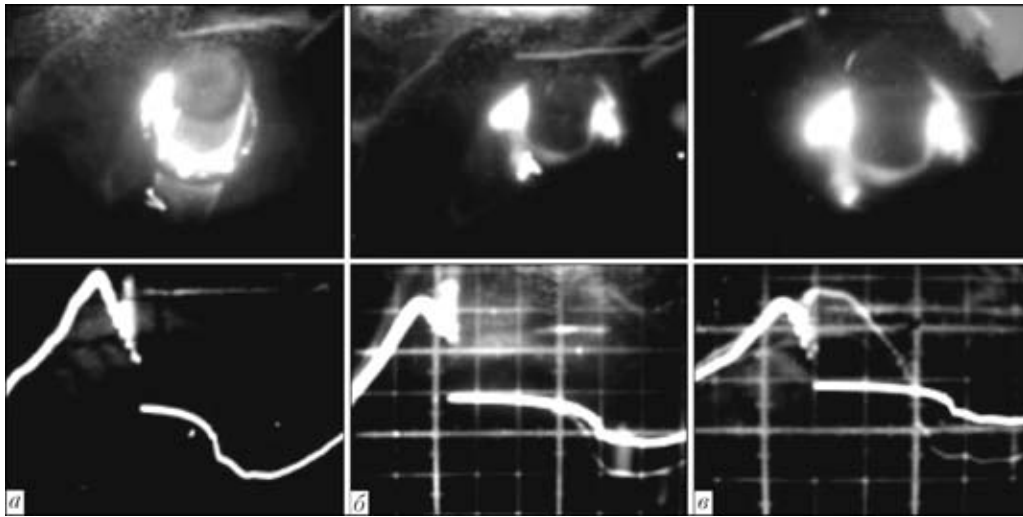


Рис. 1. Характер изменения внешнего вида анодного свечения в процессе работы анода тлеющего разряда (вверху) и осциллограммы разрядного тока (внизу): а-в — см. в тексте

процессе его работы, анод подвергали окислению на воздухе при температуре 873...973 К в течение 10 мин до образования заметного слоя оксидов. После этого поверхность анода в двух местах зачищали до металлического блеска. Траектория движения рабочего конца зонда располагалась на расстоянии 1,0...1,5 мм от поверхности анода. Из полученных осциллограмм (рис. 2, б) видно, что значительная доля тока разряда поступает на анод именно через участки, свободные от поверхностных загрязнений. Это приводит к повышению локальной плотности тока на аноде и соответственно в примыкающих к нему областях положительного столба разряда.

При увеличении мощности разряда на осциллограммах разрядного тока появляются высокочастотные колебания, наблюдающиеся в момент, следующий за переходом кривой тока через амплитудное значение (см. рис. 1, внизу, а). Измерение частоты следования этих импульсов, произведенное с помощью анализатора спектра частот типа С4-25, позволило установить ее характерные значения —  $1 \cdot 10^5 \dots 1 \cdot 10^6$  Гц. Спустя некоторое время после появления высокочастотных пульсаций тока начинают появляться низкочастотные колебания с частотой питающей разряд сети, амплитуда которых может возрастать вплоть до перехода тлеющего разряда в дуговой (см. рис. 1, внизу, в). Этот процесс может быть вызван тем, что увеличение тока приводит к росту его плотности в точках повышенной проводимости на поверхности анода с их возможным нагревом вплоть до температуры плавления и испарения металла. Пары металла, появляющиеся в межэлектродном промежутке, понижают эффективный потенциал ионизации газовой среды, что может способствовать повышению проводимости этого промежутка с увеличением в нем тока. Объяснение этого явления дано в работе [5], где установлено,

что интенсивное испарение металла с поверхности катода способно привести к формированию в межэлектродном промежутке тлеющего разряда канала электрической дуги.

Исследование процесса электронно-лучевой обработки (ЭЛО) металлов [6] показало, что испарение металла с поверхности деталей под действием потока ускоренных электронов происходит непостоянно, а периодически, т. е. процесс состоит из последовательности элементарных циклов нагрев-вскипание-рассеяние (испарение), частота следования которых в условиях ЭЛО составляет  $1 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^6$  Гц.

Для того чтобы установить, вызваны ли возникающие высокочастотные колебания тока в тлеющем разряде испарением металла анода, необходимо определить вероятную температуру нагрева и характерное время энергонакопления, приводящее

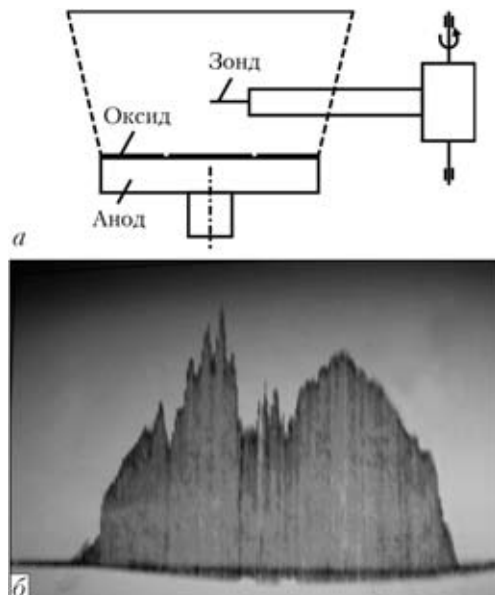


Рис. 2. Схема измерения плотности тока (а) и осциллограммы ее распределения (б) на поверхности анода тлеющего разряда



к перегреву и испарению металла с поверхности анода на участках повышенной плотности тока.

Полагая упрощенно образующуюся на поверхности анода электрическую дугу точечным источником теплоты на поверхности полубесконечного тела, предельную температуру в зоне нагрева можно определить, согласно [7], как

$$T = T_0 + \frac{q}{2\pi\lambda r}, \quad (1)$$

где  $T_0$  — исходная температура анода (в условиях тлеющего разряда достигает 873...1073 К);  $q$  — мощность источника (дуги);  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала анода;  $r$  — радиус пятна нагрева, ориентировочно определяемый по следам эрозии (оплавления) на поверхности анода.

Измерение поперечных следов дуги показало, что они составляют не более 0,001...0,002 м. С учетом этого для тока разряда 10 А и анодного падения потенциала 15 В (для азота, аргона и водорода его значение составляет 14...16 В), согласно (1) температура в пятне нагрева может достигать 3500...4000 К, что превышает температуру начала заметного испарения стального анода (примерно 3000 К).

Время энергонакопления зависит от плотности теплового потока и физических свойств металла. Поскольку бомбардировка анода в условиях тлеющего разряда осуществляется, как и при ЭЛО электронами, ускоренными в области анодного падения потенциала, то время цикла нагрев–испарение металла можно оценить с помощью зависимостей, используемых в теории ЭЛО [6, 8]. В этом случае время энергонакопления составляет

$$\tau = \frac{M^{2/3}(4\rho)^{-2/3}}{4a} \text{ [с]}, \quad (2)$$

где  $M$  — масса металла, охваченного вскипанием, г;  $\rho$  — плотность металла, г/см<sup>3</sup>;  $a$  — температуропроводность металла, см<sup>2</sup>/с.

Масса вещества, охваченного энерговыделением, связана с параметрами электронного потока (с использованием формулы Шенланда [9]), следующим соотношением [8]:

$$M = 1,65 \cdot 10^{-12} d^2 U^2 \text{ [г]}, \quad (3)$$

где  $d$  — характерный размер зоны испарения

(зоны действия дуги), см;  $U$  — потенциал ускорения электронов, В.

Для указанных ранее значений  $d$  и  $U$ , а также соответствующих теплофизических характеристик анода согласно зависимостям (2) и (3) характерное время энергонакопления составляет  $\tau = 2 \cdot 10^{-8} \dots 10^{-7}$  с, отсюда возможная частота пульсаций процесса парообразования

$$f = 1 \cdot 10^7 \dots 0,5 \cdot 10^8 \text{ Гц,}$$

что весьма близко к частоте колебаний тока, наблюдаемой при экспериментах и, по-видимому, может служить подтверждением предложенной гипотезы.

## Выводы

1. Во избежание появления очагов заметного испарения анода его целесообразно выполнять из тугоплавких металлов (молибдена, вольфрама).

2. Поскольку образующиеся колебания тока разряда попадают в радиочастотный диапазон, то они могут быть легко обнаружены с помощью любого радиовещательного приемника со средневолновым диапазоном и служить сигналом для своевременного изменения режима.

3. Появляющаяся нестабильность разрядного тока связана не с наличием на поверхности анода диэлектрических пленок, а с неоднородностью их толщины и состава, что требует периодической замены или очистки анода.

1. Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950. — 386 с.
2. Гайсин Ф. М., Саттаров Р. К., Халиков Р. А. Исследование перехода тлеющего разряда в электрическую дугу при высоких температурах. — Казань: КАИ, 1975. — 12 с.
3. Голубев В. С. Тлеющий разряд повышенного давления. — М.: Наука, 1990. — 333 с.
4. Болотов Г. П., Сатюков А. И. Расчетная оценка границы устойчивости тлеющего разряда при диффузионной сварке // Автомат. сварка. — 1998. — № 4. — С. 13–15.
5. Plesse H. The effect of temperature on the electrode a glow discharge at low pressure // Ann. d. Phys. — 1935. — № 22. — Р. 423.
6. Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1978. — 238 с.
7. Рыкалин Н. Н. Расчет тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
8. Николаев Г. А., Ольшанский Н. А. Новые методы сварки металлов и пластмасс. — М.: Машиностроение, 1966. — 278 с.
9. Назаренко О. К. Электронно-лучевая сварка. — М.: Машиностроение, 1981. — 146 с.

The influence of cathode processes on the glowing discharge stability is established. It is shown that under the conditions of heating by the high-current glowing discharge presence of non-uniform dielectric films on the anode surface because of its contamination during operation leads to formation of local sections with a higher current density on the anode, the presence of which promotes a transition of the glowing discharge into arc discharge.

Поступила в редакцию 17.06.2007

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУР ОБУЧЕНИЯ РОБОТОВ СЕМЕЙСТВА «PUMA»

Г. А. ЦЫБУЛЬКИН, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложен алгоритм, позволяющий автоматизировать некоторые процедуры обучения робота. В основу построения алгоритма положена аппроксимация элементов траектории в виртуальных системах координат. Приведены результаты эксперимента.

*Ключевые слова:* траектория движения, алгоритмы, обучение, программирование, автоматизация обучения, манипуляционные роботы

Программирование траекторий движения сварочных роботов чаще всего осуществляется путем показа или так называемого обучения [1, 2], когда оператор с помощью пульта ручного управления перемещает сварочную горелку из одной точки программируемой траектории в другую. Установив горелку в очередную точку траектории и ориентируя ее определенным образом, оператор фиксирует с помощью запоминающего устройства координаты положения горелки, после чего горелка перемещается в новую точку и процедура обучения повторяется.

Затраты времени на обучение напрямую зависят от сложности заготовки и составляют от нескольких минут до 10...20 ч [1]. Они особенно велики, если система управления роботом из-за весьма ограниченного объема памяти, как, например, у робота PUMA-560 (PM 01), не обеспечивает круговую интерполяцию. Поскольку значительная часть роботов, работающих до сих пор, относится как раз к такому типу, весьма актуальным представляется решение задачи, направленной на расширение функциональных возможностей этих роботов с целью повышения эффективности их обучения.

В настоящей работе предложен один из алгоритмов, расширяющих возможности обучения манипуляционных роботов семейства «PUMA» при программировании траекторий движения сварочной горелки, включающих элементы дуг окружности. Идея построения алгоритма основана на аппроксимации этих элементов в некоторых виртуальных системах координат. При этом активно используются заложенные в языке VAL процедуры ортогонального преобразования, с помощью которых устанавливается связь между виртуальными системами и базовой системой координат робота.

**Синтез алгоритма обучения.** Для простоты изложения рассмотрим случай, когда требуется

запрограммировать фрагмент дуги длиной  $L$  и радиусом  $R$ , расположенной на некоторой плоскости в рабочем пространстве робота. Выберем на этой плоскости декартовую систему координат  $Oxy$  таким образом, чтобы центр окружности совпадал с началом координат  $O$ , а ось  $x$  проходила через начальную точку дуги  $A$  (рисунок). Тогда координаты  $x_B$ ,  $y_B$  точки  $B$  и приращения координат  $\Delta x = x_B - x_A$  и  $\Delta y = y_B - y_A$  связаны соотношениями

$$x_B = R - \Delta x, \quad y_B = \Delta y. \quad (1)$$

Приращения  $\Delta x$  и  $\Delta y$  можно определить по формулам

$$\Delta x = R(1 - \cos \alpha), \quad \Delta y = R \sin \alpha. \quad (2)$$

Угол  $\alpha$  выберем исходя из требований к точности аппроксимации дуги:

$$\alpha \leq 2 \arccos(1 - \delta R)^{-1}, \quad (3)$$

где  $\delta$  — допустимая погрешность аппроксимации.

Зададим теперь новую систему декартовых координат  $Ox'y'$ , в которой ось  $x'$  проходит через точку  $B$ . Используя соотношения (1) и предварительно вычисленные по формулам (2) значения приращений  $\Delta x$  и  $\Delta y$ , найдем координаты следующей точки  $C$ , но уже в системе координат  $Ox'y'$ :

$$x_C = R - \Delta x, \quad y_C = \Delta y.$$

Продолжая таким образом задавать новые виртуальные системы координат и вычисляя координаты последующих точек по формулам (1), получаем в результате координаты всех равноотстоящих друг от друга точек  $n$  на программируемой дуге, число которых  $n \leq L/\alpha R$ .

Следует обратить внимание на один очень важный момент: при определении координат точек дуги нам не нужно каждый раз вычислять значения приращений  $\Delta x$  и  $\Delta y$ , поскольку они согласно (2) при  $\alpha = \text{const}$  являются постоянными. Именно эта особенность предлагаемого алгоритма позволяет в условиях достаточно ограниченных



## СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ СТЫКОВ В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В. А. КОЛЯДА, Е. В. ШАПОВАЛОВ, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана стереоскопическая система технического зрения, предназначенная для измерения пространственных координат стыков. Систему можно использовать для автоматического наведения сварочного инструмента на стык при сварке робототехническими комплексами.

*Ключевые слова:* сварочное производство, автоматизация, объект сварки, стереоскопическое измерение, пространственные координаты, робототехнический комплекс, эпиллярные линии, сопряженные точки

В настоящее время при автоматизации сварочного производства наиболее часто используют оптические датчики, основанные на методе светового сечения, которое позволяет за один цикл измерения определить двухмерные координаты профиля объекта в плоскости светового сечения. Однако, когда перед проведением сварочной операции необходимо предварительно оценить пространственную ориентацию объекта, использование оптических датчиков со световым сечением вызывает существенные затруднения.

Например, при сварке с использованием робототехнических комплексов часто возникает задача, связанная с наведением сварочного инструмента на стык под прямым углом к плоскости объекта сварки, что требует определения пространственной ориентации свариваемых конструкций. Для решения такой задачи при использовании датчика со световым сечением необходимо сначала выполнить многократное сканирование разных участков поверхности объекта и затем по результатам сканирования рассчитать пространственные координаты рельефа поверхности.

Значительно упростить процедуру определения пространственной ориентации объектов сварки можно с помощью метода стереоскопического измерения, при котором определение трехмерных координат участка поверхности объекта выполняется за один такт измерения. При этом не требуется дополнительных сканирующих перемещений сенсорного блока. Известны отдельные примеры использования стереоскопических средств технического зрения в сварочном производстве. Например, американская фирма «Automatics Robotic Systems» применила бинокулярную систему для планирования траектории движения сварочной горелки при приварке вкладышей в тяжелые рамы колесных тележек бункерных вагонов во

время их ремонта [1]. Основной недостаток данной системы и всех подобных решений заключается в том, что каждая такая система ориентирована на решение ограниченного круга задач и не может быть использована для автоматизации существующих сварочных установок.

В ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ разработана стереоскопическая система технического зрения для измерения пространственных координат стыков, которые наиболее часто встречаются в сварочном производстве. Схема сенсорного блока системы показана на рис. 1. В качестве видеодатчиков выступают две ПЗС-видеокамеры. Для подсвета поверхности объекта измерения используется источник рассеянного света, который представляет собой матрицу из лазерных светодиодов. Перед объективами каждой видеокамеры установлены светофильтры, полоса пропускания которых согласована с длиной волны излучения лазерных светодиодов. Видеосигналы от видеокамер обрабатываются в контроллере системы с помощью специального математического обеспечения.

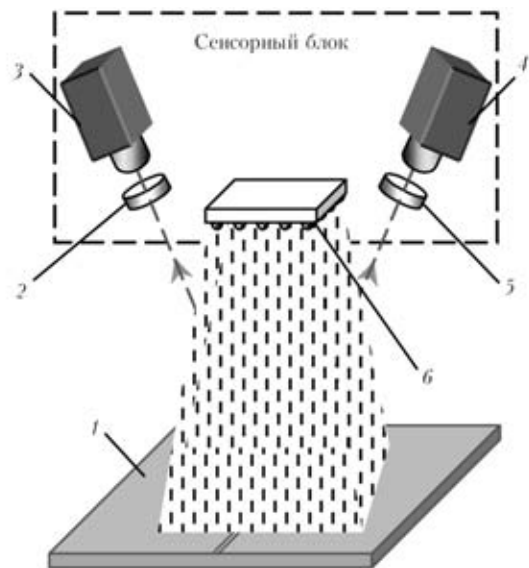


Рис. 1. Схема сенсорного блока: 1 — объект измерения; 2, 5 — светофильтр 1 и 2; 3, 4 — соответственно видеокамера 1 и 2; 6 — источник рассеянного света





Математическое обеспечение разработанной стереоскопической системы предназначено для предварительной обработки цифровых изображений; поиска сопряженных точек и определения пространственных координат точек по их изображениям.

На этапе предварительной обработки изображений выполняется выделение некоторых характерных участков на двух изображениях для их последующего отождествления. Для решения данной задачи используется нормализация и масочная фильтрация изображений. Нормализация изображений, т. е. повышение уровня их схожести, осуществляется с помощью аппаратных средств устройств видеозахвата путем изменения яркости и контрастности входных видеосигналов. Масочная фильтрация в данном случае выполняется программно и позволяет существенно снизить уровень белого шума и подчеркнуть характерные элементы на изображениях объекта.

Поиск сопряженных точек является центральной проблемой стереозрения. Задача автоматизированного поиска сопряженных точек состоит в следующем: на одном из изображений выбрана точка  $m'$ , являющаяся проекцией некоторой точки  $M$  трехмерного пространства. На втором изображении необходимо найти точку  $m''$  — проекцию той же точки. Корреляционные методы поиска сопряженных точек, которые наиболее часто используются на практике, для обработки изображений стыков являются малоэффективными, поскольку в общем случае изображение стыка имеет однородную структуру и выбранная область стыка на одном изображении может коррелироваться с несколькими областями второго изображения. Поэтому в данном случае для отождествления точек используют метод, связанный с нахождением эпиполярных линий, физический смысл которых можно сформулировать следующим образом. Если одна видеокамера «видит» точку, то можно считать, что она «смотрит» в «торец» прямой линии в пространстве. Тогда вторая видеокамера, расположенная под некоторым углом к первой, будет «видеть» прямую линию, которая содержит сопряженную точку. При известных положениях и углах наблюдения видеокамер для каждой точки на первом изображении несложно вычислить эпиполярную линию на втором изображении, что существенно снижает зону поиска сопряженных точек.

Идентификация собственных и установочных параметров видеокамер сенсорного блока осуществляется независимо для каждого видеоканала с помощью методики, представленной в работе [2]. Результатом идентификации являются две матрицы  $A_1$  и  $A_2$  размером  $4 \times 4$ , описывающие пространственное положение и ориентацию видеокамер относительно опорной системы координат. Если

положение точки в опорной системе координат задано вектором  $r_0$ , а положения той же точки в системах координат видеокамер — векторами  $r_1$  и  $r_2$ , то справедливы следующие соотношения:

$$r_0^T = A_1 r_1^T, r_0^T = A_2 r_2^T. \quad (1)$$

Для перехода от систем координат видеокамер к системам координат соответствующих изображений служит преобразование перспективы:

$$x_k^H = \frac{x_k}{z_k/d_k} + \frac{W}{2}, y_k^H = \frac{y_k}{z_k/d_k} + \frac{H}{2}, k = 1, 2, \quad (2)$$

где  $x_k^H, y_k^H$  — координаты сопряженных точек на изображениях;  $x_k, y_k, z_k$  — координаты сопряженных точек в системах координат видеокамер;  $d_k$  — расстояние от точек переднего фокуса видеокамер до начала координат опорной системы;  $W, H$  — ширина и высота изображений в пикселях;  $k$  — номер камеры.

Выражения (2) можно переписать в виде:

$$x_k = c_k^x z_k, y_k = c_k^y z_k, k = 1, 2, \quad (3)$$

где  $c_k^x = \frac{x_k^H - (W/2)}{d_k}$ ;  $c_k^y = \frac{y_k^H - (H/2)}{d_k}$ . Отсюда векторы, характеризующие положение точки в системах координат видеокамер, можно записать следующим образом:

$$r_1 = [c_1^x z_1, c_1^y z_1, z_1, 1]^T, r_2 = [c_2^x z_2, c_2^y z_2, z_2, 1]^T. \quad (4)$$

Выражения (1) можно записать в виде системы линейных уравнений (в матричной форме):

$$A_1 r_1^T = A_2 r_2^T. \quad (5)$$

Система (5) является переопределенной. Решив систему с помощью приближенного метода наименьших квадратов, получим вектор  $z = [z_1, z_2, e]^T$ , где  $e$  — значение невязки. Тогда на основании выражения (4) рассчитываются значения остальных компонентов векторов  $r_1, r_2$  и с помощью одного из соотношений (1) вычисляется вектор  $r_0$ , определяющий координаты точки в опорной системе координат. Таким образом, если известны координаты сопряженных точек на двух изображениях  $(x_1^H, y_1^H), (x_2^H, y_2^H)$  и матрицы  $A_1, A_2$ , то на основании рассмотренных выше соотношений несложно определить пространственные координаты исследуемой точки  $(x_0, y_0, z_0)$ .

Процесс поиска сопряженных точек проиллюстрирован на рис. 2 для случая стыка с зазором, близким к нулю.

На начальном этапе проводится распознавание линий стыка на изображениях, полученных от сенсорного блока, с помощью метода, описанного в

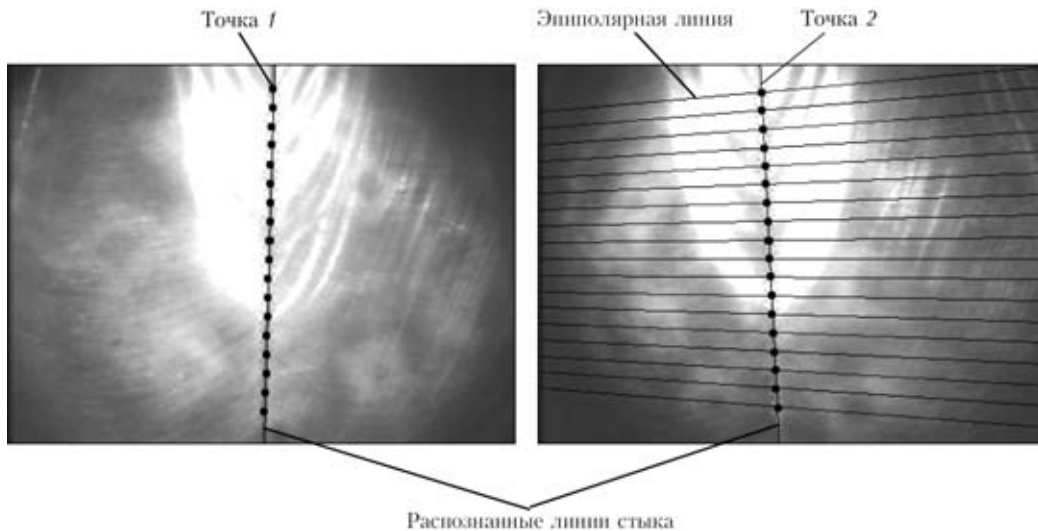


Рис. 2. Поиск сопряженных точек

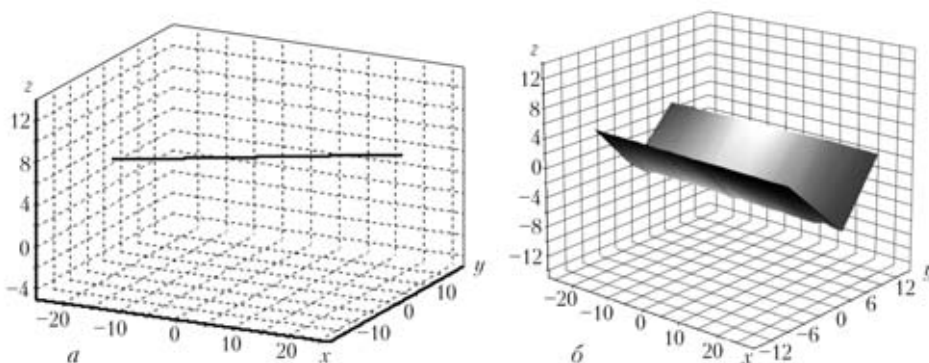
работе [3]. На линии стыка, распознанной на первом изображении, выбирается точка 1, для которой на втором изображении строится эквиполярная линия. Далее определяется точка 2, которая является результатом пересечения распознанной линии стыка на втором изображении с найденной эквиполярной линией. Точки 1 и 2 представляют собой пару сопряженных точек. Аналогично определяются остальные пары сопряженных точек, причем количество пар зависит от требуемой точности определения линии стыка.

Для каждой пары сопряженных точек формируется система линейных уравнений (5) и на основании выражений (4), (1) вычисляются координаты пространственной точки в опорной системе координат. По найденным пространственным точкам в трехмерной системе координат строится линия стыка, которая в дальнейшем может быть использована для планирования траектории движения сварочного инструмента. На рис. 3, а показан результат определения пространственного положения стыка для случая стыка с зазором, близким к нулю. В данном случае за один такт измерения получена ориентация линии стыка с приблизительной протяженностью 50 мм,

т. е. измерение координат стыка необходимо выполнять с небольшой частотой даже при максимальных скоростях сварки, что значительно снижает требования к вычислительной мощности контроллера стереоскопической системы.

Разработанные алгоритмы также позволяют определять пространственные координаты стыков с *v*-образной разделкой. Для этого на каждом изображении выполняется распознавание трех линий, которые соответствуют двум кромкам и корню разделки стыка. После определения пространственной ориентации каждой линии формируется общая геометрия стыка в опорной системе координат. На рис. 3, б показан результат стереоскопического измерения пространственных координат стыка с *v*-образной разделкой. По двум линиям кромок разделки несложно построить плоскость, определяющую ориентацию свариваемых конструкций, что может служить основой для наведения сварочного инструмента на стык под прямым углом к плоскости объекта сварки при использовании робототехнических комплексов.

Разработанная стереоскопическая система имеет несколько ограниченную область применения. Например, при разделке со скосом только одной

Рис. 3. Результаты стереоскопического измерения пространственных координат стыков: а — для стыка с зазором, близким к нулю; б — для стыка с *v*-образной разделкой кромок

кромки одна из видеокамер не сможет «увидеть» корень разделки, что не позволит определить координаты такого стыка. Но вместе с тем разработка стереоскопических средств технического зрения представляет собой перспективное направление в области автоматизации сварочных процессов, поскольку стереоскопические системы позволяют получать наибольший объем информации об объекте за один такт измерения.

1. Мошкин В. И., Петров А. А., Титов В. С., Якушенко Ю. Г. Техническое зрение роботов / Под общ. ред. Ю. Г. Якушенко. — М.: Машиностроение, 1990. — 272 с.
2. Киселевский Ф. Н., Коляда В. А. Калибровка триангуляционных оптических сенсоров. // Автомат. сварка. — 2005. — № 5. — С. 57–58.
3. Оптический сенсор для слежения за стыком при размерах зазора, близких к нулю / Ф. Н. Киселевский, Г. А. Бутаков, В. В. Долиненко, Е. В. Шаповалов // Там же. — 2003. — № 2. — С. 51–52.

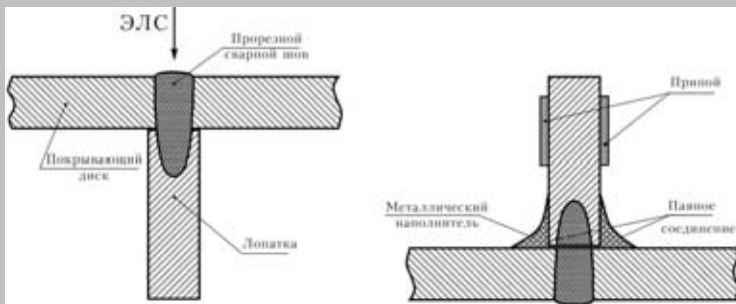
Stereoscopic technical vision system was developed to measure spatial coordinates of welded joints. The system can be applied for automatic guidance of the welding tool to a joint in welding using robotic systems.

Поступила в редакцию 07.12.2006

## КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНОПАЯНЫХ РАБОЧИХ КОЛЕС ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ



Центробежные компрессоры находят широкое применение в энергетике, химической, нефтяной, металлургической и других отраслях промышленности. Основным элементом проточной части центробежного компрессора являются рабочие колеса. Надежность и долговечность центробежного компрессора во многом зависит от сопротивления знакопеременным нагрузкам и уровня усталостной прочности материала и соединений рабочего колеса. Такое колесо состоит из двух дисков — основного, обычно с цельнофрезерованными лопатками, и покрывающего.



Разработана технология изготовления рабочих колес из высокопрочной нержавеющей и среднелегированной стали. Крепление покрывающего диска к лопаткам осуществляется наложением прорезных швов электронно-лучевой сваркой.

Непроваренные участки лопаток соединяются с покрывающим диском посредством вакуумной пайки.

При этом перед пайкой формируются галтели из металлического порошка, который затем пропитывается припоем.

По разработанной технологии изготавливаются рабочие колеса наружным диаметром от 360 до 850 мм из сталей 07X16H6 или 13XГМРБ. После балансировки колеса подвергаются разгонным испытаниям при скорости вращения на 10...15 % выше скорости вращения ротора компрессора.

**Контакты:** Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,  
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11, отд. № 7.  
Тел.: (38044) 287 44 06  
Факс: (38044) 287 12 83; 287 46 30



УДК 621.791:658.011.54

## ДАТЧИК УРОВНЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ВАННЫ ПРИ ЭШС

Ю. Н. ЛАНКИН, д-р техн. наук, Е. Н. БАЙШТРУК, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описан индуктивный датчик уровня жидкой металлической ванны для ЭШС, отличающийся повышенной чувствительностью и стабильностью.

*Ключевые слова:* индуктивный датчик, вихревые токи, уровень металлической ванны, электрошлаковая сварка

При электрошлаковой сварке (ЭШС) необходимо, чтобы уровень металлической ванны относительно подвижных формирующих устройств – ползунов — сохранялся неизменным. Это возможно, если в каждый момент времени соблюдается условие

$$\sum_{i=1}^n S_{эл}^i v_{пл}^i = B(S + 2\Delta S)v_{св},$$

где  $n$  — количество электродов;  $S_{эл}^i$  — площадь сечения  $i$ -го электрода;  $v_{пл}^i$  — скорость плавления  $i$ -го электрода;  $B$  — ширина сварочного зазора;  $S$  — толщина свариваемого металла;  $\Delta S$  — усиление шва;  $v_{св}$  — скорость сварки (скорость перемещения тележки и ползунов).

Стабильность уровня поверхности металлической ванны относительно перемещаемого кристаллизатора (ползуна) в значительной мере влияет на качество поверхности сварного шва, а существенное изменение ее уровня может привести к аварийной ситуации — проливу шлаковой или металлической ванны.

К сожалению, в реальных условиях на процесс ЭШС воздействуют различные возмущения, приводящие к значительным колебаниям  $v_{пл}^i$ . Кроме того, ширина сварочного зазора  $B$  не остается постоянной по длине шва из-за недостаточно точной сборки и наличия сварочных деформаций. В результате на практике сварщику все время приходится корректировать  $v_{св}$  или толчком перемещать аппарат на большой скорости, чтобы поддерживать уровень шлаковой ванны, хотя бы несколько ниже верхнего среза ползунов. Считается, что осуществлять процесс ЭШС без автоматической стабилизации уровня металлической ванны при скорости сварки выше 5 м/ч вообще практически не возможно. Поэтому работы по автоматическому регулированию уровня металлической

ванны начались даже раньше, чем разработка регуляторов тока сварки [1]. В работах [2, 3] было предложено большое количество датчиков уровня жидкой металлической ванны, основанных на различных физических принципах — термодатчики, контактные, радиоактивные и индукционные датчики. Тем не менее широкого распространения они не получили.

В последнее время в связи с некоторым оживлением промышленности вновь возник интерес к ЭШС. С распространением скоростной ЭШС началось создание современного сварочного оборудования нового поколения и возобновились работы по автоматическому регулированию уровня жидкой металлической ванны.

Отличительной особенностью описываемого датчика является повышенная чувствительность и стабильность показаний за счет применения новых принципов обработки выходного сигнала. В последних разработках регуляторов уровня металлической ванны в ИЭС им. Е. О. Патона используются токовихревые датчики (рис. 1). Возбуждающая катушка 4 находится на разомкнутом П-образном магнитопроводе 5, полюса 2 которого размещены в пазу 3 в теле водоохлаждаемого ползуна 1.

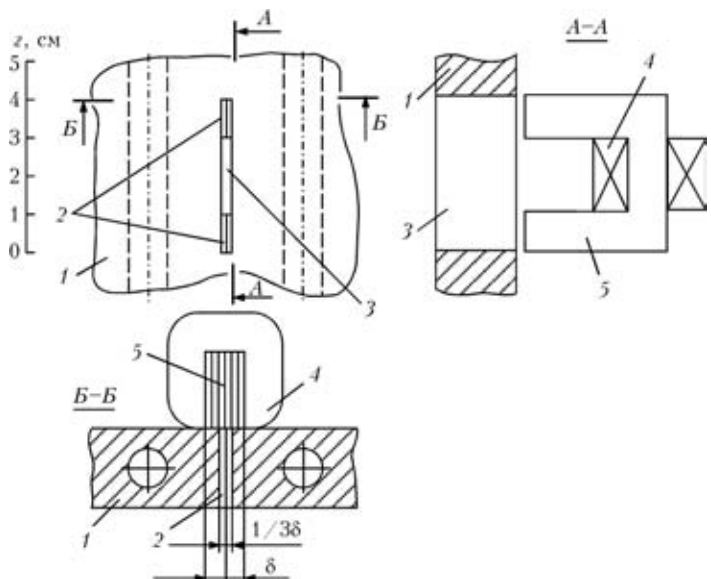


Рис. 1. Схема размещения датчика уровня поверхности металлической ванны в ползуне; обозначения 1–5 см. в тексте

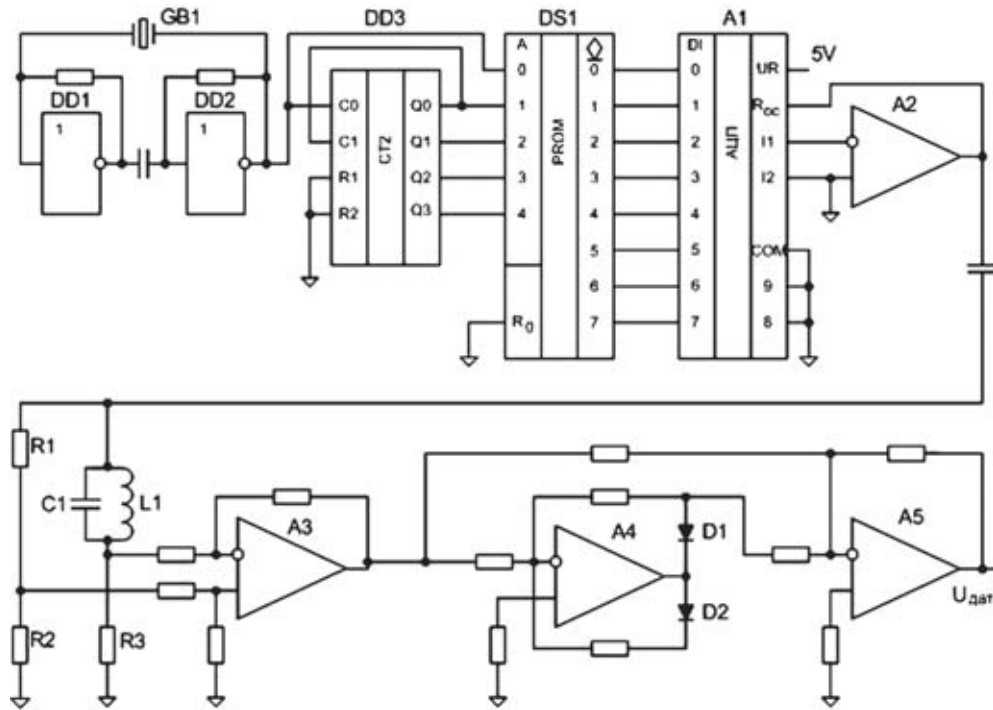


Рис. 2. Принципиальная схема датчика уровня металлической ванны

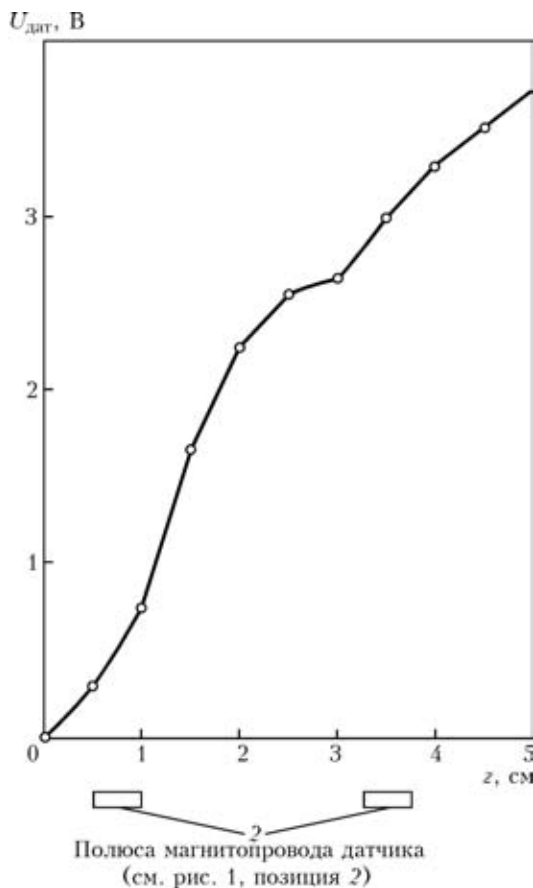


Рис. 3. Выходная характеристика датчика уровня металлической ванны

Упрощенная принципиальная схема измерения уровня металлической ванны приведена на рис. 2. Контур, состоящий из возбуждающей катушки L1

и конденсатора C1, включен в одно из плеч моста (резисторы R1–R3). Мост питается синусоидальным напряжением 10 кГц от генератора на микросхемах DD1, DD2, DD3, DS1, A1, A2. На микросхемах DD1 и DD2 собран задающий генератор прямоугольных колебаний, стабильность частоты которого обеспечивается кварцевым резонатором GB1. Эти колебания поступают на вход счетчика импульсов DD3. Его выходной код последовательно адресует постоянное запоминающее устройство DS1, в котором записан код синусоиды. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) A1 и операционный усилитель A2 преобразуют этот код в синусоидальное напряжение питания измерительного моста.

Контур L1, C1 настроен в резонанс на частоту питающего напряжения, когда уровень металлической ванны находится ниже нижнего полюса магнитопровода датчика уровня. В этом положении металлической ванны мост настраивается на минимальный (близкий к нулю) сигнал в его диагонали. При повышении уровня металлической ванны относительно нижнего полюса магнитопровода, возбуждаемые в ней вихревые токи изменяют активное и индуктивное сопротивления контура. Возникающее при этом напряжение разбаланса моста усиливается дифференциальным усилителем A3 и выпрямляется двухполупериодным выпрямителем на операционных усилителях A4, A5 и диодах D1, D2.

Использование резонанса значительно повышает чувствительность датчика, но предъявляет повышенные требования к стабильности частоты



и нелинейным искажениям питающего синусоидального напряжения. По этой причине и применен столь сложный генератор напряжения питания измерительного моста. На рис. 3 приведена типовая зависимость выходного напряжения датчика  $U_{дат}$  от уровня металлической ванны.

В рабочем диапазоне изменения уровня поверхности металлической ванны передаточная харак-

теристика датчика достаточно линейна для автоматической стабилизации уровня ванны.

1. *Электрошлаковая сварка* / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Машгиз, 1956. — 168 с.
2. *Автоматизация сварочных процессов* / Под ред. В. К. Лебедева, В. П. Черныша. — Киев: Вища шк., 1986. — 296 с.
3. *Автоматичне керування електрозварювальними процесами і установками*: Навч. посібник / За ред. В. К. Лебедева, В. П. Черныша. — К.: Вищ. шк., 1994. — 391 с.

An inductive sensor of the liquid metal pool level for ESW is described, which is characterized by an increased sensitivity and stability.

Поступила в редакцию 15.11.2006

УДК 621.791(088.8)

## ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА\*

**Электродное покрытие для дуговой сварки**, отличающееся тем, что в него дополнительно введены железный порошок, алюмомагний, ферромолибден, кварцевый песок при следующем соотношении компонентов, мас. %: 16...19 железного порошка; 5...6 ферромарганца; 6...7 ферросилиция; 1...2 ферромолибдена; 1...2 алюмомагния; 1...2 кварцевого песка; 6...7 рутила; 3...4 полевого шпата; 2...4 каолина; 10...12 плавикового шпата; 1...2 органического пластификатора; остальное мрамор. Патент РФ 2293007. Г. М. Агапкин, Е. В. Ашихмин, Е. А. Веревкина, А. П. Волохов (ЗАО «Сибэс») [4].

**Состав электродного покрытия для дуговой сварки**, отличающийся тем, что в него дополнительно введены железный порошок, кварцевый песок, каолин, мрамор, целлюлоза электродная и КМЦ при следующем соотношении компонентов, мас. %: 1...2 железного порошка; 7...10 ферромарганца; 3...4 кварцевого песка; 3...4 полевого шпата; 11...13 каолина; 7...10 мрамора; 5...7 целлюлозы электродной; 0,5...1 КМЦ; остальное рутил. Патент РФ 2293008. Г. М. Агапкин, Е. В. Ашихмин, Е. А. Веревкина, А. П. Волохов (То же) [4].

**Способ механизированной импульсной сварки плавающим электродом в среде углекислого газа во всех пространственных положениях**, отличающийся тем, что сварку осуществляют с низкочастотной модуляцией сварочной ванны «точками», размер и перекрытие которых задают системой управления, при этом во время импульса сварку ведут на возрастающей вольтамперной характеристике (ВАХ) дуги и жесткой ВАХ источника питания с образованием сварочной ванны заданного объема, которую за время паузы частично кристаллизуют, для чего сварку ведут на жесткой ВАХ дуги и внешней крутопадающей ВАХ источника питания. Патент РФ 2293630 [5].

**Сварочный агрегат**, содержащий генератор, выпрямитель, сварочные электроды, корректирующее звено, регулятор тока, пороговый блок, отличающийся тем, что в него дополнительно введен блок импульсной модуляции, при этом выход выпрямителя соединен с входом корректирующего звена, выходом регулятора тока и входом порогового блока, выход корректирующего звена соединен с входом блока импульсной модуляции, а выходы блока импульсной моду-

ляции и порогового блока соединены с входом регулятора тока. Патент РФ 2293631. В. А. Фролов, В. А. Яровой [5].

**Способ соединения стальных деталей**, отличающийся тем, что соединяет стальные детали аргонодуговой сваркой, а нанесение покрытия осуществляет после сварки плазменным напылением на сварочный шов и зону его термического влияния после охлаждения зоны сварки ниже температуры плавления сварного шва, причем плазменное напыление осуществляется материалом соединяемых деталей. Патент РФ 2293632. Ж. М. Бледнова, А. В. Вотинов, М. И. Чаевский, Д. А. Стрелевский (Кубанский ГТУ) [5].

**Устройство для формирования соединения при контактной стыковой сварке трубы с заглушкой**, отличающееся тем, что токоподводящая и формообразующая части конструктивно выполнены единым целым в виде металлической разрезной пластины, разделенной на секторы по плоскостям, проходящим через отверстие для размещения конца трубы, при этом диаметр указанного отверстия в токоподводящей части выполнен равным или большим диаметра отверстия в его формообразующей части. Патент РФ 2293633. А. А. Белов, А. А. Градович, М. Г. Зарубин и др. (ОАО «Новосибирский завод химконцентратов») [5].

**Способ контактно-стыковой сварки трубы с заглушкой**, отличающийся тем, что сварочный ток и усилие к заглушке подводят в различных ее поперечных сечениях, при этом поверхность для подвода сварочного тока к заглушке располагают параллельно оси заглушки и под углом 90° к поверхности для подвода сварочного усилия между указанной поверхностью и частью заглушки, ввариваемой в трубу. Патент РФ 2293634. А. А. Кислицкий (То же) [5].

**Способ контактно-стыковой сварки трубы с заглушкой**, отличающийся тем, что сварку осуществляют с преимущественным разогревом заглушки, в процессе перемещения заглушки между поверхностью ее ввариваемой части и внутренней поверхностью трубы по ходу движения заглушки вне зоны термического влияния в оболочке трубы формируют посадочное место, а большую часть грата, образовавшегося при сварке, и зону с максимальными структурными изменениями, вызванными термическим влиянием, выводят наружу, располагая зону с максимальными структурными изменениями вне зоны сварного шва и используя выведенный наружу грат для формирования плавного сопряжения между

\*Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетене РФ «Изобретения. Полезные модели» за 2007 г. (в квадратных скобках указан номер бюллетеня).



наружной поверхностью трубы и заглушкой. Патент РФ 2293635. А. А. Кислицкий, А. М. Лузин (То же) [5].

**Способ контактно-стыковой сварки оболочки твела у заглушкой**, отличающийся тем, что сварку осуществляют на режимах, обеспечивающих распределение между площадями выдавленных из стыка участков внутреннего, находящегося под оболочкой, и наружного металла-грата в соотношении, не превышающем трех, а отношение площадей участков внутреннего металла-грата, расположенных с двух сторон в любом диаметральном сечении сварного соединения, выполненном вдоль его оси, не более двух. Патент РФ 2293636. А. А. Кислицкий, А. М. Лузин, М. Г. Зарубин, А. В. Струков (То же) [5].

**Способ стыковой сварки оплавлением стальных полос**, отличающийся тем, что при сварке полос разных сечений с шириной  $B > b$  или с толщиной  $H > h$ , где  $B$  и  $b$  — ширина соответственно широкой и узкой полосы,  $H$  и  $h$  — толщина соответственно толстой и тонкой полосы, величину  $\Delta$  принимают постоянной, при этом при разноширинности полос  $B - b \leq 200$  мм или разнотолщинности полос  $H - h \leq 1$  мм стыкуемые концы полос смещают в продольном направлении из под электродов на величину  $(0,5...0,55)h$ , где  $h$  — средняя толщина металла, свариваемого на данной стыковочной машине, а сварку производят либо по режимам для толщины  $H$ , либо по режимам для толщины  $(H + h):2$ , причем при смещении узкий или тонкий конец умещают в сторону широкого или толстого конца. Патент РФ 2293637. Р. С. Тахаутдинов, А. П. Буданов, В. Г. Антипанов и др. (ОАО «Магнитогорский меткомбинат») [5].

**Способ металлического соединения торцевых поверхностей стержней**, отличающийся тем, что осуществляют выверку по параллельности нормалей к концам стержней и осевое выравнивание стержней в одну линию, после чего их выверенные торцевые поверхности подводят друг к другу и нагружают давлением, при этом осуществляют вибрационное движение концов стержней в противоположном направлении относительно друг друга с обеспечением их упругого изгиба и выделения на соприкасающихся поверхностях теплоты трения, а при достижении условий для металлического соединения концы стержней выравнивают в осевом направлении и нагружение давлением торцевых поверхностей увеличивают с обеспечением соединения стержней по всей поверхности. Патент РФ 2293638. Х. Пфайлер (Фоестальнике Шинен ГмбХ, Австрия) [5].

**Способ образования стыковых сварных швов на трубах**, отличающийся тем, что после сварки с температуры нагрева стыка соединяемых элементов осуществляют его горячую пластическую деформацию радиальным обжимом посредством радиального перемещения деформирующих сегментов с кольцевыми канавками, при этом первоначально горячей пластической деформации подвергают металл присадочной проволоки усиления с частичным заполнением свободных объемов кольцевых канавок деформирующих сегментов и формированием зоны затрудненной деформации, при дальнейшем радиальном перемещении деформирующих сегментов осуществляют внедрение образованной зоны затрудненной деформации в сварной шов и его деформацию, а на завершающей стадии осуществляют совместную деформацию сварного шва и околшовных зон на оправке из закаленной стали за счет создания трехосного неравномерного сжатия сварного шва, при этом оправку размещают по местоположению сварного шва в полости соединяемых элементов перед осуществлением горячей пластической деформации. Патент РФ 2293639. С. И. Козий, Г. А. Батраев, С. С.

Козий (Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева) [5].

**Проволока для наплавки стальная высокохромистая**, отличающаяся тем, что она содержит в своем составе элементы в следующем соотношении, мас. %: углерод 0,38...0,42; кремний 0,50...0,80; марганец 0,80...1,20; хром 15,0...17,0; титан 0,30...0,50; бор до 0,006. Патент РФ 2293640. В. А. Коробков, И. Д. Михайлов, Э. Ж. Агафонов (ООО «Композит») [5].

**Резак для кислородной резки металлов**, отличающийся тем, что резак снабжен штуцерами для подвода и отвода охлаждающей воды, смонтированными на верхней головке, в мундштуке выполнены дополнительные каналы для подогревающей смеси, в стенках кольцевых канавок мундштука выполнены глухие радиальные отверстия, связанные с основными каналами для подогревающей смеси и имеющие на выходе кольцевой канавки местное калиброванное сужение, а на конической посадочной поверхности мундштука дополнительно выполнена кольцевая канавка, сопряженная с дополнительной кольцевой канавкой, выполненной на боковой поверхности усеченного конического отверстия, с образованием закрытой кольцевой полости для охлаждающей воды. Приведены и другие отличительные признаки. Патент РФ 2294268. А. А. Михайлов, Г. К. Сухинин, А. Н. Красильников (ОАО «ВНИИавтогенмаш») [6].

**Устройство для формирования импульсов сварочного тока**, отличающееся тем, что дроссель последней выходной ячейки выполнен в виде быстронасыщающегося дросселя, а последовательно с зарядным дросселем дополнительно введен зарядный тиристор, включаемый синхронно и синфазно с тиристорами полууправляемого выпрямителя. Патент РФ 2294269. А. Ф. Князьков, С. А. Князьков, Я. С. Лолоу, А. Б. Проняев (Томский политехнический университет) [6].

**Однороликовый раскатник для диффузионной сварки труб**, отличающийся тем, что на торце приводного вала установлен стакан, внутри которого на двух полуосях, закрепленных в его стенке, установлен с возможностью качения корпус с подшипниками, а в стенке стакана выше полуосей имеется устройство для изменения величины эксцентриситета раскатного ролика путем изменения угла наклона корпуса с подшипниками относительно оси вращения приводного вала. Патент РФ 2294270. А. Н. Семенов, В. П. Гордо, Г. Н. Шевелев (НИКИ энерготехники им. Н. А. Доллежала) [6].

**Способ соединения деталей из материалов с покрытием**, отличающийся тем, что покрытие выполняют многослойным, на сформированных отбортовках до нанесения покрытия выполняют выступы с образованием под ними полости, а при сборке обеспечивают соприкосновение по поверхностям выступов для последующей по ним сварки, при этом часть поверхности отбортовки под выступами выполняют без внутреннего слоя покрытия, а часть полости между выступами и торцом внутреннего слоя покрытия заполняют материалом наружного слоя или слоев, причем толщину выступа выполняют не менее суммарной толщины внутреннего и наружного слоя или слоев покрытия, а в качестве наружного слоя или слоев покрытия используют материал, термопластичный при высоких температурах в процессе сварки. Патент РФ 2294271. А. Н. Сорокин, В. В. Фельдшерова, С. А. Агафонов, Ф. Ф. Исламгулов (ФГУП РФЯЦ-ВНИИТФ) [6].

**Сварочная активированная проволока для сварки и наплавки**, отличающаяся тем, что покрытие на нем выполнено в виде электролитически полученного микрокомпозита,





включающего металлическую матрицу с равномерно распределенной в ней дисперсной фазой из порошка активирующего флюса при следующем соотношении объемов металла и активирующего флюса, об. %: 60...95 металла; 5...40 активирующего флюса. Патент РФ 2294272. С. Г. Паршин, С. С. Паршин [6].

**Порошковая проволока для наплавки**, отличающаяся тем, что шихта дополнительно содержит хром и феррониобий, а также газшлакообразующие компоненты: флюорит, полевой шпат и криолит при следующем соотношении компонентов, мас. %: 12,0...14,0 хрома; 4,0...7,0 флюорита; 1,5...2,9 ферромolibдена; 1,0...4,5 никеля; 2,0...4,0 полевого шпата; 1,0...4,0 феррохрома; 0,3...3,0 ферротитана; 0,7...1,6 марганца; 0,2...1,0 феррованадия; 0,5...0,7 криолита; 0,16...0,56 феррониобия; 0,2...1,2 ферросилиция; 0,2...1,84 железа; остальное малоуглеродистая сталь оболочки. Патент РФ 2294273. А. В. Березовский, А. Н. Балин, Б. В. Степанов и др. (ЗАО «Завод сварочных материалов») [6].

**Устройство для автоматической сварки**, отличающееся тем, что оно дополнительно содержит сборочный стенд с направляющими, кронштейны для крепления сварочных аппаратов с горелками, горизонтальные оси для поворота вокруг них кронштейнов в направлении сварного шва, закрепленные на кронштейнах, горизонтальные оси для поворота вокруг них сварочных горелок перпендикулярно направлению сварного шва и силовые цилиндры, при этом несущая конструкция выполнена в виде самоходного портала. Приведены и другие отличительные признаки. Патент РФ 2294274. Д. П. Хоренко, А. С. Самгородский, В. И. Приходько и др. (ОАО «КВСЗ», Украина) [6].

**Установка для дуговой сварки и термической обработки** изделий в едином защитном газе, содержащая сварочную камеру и сварочную горелку, отличающаяся тем, что она содержит устройство для термической обработки, выполненное в виде печи или теплоизолированной оболочки, рабочий объем которой является объемом сварочной камеры. Патент РФ 2294821. А. М. Смыслов, А. Н. Исанбердин, Д. Р. Таминдаров, А. Д. Мингажев (Уфимский авиационный технический университет) [7].

**Способ автоматической аргодуговой сварки труб из стали аустенитного класса**, отличающийся тем, что разделку кромок осуществляют с выполнением уса толщиной 2,7...3,0 мм, сварку первого прохода выполняют с погонной энергией 0,35...0,55 МДж/м на импульсном токе, сварку второго прохода выполняют с погонной энергией 0,6...0,86 МДж/м на импульсном токе при поперечных колебаниях электрода, а сварку третьего и последующих проходов выполняют с погонной энергией 0,62...1,16 МДж/м стационарным током с поперечными колебаниями электрода. Патент РФ 2294822. С. М. Ковалев, С. Н. Харахнин, А. Д. Секач и др. (Концерн «Росэнергоатом») [7].

**Устройство для дистанционного регулирования сварочного тока**, отличающееся тем, что пульт управления состоит из металлического корпуса для обеспечения электрического контакта со свариваемым изделием, управляющих контактов, выполненных с возможностью электрического контакта со сварочным электродом, и размещенного в упомянутом корпусе высокочастотного генератора, подключенного к металлическому корпусу и управляющим контактам, получаю-

щего питание от сварочного источника и передающего команды управления в виде ВЧ-сигналов в блок управления по сварочным кабелям, а блок управления содержит высокочастотный приемник команд управления и исполнительный элемент, воздействующий на регулятор тока сварочного источника питания. Патент РФ 2295427. О. П. Лещев [8].

**Способ сварки оплавлением стальных рулонных полос**, отличающийся тем, что основные параметры процесса сварки выбирают в зависимости от номинальной толщины металла  $H$ , при этом величину оплавления принимают равной  $\Delta = 8,8\sqrt{H}$ , мм, величину осадки  $\delta = 2,0H^{0,7}$ , мм, а время осадки под током  $\tau = 0,33H^{0,45}$ , с. Патент РФ 2295428. Г. С. Сеничев, А. П. Буданов, В. Г. Антипанов и др. (ОАО «Магнитогорский меткомбинат») [8].

**Способ модифицирования структуры заготовки**, при котором на первом этапе осуществляют относительное перемещение энергетического луча и заготовки так, что область заготовки плавится и расплавленный материал смещается, образуя выступ на первом участке области и отверстие на другом участке области, на втором этапе позволяют расплавленному материалу по меньшей мере частично затвердеть, после этого на третьем этапе повторяют первый этап один или более раз, причем область, соответствующая каждому повторению, пересекает область, в которой осуществляют первый этап. Патент РФ 2295429. Б. Г. И. Данс, Ю. Д. К. Келлар (Дзе Велдинг Инститьют, Великобритания) [8].

**Переходник для сварки труб из нержавеющей стали с трубами из циркониевых сплавов**, отличающийся тем, что длина цилиндрической ступенчатой поверхности составляет 0,2...0,35 длины конической поверхности, а выступы и впадины имеют резьбовой профиль с углом при вершине 45...60°. Патент РФ 2295430. В. А. Агапитов, А. Л. Беляев, А. М. Блинов и др. (ОАО «ЧМЗ») [8].

**Агломерированный флюс марки 48АФ-55** для автоматической сварки низколегированных сталей, отличающийся тем, что он содержит дополнительно рутиловый и железорудный концентраты, алюминий металлический и модификатор, полученный плавлением фторида кальция и оксидов кальция, алюминия, марганца и кремния при следующем соотношении компонентов, мас. %: 28...33 электрокорунда; 10...16 обожженного магнетита; 4,0...8,0 рутилового концентрата; 0,4...0,5 железорудного концентрата; 45...50 сплава-модификатора; 2,0...3,0 марганца металлического. Патент РФ 2295431. И. В. Горынин, В. А. Малышевский, Р. В. Бишоков и др. (ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей») [8].

**Устройство для центрирования труб при стыке под сварку**, отличающееся тем, что оно дополнительно содержит опоры, прижимные пяты, фиксаторы и пружины возврата зажимов с прижимными элементами в исходную позицию, при этом направляющая выполнена в виде трубы, в стенке которой выполнены продольно-щелевидные канавки, расположенные по окружности через 120°, опоры установлены с возможностью перемещения вдоль направляющей трубы и выполнены в виде двух крайних и двух срединных съемных колец. Приведены и другие отличительные признаки. Патент РФ 2295432. И. Р. Кузеев, М. И. Кузеев, А. Г. Чиркова и др. (ООО НПЦ «Техпроект») [8].



## По зарубежным журналам\*

*AUSTRALASIAN WELDING JOURNAL (Австралия) 2006. —  
Vol. 51, Second Quarter (англ. яз.)*

**Raj B., Venkatraman B.** Надежные неразрушающие испытания в Центре ядерных исследований им. Индиры Ганди, с. 4–9.

**Dobmann G.** Инновация в области неразрушающих испытаний в Институте Фраунхофер, Германия, с. 10–12.

**Neeson H.** Неразрушающие испытания на Эскеме, с. 13–14.

**Международный конгресс МИС, Сидней 2007 г., с. 15.**

**Walker S.** Выявление коррозии в трубах, с. 16.

**Канадская программа сертификации, с. 17–19.**

**Обучение** и контроль применительно к трубопроводам, с. 20–23.

**Выставка WELDTECH, с. 24–25.**

**Обзор стандартов** по австралийскому оборудованию давления, с. 26–27.

**Singh K. et al.** Утилизация шлака после дуговой сварки под флюсом, с. 34–38.

**Datta S. et al.** Статическое моделирование с целью прогнозирования объема валиков при дуговой сварке под флюсом, с. 39–47.

*BIULETYN INSTYTUTU SPAWALNICTWA w GLIWICACH (Польша) 2006. —  
Roc. 50, № 5 (пол. яз.)*

**Mikno Z.** Одномерная модель сварки давлением, с. 35–40.

**Brozda J.** Аустенитные стали нового поколения, применяемые в энергетическом оборудовании, работающем на сверхкритических режимах, и их сварка, с. 40–48.

**Czuchryj J., Sikora S.** Радиографический контроль сварных соединений в изделиях из термопластов, с. 48–53.

**Popescu M. et al.** Восстановление трамвайных рельсов путем наплавки без монтажа на предприятии общественного транспорта в г. Арад (Румыния), с. 54–62.

*CHINA WELDING (Китай) 2006. — Vol. 15, № 1 (англ. яз.)*

**Li Ch. et al.** Исследование пористости сварки титанового сплава CO<sub>2</sub>-лазером, с. 1–5.

**Yanjun Z. et al.** Повышение качества швов стали 09Mn с помощью ультразвуковых колебаний дуги, с. 6–10.

**Jiasheng Z. et al.** Исследование межфазной структуры и прочности соединения Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ti/Cu/Ti/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с частичной переходной жидкой фазой, с. 11–15.

**Guijeng Z. et al.** Соединение металлических стержней с помощью нового переходного-диффузионного процесса высокотемпературной пайки, с. 16–19.

**Yanbin Ch. et al.** Новый гибридный метод — импульсная гибридная сварка CO<sub>2</sub>-лазером ТИГ с согласованным управлением, с. 20–25.

**Jijin Xu et al.** Исследование коррозионного растрескивания под напряжением титанового сплава в водяной петле высокой температуры и давления, с. 26–29.

**Aiqin D. et al.** Сварочная ванна и область температур при сварке CO<sub>2</sub>-лазером, с. 30–33.

**Hongyun Zh. et al.** Исследование улучшенных свойств сварных соединений сверхмелкозернистой стали 400 МПа с

\* Раздел подготовлен сотрудниками научной библиотеки ИЭС им. Е. О. Патона. Более полно библиография представлена в Сигнальной информации (СИ) «Сварка и родственные технологии», издаваемой в ИЭС и распространяемой по заявкам (заказ по тел. (044) 287-07-77, НТБ ИЭС).



помощью механического поверхностного упрочнения, с. 34–38.

**Shaohui Yun et al.** Распознавание образов на основе байесовского подхода принятия решений на спектральном сигнале режимов переноса металла, с. 39–42.

**Limin Ch. et al.** Влияние термообработки на микроструктуру и твердость слоя, наплавленного C–Cr–W–Mo–V–RE на основе Fe, с. 43–48.

**Xuesong L. et al.** Исследование метода сварки ТИГ двумя электродными проволоками, с. 49–52.

**Shujun Ch. et al.** Новый дуговой сварочный преобразователь с коэффициентом мощности на основе цифровой обработки сигналов, с. 53–56.

**Xiaowen Liu et al.** Установка для сварки кольцевых швов охлаждающего компрессора вихревого типа в кондиционере воздуха, с. 57–60.

**Lijun Liu et al.** Исследование сети связи при передаче проволоки на большое расстояние в процессе дистанционной сварки, с. 61–66.

**Ke Z. et al.** Исследование подвижного сварочного робота с искусственным интеллектом с функцией автоматического поиска линии сварки, с. 67–73.

**Zhijun H.** Свариваемость и проволока для сварки под флюсом трубной стали X80, с. 74–80.

*DER PRAKTIKER (Германия) 2006. — 8 (нем. яз.)*

**Экспонаты**, представленные на выставке «ЕВРОЛИСТ» 24–26 октября 2006 г., с. 226–231.

**Schuster J., Schulze E., Sanntag G.** Контроль сварных швов металлографическими методами, ч. 1, с. 232–237.

**Vollrath K.** Роль развития технологий в глобальном прогрессе сварки и резки, с. 238–240.

**Hoffmann K.** Использование программного обеспечения экономит 70 % времени при сварке, с. 242–247.

**Polrolniczak H., Aretz W.** Дефекты и их предупреждение при контактной сварке. Ч. 2: Сварная точка — выполнение и контроль простыми способами, с. 248–251.

**Feil T.** Информация о гарантии при приобретении и ремонте оборудования и программного обеспечения, с. 252–253.

**Zwatz R.** Изменения в DIN EN 287-1:2006 и причины, с. 254.

*DER PRAKTIKER (Германия) 2006. — № 9 (нем. яз.)*

**Reimer G.** Система компенсации клещей при роботизированной точечной контактной сварке, с. 258.

**Эффективность** защиты сварщика при монтаже в судостроении, с. 259.

**Перераспределение** ответственности в DVS, с. 260.

**Сварка** и резка на выставке «ЕВРОЛИСТ 2006». Ч. 2, с. 261–269.

**Polrolniczak H., Aretz W.** Дефекты и их предупреждение при контактной сварке. Ч. 3. Факторы влияния и настройка машин, с. 270–278.

**Schuster J. et al.** Металлографические методы контроля сварных швов. Ч. 2: Оценка, контроль твердости под микроскопом с малой нагрузкой, с. 279–283.

**Storch W. et al.** Найденные благодаря сварочной технике решения по профилактике и модернизации компонентов газовых турбин, с. 286–288.

*PRZEGLAD SPAWALNICTWA (Польша) 2006. — № 7 (пол. яз.)*

**Tasak E. I. et al.** Трещинообразование сварных соединений, эксплуатируемых при повышенных температурах, с. 6–9.

**Ferenc K.** Водоструйная резка, с. 10–15.

**Nowacki J. I. et al.** Пайка нагревательного, водного оборудования и оборудования для кондиционирования, изготовленных из меди и ее сплавов, с. 25–28.

**Nejwowski T., Nastaj T.** Изучение износостойкости покрытия в скользящем контакте, с. 29–32.

**Pakos R.** Условия признания предприятий и лабораторий Польским Реестром имущества, с. 33–36.

**Bartnik Z., Derlukiewicz W.** Факторы, влияющие на прочность электродов для сварки трением с перемешиванием, с. 36–38.

*PRZEGLAD SPAWALNICTWA (Польша) 2006. — № 8 (пол. яз.)*

**Walczak W.** Исследовательские работы на кафедре технологии материалов машин и сварки Гданьского политехнического университета, с. 3–9.

**Cukrowski P., Nowacki J.** Ремонт баков и котлов давления, с. 10–17.

**Szefner Z.** Размышления о рекомендации по подбору расхода защитного газа, с. 18–22.

**Rosochowicz K., Duda D.** Технология сварки в судостроении, с. 23–25.

*PRZEGLAD SPAWALNICTWA (Польша) 2006. — № 9–10 (пол. яз.)*

**Kensik R.** Оценка линейной энергии при МИГ/МАГ процессах, с. 5–8.

**Nowacki J., Rybicki P.** Влияние тепловложения на коррозионностойкость сварных швов из стали дуплекс при использовании метода SAW, с. 9–11.

**Саморегулируемость** дуги при импульсной сварке МИГ/МАГ, с. 12–15.

**Gruszczak A.** Свариваемость стали контролируемой прокатки, с. 16–19.

**Mikno Z.** Интенсификация охлаждения при сварке сопотивлением с применением охлаждения туманом, с. 20–23.

**Senkara J., Zhang H.** Механизм и технологические факторы, влияющие на трещинообразование сплава AlMg3 при многоточечной контактной сварке, с. 24–28.

**Adamiec J., Adamiec P.** Технологические аспекты сварки стали дуплекс, с. 29–31.

**Dzioba I., Skrzypczyk A.** Свойства и микроструктура стыковых соединений из стали 18G2A, выполненных методом МАГ, с. 32–35.

**Krawczyk R. et al.** Сварка способом МАГ толстостенных энергетических трубопроводов из стали 13НMF — оптимизация условий процесса, с. 36–43.



**Ptak W., Wojciechowski W.** Методы повышения качества сварных соединений, с. 44–45.

**Wilczacki A., Kaczmarek R.** Аспекты качества при производстве сварочной проволоки, с. 46–48.

**Ambroziak A., Gul B.** Обработка нахлесточных швов морских опор из низкоуглеродистой стали под водой с помощью метода FHPP, с. 49–51.

**Weglowski M. et al.** Изучение технических характеристик источников питания дуговой сварки, с. 52–55.

**Siennicki A.** Новаторское применение роботов для сварки способом МИГ/МАГ, с. 56–59.

**Thomas A., Nowak M.** Новое поколение сварочных роботов с новаторским процессом сварки SP-MAG, с. 60–63.

**Mirski Z. et al.** Клейка и пайка спеченных карбидов после электролитического травления, с. 64–67.

**Winiowski A.** Пайка нержавеющей стали с алюминием и титаном, с. 68–71.

**Klimpel A. et al.** Плазменная пайкосварка РТА стыковых соединений кузовов автомашин из стальных листов, гальванизированных с двух сторон цинком, с. 72–75.

**Gorka J.** Влияние термической строжки на свойства термически обработанной стали S420 MC, с. 76–79.

**Chmielewski T.** Напыление металлических покрытий на керамические подложки с использованием метода детонационного напыления, с. 80–83.

**Zorawski W.** Свойства покрытий NiCrBSi, наносимые ультразвуковым и плазменным методами, с. 84–86.

**Radek N. et al.** Лазерная обработка покрытий WC-Co электроискровым методом, с. 87–90.

**Zajac A., Wielgosz R.** Влияние метода резки на изменение структуры стали типа HARDOX, с. 93–96.

*RIVISTA ITALIANA DELLA SALDATURA (Италия) 2006. —  
An. LVIII. — № 4 (итал. яз.)*

**Ottonello G. B.** Разные типы карбидов вольфрама для сварки, с. 481–495.

**Volpone L. M., de Leo F.** Обзор грунтовых покрытий для защиты конструкционных материалов, их свойства и объективный анализ для составления рекомендаций по возможным областям применения, с. 497–504.

**Canale G., Cosso G.** Анализ соответствия назначению для оценки стабильности производственных дефектов (непрова-

ров) в процессе периодического контроля сварных соединений труб с трубными досками теплообменника, с. 509–513.

**Penasa M., Rivela C.** Лазерная сварка применительно к алюминиевым сплавам, с. 517–524.

**Moliterni L.** Сварка в электронике (микросоединение). Бессвинцовые припои, с. 527–534.

*SCHWEISSEN und SCHNEIDEN (Германия) 2006. —  
№ 6 (нем. яз.)*

**Особенно** стабильная дуга при сварке благодаря добавке кислорода, с. 276–278.

**Karpenko M., Sovetchenko P.** Лазерная сварка многослойных соединений тонких листов с покрытием, с. 282–287.

**Sievers E.-R.** Нестабильность жидкой ванны при ЭЛС толстого листа, с. 288–295.

**Dilthe U., Woeste K.** ЭЛС комбинаций металлических материалов, с. 296–300.

**Siegmann E.-O., Spiegel-Ciobanu V. E.** Исследование методов измерения и контроль эмиссии озона при сварке, с. 301–309.

**Безопасная** работа с оборудованием для контактной сварки, с. 310–312.

**Работа** службы информации — Обзор литературы «Сварка и родственные технологии», с. 313–317.

**Сварка** гильз подвижной дугой

**Высокопроизводительный** способ соединения толстостенных труб из высокопрочной стали

**Обеспечение** качества пластмассовых деталей

**Исследование** аномалий осаждения в химической системе NiP/ Au

**Влияние** состава припоя на строение структуры в магниевом паяном соединении

**Практические** аспекты к теме Bleck Pad

**Влияние** состава припоя на структуру магниевых сварных соединений

**Исследование** структуры паяных смешанных соединений между магнием и алюминием или сталью

**Обработка** лазерным лучом в серийном производстве пластмассовых изделий

**Двухкомпонентный** клей для автомобильной промышленности

**Метод** конечных элементов используется для расчета клееных гибридных структур

**Аспекты** склеивания магниевых материалов

**Коллоквиум** в Думсбурге «Дуговая сварка», апрель 2006., с. 317.

**Roos E. Deimel P.** Применение и поведение материалов и компонентов в энергетике и аппаратостроении. Симпозиум в Штутгарте, октябрь 2005, с. 320–324.



## ВЫСТАВКА «СВАРКА. РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – 2007» В КИЕВЕ

16–19 апреля 2007 г. в выставочном центре «КиевЭкспоПлаза» прошли промышленные выставки ПАТОН ЭКСПО, объединившие такие экспозиции, как «Сварка. Родственные технологии — 2007», «Трубопроводный транспорт — 2007», «Не разрушающий контроль — 2007», «Промышленная окраска и защита от коррозии — 2007», «Промышленная экология — 2007», организатором которых выступил Центр трансфера технологий ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины при поддержке Общества сварщиков Украины, НАК «Нефтегаз Украины», Ассоциации ОКО, Ассоциации промышленного арматуростроения Украины, Ассоциации производителей и строителей полимерных трубопроводов Украины.

Всего в рамках экспозиции «Сварка. Родственные технологии» приняли участие 46 организаций, фирм и компаний из Украины, России, Польши, Турции, Италии, Германии, Японии. Среди участников выставки Технопарк ИЭС им. Е. О. Патона, собственно Институт электросварки, ОКБ, его опытные заводы ОЗСМ и ОЗСО, НТЦ «СЕПРОЗ», Межотраслевой учебно-аттестационный центр, широко известные украинские предприятия и фирмы — «КЗЭСО», «СЭЛМА», «Фрониус-Украина», «Коммунар», «Бинцель-Украина», «СимЗ», «ДОНМЕТ», «НАВКОТЕХ», «АРКСЭЛ», «Артем-Контакт», «ЗОНТ», «Интерхим-БТВ», «Линде Газ Украина», «РУСО» и др., российские — «ГРПЗ», «Межгосметиз», «Плазма», ОКБ «Булат». Продукцию компаний дальнего зарубежья представили фирмы «Фрониус Украина», «Полисуд», «Эккерт», «Панасоник», представительства «ЭСАБ», «Boehler», «Токио Бозки», «Элме Мессер Украина», компании «Нелсон», фирмы «Аскайнак», «Mgm», «ЕП Системс».

Выставка традиционно продемонстрировала современное состояние и тенденции в разработке и про-



изводстве широкого спектра оборудования различного назначения — от простых и доступных систем для ручной дуговой сварки до совершенных разработок механизированного и автоматизированного оборудования (полуавтоматов, сварочных тракторов, автоматов), оборудования с компьютеризированным управлением.

Наиболее широкую линейку оборудования для дуговых и плазменных процессов сварки и резки предлагали «КЗЭСО», «СЭЛМА», «Фрониус-Украина», «Коммунар» и ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона (Украина), а также НПП «Плазма» (Ростов-на-Дону, Россия). Расширило номенклатуру производимого оборудования ОАО «СимЗ». К новым видам продукции последней относятся инверторные сварочные установки типа ВДЧ-201 УЗ.1 Пульсер, предназначенные для ручной (ММА) дуговой сварки плавящимися металлическими электродами и аргодуговой сварки (ТИГ-Дс) в непрерывном и пульсирующем режимах, инверторные выпрямители типа ВДЧ-201 УЗ.1, ВДЧ-2001М УЗ.1.





Впервые в Украине экспонировалось (Токио Воски Лтд.) японское сварочное оборудование от компании «Денуо», представляющие собой сварочные дизель-генераторы серий DAW, TLW, DLW с низким потреблением топлива, минимальным уровнем шума, высокими рабочими характеристиками и минимальным экологическим воздействием. Они отличаются надежностью, долговечностью, качеством и экономичностью.

Разнообразное оборудование для термической, микроплазменной, газокислородной, плазменной и гидроабразивной резки продемонстрировали «ЗОНТ» (Украина), компании «МКТ», «Mgm» (Чехия), «Эккерт» (Германия). Последняя является одним из европейских лидеров в производстве машин для фигурной термической резки, включая и производство машин для лазерной резки. «Эккерт» предлагает многофункциональные машины для резки, оснащенные системами сверления, нанесения маркировки, газокислородной и плазменной резки, кернения. Станки для лазерной и плазменной резки с ЧПУ от компании MiltiCam (США) в Украине предлагает торгующая фирма «Ви АрСапплай».

Значительно скромнее на выставке были представлены производители сварочных материалов. Следует отметить лишь экспозиции «АРКСЭЛ», ОЗСМ им. Е. О. Патона, СМПО им. М. В. Фрунзе (Украина), Интерхим — БТВ, представительства ЭСАБ. Тем не менее посетителям выставки была представлена обширная гамма материалов для различных способов дуговой сварки, резки и наплавки, в том числе и для выполнения ремонтно-восстановительных работ.

На стенде «ИЭС им. Е. О. Патона» были представлены приоритетные направления работ института, которые были также отражены в распростра-

няемом на выставке каталоге «Технологии. Материалы. Оборудование» (около 300 разработок института за последние 5...8 лет). Посетители стенда интересовались новыми разработками института, в ряде случаев обращались с конкретными предложениями по сотрудничеству. Внимание их привлек новый аппарат для электрошлаковой сварки АШ 115М, хорошо зарекомендовавший себя при выполнении неповоротных кольцевых стыков заготовок опорных колец кислородных конверторов на ОАО «Азовмаш», установка для микроплазменной сварки, а также комплекс аппаратуры для неразрушающего контроля качества и определения напряженно-деформированного состояния конструкций на основе методов электронной ширографии и спекл-интерферометрии.

В заключение следует отметить, что ежегодная выставка «Сварка. Родственные технологии» закрепила за собой имидж основной профильной выставки Украины. За четыре дня работы ее посетило свыше 3 тыс. посетителей, среди которых руководители и представители технических служб промышленных, государственных и коммерческих организаций, научные сотрудники НИИ, конструкторы, преподаватели и студенты средних и высших учебных заведений, предприниматели и просто заинтересованные лица из многих регионов Украины, а также России, Беларуси, Казахстана. К сожалению, мало представительным следует считать участие в выставке фирм из России и Беларуси. Последнее возможно обусловлено обилием в СНГ выставок по сварке, проводимых в Москве, С.-Петербурге, Киеве, Минске, Нижнем Новгороде, Уфе, Свердловске, Томске, Сочи и других городах.

В. Н. Липодаев, д-р техн. наук



## В. К. ЛЕБЕДЕВУ — 85



6 июня 2007 г. исполнилось 85 лет известному ученому в области технологии сварки и сварочного оборудования, доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки и техники, лауреату Ленинской премии, государственных премий СССР, УССР и Украины, Премии

им. Е. О. Патона, академику Национальной академии наук Украины Владимиру Константиновичу Лебедеву.

После окончания Московского энергетического института в 1945 г. В. К. Лебедев активно включился в исследования по разработке новой сварочной техники, проводимые в Институте электросварки. Начало инженерной и научной деятельности Владимира Константиновича совпало со сложным и трудным периодом восстановления разрушенного Великой Отечественной войной народного хозяйства. Непрерывно работая в ИЭС вот уже на протяжении более полувека, В. К. Лебедев прошел путь от младшего научного сотрудника до руководителя крупного исследовательского подразделения и заместителя директора по научной работе. Его первые научные изыскания были посвящены исследованию особенностей и разработке методов расчета сварочных трансформаторов со сложными полями рассеяния, что нашло отражение в кандидатской диссертации, защищенной в 1948 г. В 1959 г. В. К. Лебедеву была присуждена степень доктора технических наук за работу, явившуюся существенным вкладом в теорию и практику современного трансформаторостроения.

В. К. Лебедев — один из ведущих специалистов в области электротермии и преобразования электрической энергии. Наиболее значимые работы ученого связаны с изучением средств преобразования электрической энергии в тепловую и созданием десятков типов новых источников тока для различных видов дуговой, электрошлаковой, контактной, электронно-лучевой, лазерной сварки и для специальной металлургии. Эти источники тока нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Разработки В. К. Лебедева и его имя широко известны не только в Украине, но и далеко за ее пределами.

В 1964 г. В. К. Лебедев был избран членом-корреспондентом НАН Украины, а в 1972 г. — академиком НАНУ.

Результаты исследований В. К. Лебедева и его изобретения легли в основу принципиально новой технологии и оригинального оборудования для контактной стыковой сварки изделий с большим попе-

речным сечением соединяемых деталей. Эта технология, благодаря высокой производительности, получила широкое применение в строительстве железнодорожных путей, за что в 1966 г. В. К. Лебедев в составе авторского коллектива был удостоен звания лауреата Ленинской премии. Последующее развитие исследований в этом направлении привело к созданию технологических комплексов с внутритрубными машинами для контактной стыковой сварки труб большого диаметра. В. К. Лебедев внес также значительный вклад в разработку, создание и внедрение оборудования для многопозиционной контактной сварки головок блоков локомотивных дизелей и теплообменников мощных трансформаторов. Эти работы были отмечены Государственной премией УССР (1976).

В 1980-х годах ученым совместно с сотрудниками был проведен цикл исследований, имеющих большое значение для науки и техники, в том числе в области контактной стыковой сварки силовых элементов ракет, аппаратов, отмеченный в 1986 г. Государственной премией СССР.

В. К. Лебедев — автор многих опубликованных научных работ, монографий и изобретений по новым способам сварки и сварочному оборудованию. Многие изобретения защищены патентами Украины, России, США и других стран.

Напряженная творческая работа сочетается у В. К. Лебедева со способностью не только ощущать потребности производства, но и определять перспективные приоритетные направления развития науки и техники. Для творческой работы Владимира Константиновича является характерным широкий диапазон научных интересов и глубокая заинтересованность в практическом применении результатов проведенных исследований.

В 2001 г. В. К. Лебедеву за цикл работ в области сварки и родственных технологий присуждена Премия им. Е. О. Патона.

По идее Б. Е. Патона была выполнена работа по совершенно новому для сварщиков направлению — сварка живых мягких тканей животных и человека. Для ее выполнения был создан творческий коллектив сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона и Института хирургии и трансплантологии (проф. Ю. А. Фурманов) АМН Украины. В. К. Лебедев координировал деятельность этих коллективов. После многочисленных экспериментов на лабораторных крысах и кроликах были получены положительные результаты. Традиционные методы сшивания живых тканей нитками либо металлическими скобами оказалось возможным эффективно заменить сваркой сопротивлением токами высокой частоты. Работами этих коллективов заинтересовалась американская





фирма CSMG, которая взялась финансировать наиболее дорогую часть исследований, что обеспечило ускорение исследований и их применение в клинической практике.

Разработки В. К. Лебедевым теоретических основ процесса соединения живых тканей позволили впервые в мировой практике создать сварочное медицинское оборудование и сварочный медицинский инструментарий для проведения хирургических операций по восстановлению физиологических функций поврежденных органов человека. Новая сварочная медицинская технология нашла успешное клиническое применение в клиниках Киева и других городов Украины.

Ведущие хирурги Киева профессора М. П. Захараш, А. В. Макаров, С. Е. Подпрятков, М. Е. Нечитайло внесли большой вклад в развитие техники выполнения сварки тканей и органов и в разработку инструментов. В 2004 г. работа по сварке мягких тканей животных и человека была удостоена Государственной премии Украины.

В настоящее время В. К. Лебедев является советником при дирекции ИЭС. Активно занимается научно-организационной и общественной деятель-

ностью: заместитель главного редактора журнала «Автоматическая сварка», заместитель председателя специализированного совета по защите кандидатских и докторских диссертаций, председатель Украинского аттестационного комитета сварщиков (УАКС).

В. К. Лебедев охотно и щедро передает свой богатый опыт и знания своим ученикам, коллегам по работе, молодым сотрудникам. Им подготовлено 10 докторов, 42 кандидата технических наук.

Многолетний творческий труд В. К. Лебедева отмечен государственными наградами. Все, кто работает и общается с Владимиром Константиновичем, единодушно отмечают его исключительную порядочность, добросердечность, доброжелательность и интеллигентность.

*Сердечно поздравляем юбиляра, от всей души желаем ему крепкого здоровья, личного счастья и больших успехов в свершении новых творческих замыслов.*

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины  
Общество сварщиков Украины  
Редколлегия журнала «Автоматическая сварка»

## ❖ СБОРНИКИ ❖ МОНОГРАФИИ ❖ ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИЙ

**Компьютерные технологии в сварке и промышленности» & Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах** (англ. яз.): Сб. докл. Объединенной Шестнадцатой и Третьей междунар. конф. (6–8 июня 2006 г., Киев, ИЭС им. Е. О. Патона) / Под ред. проф. Б. Лукаса и проф. В. И. Махненко. — Киев: ИЭС, 2006. — 328 с., формат 200×290 мм, ISBN 966-95847-8-7, 100 грн./660 руб./50\$.

**Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин:** Зб. ст. — Київ: ІЕЗ, 2006. — 604 с., формат 200×290 мм, тверда обкладинка, ISBN 966-8872-04-5.

**Железнодорожный транспорт:** Сб. ст. — 2006. — 178 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм. — 60 грн./660 руб./38\$.

**Махненко В. И., Починок В. Е.** Расчет напряжений в сварных соединениях с трещиноподобными несовершенствами (англ. яз.). — Киев: ИЭС, 2006. — 266 с., формат 165×235 мм, мягкий переплет, ISBN 966-8072-02-9, 60 грн./660 руб./38\$.

**Кононенко В. Я.** Технологии подводной мокрой сварки и резки (англ. яз.). — Киев: ИЭС, 2006. — 140 с., формат 140×200 мм, мягкий переплет, ISBN 966-88-72-03-7, 60 грн./660 руб./38\$.

**Лазерные технологии в сварке и обработке материалов** (англ. яз.): Сб. докл. Второй междунар. конф. (23–27 мая 2005 г., пос. Кацивели, Крым) / Под ред. проф. В. С. Коваленко. — Киев: ИЭС, 2005. — 256 с., формат 200×290 мм, ISBN 966-8872-01-0, 100 грн./660 руб./50\$.

**КАТАЛОГ. Технологии. Материалы. Оборудование** (рус., англ. яз.). — Киев: ИЭС, 2005. — 260 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 100 грн./660 руб./50\$.

**Трубопроводный транспорт:** Сб. ст. — Киев: ИЭС, 2005. — 178 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 60 грн./660 руб./38\$.

**Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах:** Сб. трудов. Второй междунар. конф. (13–17 сент. 2004 г., пос. Кацивели, Крым) / Под ред. проф. В. И. Махненко. — Киев: ИЭС, 2004. — 256 с., формат 200×290 мм, ISBN 966-95847-8-7, 100 грн./660 руб./50\$.

**Лазерные технологии в сварке и обработке материалов** (англ. яз.): Сб. докл. междунар. конф. (19–23 мая 2003 г., пос. Кацивели, Крым) / Под ред. проф. В. С. Коваленко. — Киев: ИЭС, 2003. — 256 с., формат 200×290 мм, 100 грн./660 руб./50\$.

**Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах:** Сб. докл. междунар. конф. (16–20 сент. 2002 г., пос. Кацивели, Крым) / Под ред. проф. В. И. Махненко. — Киев: ИЭС, 2002. — 266 с., формат 200×290 мм, мягкий переплет, ISBN 966-95847-2-8. 100 грн./660 руб./50\$.

**Гарашук В. П. Основи фізики лазерів. Лазери для термічних технологій.** — Київ: ІЕЗ, 2005. — 244 с., формат 140×200 мм, м'яка обкладинка, ISBN 966-95847-9-5, 60 грн./660 руб./38\$.

**Письменный А. С.** Индукционный нагрев для сварки и родственных технологий. — Киев: ИЭС, 2005. — 140 с., формат 140×200 мм, мягкий переплет, ISBN 966-8872-00-2, 60 грн./660 руб./38\$.

**ТИТАН: технологии, оборудование, производство** (англ., рус. яз.): Сб. ст. — Киев: ИЭС, 2005. — 196 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 100 грн./660 руб./50\$.

По вопросам заказа просьба обращаться  
в редакцию журнала «Автоматическая сварка»

Тел./факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23, 528-04-86; E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)

Информацию о содержании изданий можно найти на сайте [www.iaw.com.ua](http://www.iaw.com.ua)  
Цены указаны с НДС соответственно для Украины, России и дальнего зарубежья  
с учетом доставки заказной бандеролью.

Более подробно с информацией о книгах можно ознакомиться на сайте:  
[www.iaw.com.ua/russian/books/books-1.html](http://www.iaw.com.ua/russian/books/books-1.html)

## КАЛЕНДАРЬ КОНФЕРЕНЦИЙ И ВЫСТАВОК В 2007 г. (2-е полугодие) (СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ)

Дата	Место проведения	Название мероприятия	Организация
01–08.07	Дубровник, Хорватия	60-й Международный конгресс МИС	Хорватский союз сварщиков e-mail: hdtz@fsb.hr
10–13.09	Нюрнберг, Германия	Европейский конгресс и выставка по современным материалам и технологиям EUROMAT 2007	60325 Frankfurt, Niemcy
16–20.09	Детройт Мичиган, США	Конференция и выставка по материаловедению и технологиям «VM&T-2007»	Американское общество металлов Американское общество керамики Американское общество сварщиков www.matstechnology.org
17–19.09	Базель, Швейцария	Большая сварочная неделя DVS	DVS факс: 49211/1591-300 e-mail: tagungen@dvs-hg.de
17–19.09	Базель, Швейцария	Сварочная конференция DVS (17–18.09) Конференция по роботам Roboter 2007 (18–19.09) Конференция по соединению пластмасс (19.09)	e-mail: tagungen@dvs-hg.de
Сентябрь	Сингапур, Сингапур	Международная выставка «Эссен. Сварка в Азии»	Мессе Эссен ГмбХ тел.: +49201/72440 Факс: +49201/7244248
24–27.09	С.-Петербург, Россия	9-я Международная выставка по судостроению, судоходству, освоению океана «Нева-2007»	ОАО «ЛЭнэкспо»
25–27.09	Санкт-Петербург, Россия	Научно-практическая конференция «Прочность и долговечность сварных конструкций в тепловой и атомной энергетике»	ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» тел. (812) 710 37 56 факс: (812) 274 38 88 e-mail: prometey@pop3.rcom.ru
26–28.09	Москва, Россия	Международная конференция и выставка «Соединение алюминиевых конструкций»	www.alusil.ru тел. (495) 785 20 05
01–05.10	Ялта, Украина	15-я Международная конференция и выставка «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»	www.conference.kiev.ua тел./факс: (044) 573 30 40 e-mail: office@conference.kiev.ua
04–15.10	Москва (Россия), Париж (Франция)	Международная конференция «Металлургия сварки» с посещением Международной выставки в Париже «Esope/Chaudrontrie 2007»	ОАО НПО ЦНИИТМАШ тел./факс: (495) 675 85 33 моб. тел.: 8-903-168-47-81
18–18.10	Катовице, Польша	Международная выставка «INTERWELDING» 2007	тел.: (004832) 78 99 160 e-mail: d.urbanik@mtk.katowice.pl
16–19.10	Киев, Украина	7-я Специализированная выставка с международным участием «Сварка Украина 2007» (в рамках «Промышленной недели 2007»)	НК «Экспоцентр Украины» www.weldexpo.com.ua тел./факс: (044) 526 91 84 e-mail: olga@welding.kiev.ua
16–19.10	Уфа, Россия	Международная специализированная выставка «Машиностроение» с разделами «Международный сварочный форум» и «Сварка, контроль, реновация»	ВЦ «Башэкспо» www.bashexpo.ru тел.: (3472) 56 51 80 факс: (3472) 90 87 07 e-mail: welding@bashexpo.ru
17–22.09	Ганновер, Германия	Международная выставка по машиностроению (индустриальные выставки, металлообработка, сварка) ЕМО-2007	Deutsche MesseAG Hannover www.exponet.ru
Ноябрь	Москва, Россия	Международная выставка «Интеринструмент. Экспосварка. Мера 2007»	Экспоцентр
30.10–02.11	Москва, Россия	7-я Международная специализированная выставка «Weldex/Россварка» (сварочные материалы, оборудование, технологии)	КВЦ «Сокольники» www.weldex.ru тел./факс: (495) 105 34 42 e-mail: msa@mvk.ru
27–30.11	Киев, Украина	6-й Международный промышленный форум-2007 (Металлообработка. УкрМашТех. УкрСварка)	ЗАО «МВЦ» http://www.iec-expo.com
05–06.12	Екатеринбург, Россия	5-я Специализированная выставка «Сварка» (оборудование, инструменты, материалы для сварки, резки, пайки) и 1-я Специализированная выставка «Контроль и диагностика»	Уральские выставки 2000 www.uv2000.ru тел.: (343) 355 51 74 e-mail: vystavka@r66.ru

15 лет на рынке сварочного оборудования Украины

**предприятие «Трида-Сварка» г. Запорожье**

- Электрогазосварочное оборудование
- Горелки к полуавтоматам
- Электрододержатели
- Пусконаладочные работы
- Ремонт сварочного оборудования, в том числе сложного
- Технологическое обеспечение сварочных процессов
- Автоматизированные сварочные линии и комплексы
- Проволока алюминиевая марки Al Mg 5  $\varnothing$  1,2 мм, Al Si 5  $\varnothing$  1,2 мм

**ABICOR BINZEL**  
**Fronius**  
**SELMA**



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

Электромашинно-строительный завод «ФИРМА СЭЛМА» **SELMA**

**ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОСВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**60 лет в мире сварки**

**ISO**  
**TUV CERT**  
ISO 9001:2000  
Exhibition: 75.100.0000

95000, г. Симферополь, Украина  
ул. Генерала Васильева, 32А  
Тел.: (0652) 48-65-36, 48-18-62  
E-mail: sales@selma.crimea.ua  
**www.selma.ua**



маски  
катоды  
флюсы  
горелки  
редуктора  
провода  
электроды  
выпрямители  
плазмотроны  
клемы массы  
трансформаторы  
сварочные трактора  
керамические сопла  
держатели электрода  
сварочные полуавтоматы  
установки для автоматизированной плазменной резки  
оборудование для газоплазменной резки, наплавки, напыления  
установки для контактной сварки  
установки для микроплазменной сварки  
гарантийное и сервисное обслуживание  
установки очистки и фильтрации воздуха  
установки для автоматической сварки в среде защитных газов всех видов металла  
оборудование для антикоррозионной защиты  
установки для автоматической сварки под флюсом  
композиционные металлополимерные материалы

**ТОРГОВИЙ ДІМ ЗВАРЮВАННЯ**

03680, г. Киев, Украина, пр-т Глушкова, 1, пав.№21,  
тел./факс: (+380 44) 526-93-70, 526-93-76, 526-93-75, 526-92-20,  
e-mail: house@welding.kiev.ua, eduardch@ukr.net





**ООО "НПФ "Элно"**  
Порошковые проволоки  
для сварки, наплавки  
и напыления



ООО "НПФ "Элно" является представителем компаний WELDING WIRELOYS LIMITED (Англия) и HYUNDAI WELDING (Южная Корея) в Украине



ул. Петровская, 69, г. Киев, 03680 тел. (044) 200-80-85, 200-85-17 факс (044) 200-85-17 e-mail: info@elno.com.ua



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

Производство материалов для дуговой сварки, наплавки и резки:

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

**Порошковые проволоки** – ПП-АН1, ПП-АН3, ПП-АН7, ПП-АН19, ПП-АН19Н, ПП-АН24С, ПП-АН30, ПП-АН59, ПП-АН61, ПП-АН63, ПП-АН67, ПП-АН68М, ПП-АН69, ПП-АН70М, ПП-АНВ2У, ПП-НхХ25Г14Н3Т, ППС-ЭК1, ППС-ЭК2, ППР-ЭК3, ППР-ЭК4

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

**Флюсы керамические** – АНК-40, АНК-47А, АНК-57, АНК-565

Возможно изготовление других марок материалов

**04112, Украина, г.Киев-112, ул. О.Телиги, 2**      **Тел.: (044) 456-64-95; 456-63-69**  
**Факс: (044) 456-64-95; 456-63-08**



**ДОНМЕТ**  
Завод автогенного оборудования



Запоріжжя	(061) 224-11-56
Київ	(044) 200-80-67
Дніпропетровськ	(056) 370-54-45
Донецьк	(062) 381-88-93
Харків	(0572) 50-16-89
Луганськ	(0642) 595-165
Львів	(0322) 45-00-68
Полтава	(0532) 50-89-67
Вінниця	(0432) 53-16-38
Сімферополь	(0652) 54-32-11
Черкаси	(0472) 64-35-28

(06264) 5-77-13, 4-26-85  
svarka@donmet.com.ua    www.donmet.com.ua

Лидер производства порошковых проволок в Украине



**ООО "ТМ.ВЕЛТЕК"**

Порошковые проволоки для наплавки по ГОСТ 26101-84  
-80X20 P3T,35B9X3CF,25X5ФМС,18X1Г1М и др.


Порошковые проволоки ВЕЛТЕК  
-ВЕЛТЕК H200 - H620

Порошковые проволоки для сварки  
-АН1,АН8,АН39,АНЧ-2 и др.

Порошковые проволоки ТМВ  
-ТМВ3,ТМВ6,ТМВ7,ТМВ11,ТМВ14,ТМВ29 и др.

Диаметры от 1,0 до 6,0 мм., производство до 5000 т/год  
разработка, адаптация к условиям заказчика.

ул. Полевая, 24, офис 504  
03056, Киев, Украина  
тел./факс: (044) 456-0209, (044) 458-3485  
e-mail: weldtec@iptelecom.net.ua    www.weldtec.com.ua



г. Киев, 03150, ул. Божихів, 11  
www.gefest-uv.com.ua  
gefest-uv@kievweb.com.ua  
т. 261-51-65; 227-88-33; т./ф 220-16-19

Производство высококачественных электродов для:

- Сварки высоколегированных сталей
  - ОЗЛ-6    • ДЛ-11    • ЭА-48М/22
  - АНЖР-1    • АНЖР-2    • ЦТ-15
  - НИИ-48Г    • ОЗЛ-8    и др.
- Сварки теплоустойчивых сталей
  - ЦУ-5    • ЦА-39    • ТМУ-21У
- Наплавки слоев со специальными свойствами
  - ЦН-12М    • ЦН-6А    • Гефест-6 (ОЗН-6)
  - Т-590    • НР-70    • ЦЧ-4
- Изготовление на заказ электродов необходимых Вам марок
- Проволока сварочная СВ-08Г2С

Все марки электродов  
**СЕРТИФИЦИРОВАНЫ**

ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

**СпецСплав**

ПРОИЗВОДСТВО:  
Флюсы сварочные

Проволоки порошковые для внепечной обработки металлургических расплавов

Проволоки порошковые для сварки, наплавки, напыления и металлплазми

Электроды наплавочные, специального назначения, для сварки чугуна и резки

Ферросплавы и легитурсы

Хром металлургический

Комплексные раскислители и модификаторы

ул. Кургантокая, 1      Тел.: (380562) 35-50-25  
г. Днепропетровск    Тел./факс: (380562) 35-19-41  
49051, Украина      E-mail: sp@spetszsplov.dp.ua



**производство продажа  
сервисное обслуживание**



*малозабаритное, высокоэффективное энергосберегающее сварочное оборудование на токи 110-300 А с ограничением холостого хода до 12 В*

*автономные мобильные сварочные комплексы на базе резонансных преобразователей*

*сварочные инверторы для ММА и ТИГ сварки на токи до 300 А*

**"ИЭС-ЭПИС"**

Украина, 03150 г. Киев  
ул. Горького 56, корп. 2  
Тел.: (044) 271-2836  
Факс: (044) 271-2102

**НАВКО-ТЕХ**

Automatic machines and robots for arc welding

**Автоматические установки и роботы для дуговой сварки**



УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ШВОВ

УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ КОЛЬЦЕВЫХ ШВОВ

РОБОТТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ СВАРКИ

СВАРОЧНАЯ АППАРАТУРА



Украина, 03056, Киев, ул. Полевая, 24  
Тел.: +38 044 456-40-20  
Факс: +38 044 456-83-53  
<http://www.navko-teh.kiev.ua> E-mail: [info@navko-teh.kiev.ua](mailto:info@navko-teh.kiev.ua)



**MEGAFIL®**  
СТАБИЛЬНОСТЬ ФОРМЫ

MEGAFIL® — обеспечение точности благодаря совершенной форме: полностью бесшовная порошковая проволока с уникальными сварочными свойствами для получения неразъемных соединений; благодаря своим стабильным размерам, отсутствию деформаций кручения она пригодна при решении широкого круга задач; гарантированная внутренняя защита от влаги позволяет использовать ее без повторной прокатки; важными преимуществами являются сверхвысокая электрическая проводимость и стабильное горение дуги. Поддержите свою форму с помощью MEGAFIL®.

MEGAFIL®: Продукция компании Дратцуг Штайн — наша серия бесшовных изделий, включая также высококачественные порошковые проволоки TOPCORE® и MECUFIL®.

  
**DRAHTZUG STEIN**  
wire & welding

Drahtzug Stein  
D-67317 Altleiningen  
Tel: +49(0) 6356 966-0  
Fax: +49(0) 6356 966-114  
E-mail: [postmaster@drahtzug.de](mailto:postmaster@drahtzug.de); [www.drahtzug.de](http://www.drahtzug.de)

Официальный представитель в Украине  
АРКСЭЛ  
83017, г. Донецк, пер. Вирсаний, 2а  
Тел.: (062) 332-2650(52)  
Тел./факс: 382-9449, 332-2651  
E-mail: [info@arsel.dn.ua](mailto:info@arsel.dn.ua); [www.arsel.dn.ua](http://www.arsel.dn.ua)



## ПОДПИСКА — 2007 на журнал «Автоматическая сварка»

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
	180 грн.	360 грн.	1980 руб.	3960 руб.	78 дол. США	156 дол. США

\* В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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

**Контакты: тел.: (38044) 287-63-02, 271-24-03; факс: (38044) 528-34-84, 528-04-86, 529-26-23.**

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

### ПОДПИСНОЙ КУПОН

Адрес для доставки журнала \_\_\_\_\_

Срок подписки с \_\_\_\_\_

**200 г. по**

**200 г. включительно**

Ф. И. О. \_\_\_\_\_

Компания \_\_\_\_\_

Должность \_\_\_\_\_

Тел., факс, E-mail \_\_\_\_\_



## РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

### Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (190×190 мм) - 500 \$

Вторая страница обложки (200×290 мм) 350 \$

Третья страница обложки (200×290 мм) - 350 \$

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

### Обложка внутренняя, полноцветная

Первая страница обложки (190×190 мм) - 350 \$

Вторая страница обложки (200×290 мм) 350 \$

Третья страница обложки (200×290 мм) - 350 \$

Четвертая страница обложки (200×290 мм) - 350 \$

### Внутренняя вставка

Полноцветная (200×290 мм) - 300 \$

Полноцветная (разворот А3) (400×290 мм) - 500 \$

Полноцветная (200×145 мм) - 150 \$

Полноцветная (80×80 мм) - 20 \$

• Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу

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

• Статья на правах рекламы - 50% стоимости рекламной площади

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

### Технические требования к рекламным материалам

• Размер журнала после обрезки 200×290 мм

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

• Все файлы в формате IBM PC

• Corell Draw, версия до 10.0

• Adobe Photoshop, версия до 7.0

• QuarkXPress, версия до 7.0

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

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

Подписано к печати 15.05.2007. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 7,8. Усл. кр.-отт. 8,3. Уч.-изд. л. 8,9 + 2 цв. вклейки.

Цена договорная.

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

© Автоматическая сварка, 2007