Международный научно-технический и производственный журнал

Автоматическая сварка

№ 5 (649)
Май 2007

Издается с 1948 года

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. Ющенко

МЕЖДУНАРОДНЫЙ
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

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

ИЗДАТЕЛЬ:
Международная ассоциация «Сварка»

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

НОВОСТИ 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Махненко О. В., Махненко В. И. Прогнозирование долговечности сварного узла арочного пилона моста 9

Панин В. Н. Экспериментально-расчетная оценка остаточных сварочных деформаций обечаек турбинных водоводов ГЭС 15

Файнберг Л. И., Рыбаков А. А., Алимов А. Н., Розерт Р. Микролегирование швов титаном и бором при многодуговой сварке газонефтепроводных труб большого диаметра 20

Назаренко О. К., Ланбин В. С. Исследование высоковольтных цепей управления током сварочного электронного пучка 26

Остсемин А. А. Влияние поверхностного дефекта на прочность сварных соединений с несимметричной механической неоднородностью 31

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Гречанюк Н. И., Кучеренко П. П., Гречанюк И. Н. Новое электронно-лучевое оборудование и технологии получения современных материалов и покрытий 36

Бут В. С., Олейник О. И. Основные направления развития технологии ремонта магистральных трубопроводов в условиях эксплуатации под давлением 42

Кривцун И. В., Шелягин В. Д., Хаскин В. Ю., Шулым В. Ф., Терновой Е. Г. Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов 49

Походня И. К., Явдощин И. Р., Марченко А. Е., Скорина Н. В., Карманов В. И., Фольборт О. И. Низководородные электроды для судоремонта, ремонта объектов металлургического комплекса и трубопроводного транспорта 54

Жадкевич М. Л., Переплетчиков Е. Ф., Пузрин Л. Г., Шевцов А. В., Яворский М. Н. Расчет толщины наплавленного слоя на деталях задвижек нефтегазовой арматуры высокого давления 59

Ланкин Ю. Н. Компьютерная система контроля технологических параметров ЭШС 63

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Патенты в области сварочного производства 67

ХРОНИКА

В Международном институте сварки: гармонизированная квалификационная система персонала сварочного производства 69

5-я Международная конференция «Высокотемпературная капиллярность-2007» 70

В. С. Попову — 80 72

ИНФОРМАЦИЯ 73

Разработано в ИЭС 41, 58

© НАН Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, МА «Сварка», 2007

International Scientific-Technical and Production Journal

Avtomaticheskaya Svarka

(Automatic Welding)

WELDING — CUTTING — SURFACING — BRAZING — COATING

№ 5 (649)
May 2007
Published since 1948

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

Makhnenko O. V., Makhnenko V. I. Prediction of life of welded assembly of bridge arched pylon 9

Panin V. N. Experimental-calculation estimation of residual welding strains of shells of turbine water penstocks of hydroelectric station 15

Fainberg L. I., Rybakov A. A., Alimov A. N., Rozert R. Microalloying of welds with titanium and boron in multi-arc welding of gas and oil large-diameter pipelines 20

Nazarenko O. K., Lanbin V. S. Investigation of high-voltage control circuit by welding electron beam current 26

Ostsemin A. A. Effect of surface defect on strength of welded joints with a non-symmetric mechanical heterogeneity 31

INDUSTRIAL

Grechanyuk N. I., Kucherenko P. P., Grechanyuk I. N. New electron beam equipment and technologies for producing new materials and coatings 36

Boot V. S. , Oleinik O. I. Main trends in the development of technology of repair of main pipelines under pressure service 42

Krivtsun I. V., Shelyagin V. D., Khaskin V. Yu., Shulym V. F., Ternovoy E. G. Hybrid laser-plasma welding of aluminium alloys 49

Pokhodnya I. K., Yavdoshchin I. R., Marchenko A. E., Skorina N. V., Karmanov V. I., Folbort O. I. Low-hydrogen electrodes for repair of ships, repair of objects of metallurgical complex and pipeline transport 54

Zhadkevich M. L., Pereplyotchikov E. F., Puzrin L. G., Shevtsov A. V., Yavorsky M. N. Calculation of deposited layer thickness on parts of oil and gas high-pressure stop valves 59

Lankin Yu. N. Computer system for monitoring of EBW technological parameters 63

BRIEF INFORMATION

Patents in the field of welding 67

NEWS

In International Institute of Welding: «Harmonized System of Qualification of Welding Manufacturing Personnel» 69

5th International Conference «High-temperature Capillarity-2007» 70

V. S. Popov is 80 72

INFORMATION 73

Developed at PWI 41, 58

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

© NAS of Ukraine, PWI, International Association «Welding», 2007

НОВОЕ СОВМЕСТНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ В ГРУППЕ ДЕЛОРО СТЕЛЛИТ — ДС УРАЛ

ДС Урал (г. Краснокамск, Пермский край, Россия) — двенадцатое звено в системе предприятий Делоро Стеллит Груп — начало свою трудовую историю.

ДС Урал было задумано как совместное предприятие и учреждено известными Пермской Компанией Нефтяного Машиностроения (Пермь), Новыми Машиностроительными Заво-

дами (Пермь), Технологическим Центром ТЕНА (Москва) и Делоро Стеллит Холдинг ГмбХ и Ко КГ (Кобленц, Германия). Специализация этого предприятия: выполнение заказов по наплавке и напылению особо ответственных деталей промышленного оборудования с целью придания им высокой износо-

стойкости и увеличения их срока службы. Уже введен в эксплуатацию участок газопламенного напыления, на заключительной стадии запуск установки для сверхзвукового (Jet Kote®*) и плазменного напыления, которые отвечают современным требованиям мирового рынка. Для напыления и наплавки используются оригинальные материалы Делоро Стеллит, хорошо знакомые во всем мире по торговым маркам Стеллит®, Трибалой® — сплавы на основе кобальта, Делоро®, Нистелл® — на основе никеля и другие стойкие к износу, коррозии и высокой температуре сплавы.

Современные технологии и материалы для нанесения термических покрытий, предлагаемые предприятием ДС Урал, позволят машиностроителям региона и России в целом, а также заказчикам из стран ближнего и дальнего зарубежья изготавливать свое специализированное оборудование по самым высоким мировым стандартам. ДС Урал обеспечит надежными долговечными изделиями производителей и потребителей в таких отраслях, как нефтедобыча и нефтепереработка, энергетика и моторостроение, горнодобывающая, химическая, бумажная, пищевая, металлургическая, стекольная и др.

ДС Урал обладает интеллектуальными, техническими и экономическими потенциалами, что позволяет производить высококачественную продукцию на самом современном техническом уровне.

СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО С ТЕХНОЛОГИЕЙ ПРИВАРКИ ГИБКИХ УПОРОВ

Основной особенностью новых эффективных конструкций является идеальное сочетание нескольких различных строительных материалов. В строительстве давно признано выгодное сочетание стали с ее высокой прочностью на растяжение и пластичностью, а также бетона с его высокой прочностью на сжатие и хорошей стойкостью к коррозии. Применение сталежелезобетонных конструкций в строительстве позволяет соединить положительные свойства стали и бетона. Это

означает, что стальной каркас конструкции объединяется с бетонными частями так, что создается эффект совместной работы.

Стальные балки воспринимают растягивающие усилия, а бетонные элементы — сжимающие усилия, кроме того, обеспечивают защиту от огня. Использование холодноштампованных упоров способствовало развитию сталежелезобетонного строительства в крупных масштабах. Основные преимущества сталежелезобетонных конструкций следующие:

♦ надежность и безопасность при статических и динамических нагрузках;

♦ механическое соединение стали и бетона, предотвращение отрыва бетонной плиты;

♦ высокая пластичность, значительное повышение несущей способности за счет учета при проектировании пластической стадии работы;

♦ анкеровка стальных частей в бетоне, выдерживающая различные направления приложения нагрузки, отсутствие растрескивания из-за механического закрепления;

♦ индивидуальные проектные решения по армированию путем предварительного размещения стальных элементов в бетоне;

♦ прочные сварные стыки гибких упоров при незначительной деформации металла.

Современные сталежелезобетонные мосты были бы немыслимы без штыревых упоров. Для больших мостов часто используется несколько сотен тысяч упоров, обеспечивающих долговечное соединение между несущими стальными конструкциями и железобетонными плитами проезжей части. В Украине проектирование сталежелезобетонных мостов с использованием холодноштампованных гибких упоров началось сравнительно недавно. В частности, такую конструкцию имеют строящиеся Подольско-Воскресенский мостовой переход через р. Днепр (г. Киев), Мостовой переход через р. Днепр (г. Запорожье). Подобную сталежелезобетонную конструкцию имеет мостовой переход через р. Прут в Ивано-Франковской области. На этом объекте предприятие ЗАО «Укрспецтерм» выполнило работы по приварке гибких упоров к стальным балкам.

Согласно проекту приваривали гибкие упоры длиной 200 мм и диаметром 22 мм. Количество упоров — 5488 штук. Сварку проводили с использованием керамических колец, обеспечивающих защиту и формирование сварного шва по DIN EN ISO 14555. Качество приварки гибких упоров зависит не только от четкого следования процедуре сварки, но и правильного функционирования действующего механизма (например, сварочного пистолета), состояния компонентов, вспомогательного оборудования и энергоснабжения. Весь объем работ по приварке упоров был выполнен за 12 дней с учетом разметки и зачистки балок в монтажных условиях при нестабильной погоде. Сварку выполняли однопистолетной установкой У1151 производства ЗАО «Укрспецтерм». В среднем приваривали около 500 упоров в смену. Технология сварки корректировалась с учетом конкретных условий в зависимости от мест на конструкции, где производили сварку.

ТЕРМИТНАЯ ПРИВАРКА ВЫВОДОВ ЭХЗ К ТРУБОПРОВОДАМ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Известный термитный (экзотермический) сварочный процесс является простым и безопасным методом, который не требует использования внешнего источника энергии для создания соединений медь—медь, медь—сталь или приварки стальных деталей в качестве электропроводников. Для приварки выводов электрохимической защиты (ЭХЗ) на трубопровод применяют графитовые многоразовые тигель-формы марки ТФТ или одноразовые керамические патроны. Поверхность трубы тщательно очищают от остатков изоляции, грунта, пыли. Конец проводника и место приварки на трубе зачищают напильником до металлического блеска.

На дно камеры сгорания тигель-формы вкладывается медная мембрана. Термитная смесь тщательно перемешивается и засыпается в тигель. Зажигание термитной смеси осуществляется термитной спичкой, вставляемой через запальное отверстие крышки тигель-формы.

По истечении одной минуты сварщик снимает форму, а приваренный контакт очищают от шлака. После остывания участок трубы с приваренным контактом изолируется.

Термитная сварка обеспечивает наилучший контакт проводника с трубой, не подверженный коррозии.

В процессе сварки максимальная температура на поверхности трубы не превышает 100°С, а на глубине 2 мм — 450°С, причем такое термическое воздействие длится несколько секунд, что невозможно обеспечить при дуговых способах сварки.

Термитная сварка является разрешенным и предпочтительным способом приварки выводов ЭХЗ на трубопроводы высокого давления, что закреплено в соответствующих ведомственных нормативных документах.

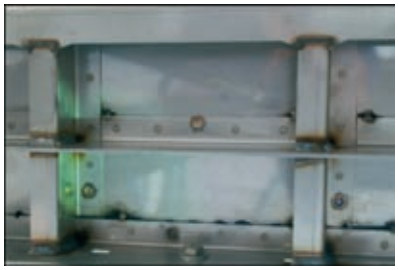
Экзотермический метод сварки оптимизирует катодную антикоррозионную защиту за счет улучшенного и надежного соединения деталей системы. Этот метод обеспечивает получение надежных, невосприим-

чивых к коррозии соединений.

Для построения антикоррозионной защиты с помощью этого метода можно сваривать друг с другом следующие детали: медный кабель сечением от 2,5 до 200 мм^2 и более; сплошные медные проводники любой формы сечением до 250000 мм^2, а также приваривать медные или стальные проводники к любым металлоконструкциям, включая трубопроводы высокого давления.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА РУЧНОЙ СВАРКИ

Знакомую аббревиатуру ХПМ (холодный перенос металла) сейчас можно использовать для ручной сварки. Это было доказано опытно-экспериментальным путем компанией «Alstom LHB» в Залзгиттере. Инновационная технология от компании «Fronius» позволила производителям железнодорожных транспортных средств удивить как своих служащих, так и покупателей. Томас Ричардт, мастер компании «Alstom», в восторге от новой технологии, поскольку им больше не нужно производить послесварочную зачистку. Специалисты, выпускающие железнодорожные транспортные средства, построили модель вагона для того, чтобы продемонстрировать новую сварочную технологию своим покупателям. Результат превзошел все ожидания: отсутствие разбрызгивания особенно очевидно после покраски сварных тонких листов из нержавеющей стали. Низкий уровень количества подводимого при сварке тепла также обеспечивает уменьшение деформаций, особенно для тонколистовых соединений.



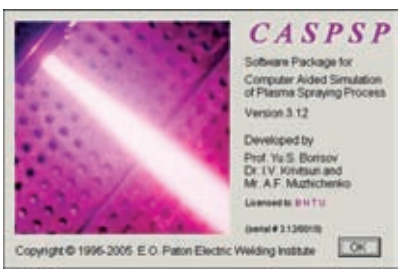
Ручной процесс ХПМ, являющийся разновидностью автоматического сварочного процесса ХПМ, характеризуется теми же основными свойствами: обратно-поступательным перемещением проволоки с цифровым контролем процесса, значительно меньшим количеством подводимого тепла, и как следствие, перенос металла без разбрызгивания.

Возможность обратно-поступательного перемещения проволоки означает, что сварочная присадочная проволока движется вперед и назад внутри горелки более 70 раз за секунду. «Умный» цифровой процесс контроля «определяет» короткое замыкание и облегчает отрыв капли, отрывая проволоку от изделия. В результате перенос металла происходит практически без токовой нагрузки, что в сочетании с «разорванной» дугой обеспечивает обычный «холодный — горячий — горячий — холодный» характер переноса с циклом 70 Гц в секунду. Тепло передается свариваемому металлу при кратковременной (горячей) фазе горения. При (холодной) фазе «втягивания» ровно одна капля переходит в сварочную ванну. Результат: отсутствие разбрызгивания, уменьшение повторной обработки, снижение деформации и улучшенный провар корня шва.

У сварщиков в Залзгиттере отсутствует необходимость в утомительной работе по удалению сварочных брызг и шлифовке поверхности. Их работа прежде всего включает сварку встык нержавеющей стали Bekinox E13 (материал №.4316) горелкой, наклоненной вперед/назад или находящейся в нейтральном положении. Trans-Puls Synergic 3200, питающий сварочную систему ХПМ, подает присадочную проволоку со скоростью 5,5 м/мин на режиме: $U_Д$ = 11 В и $I_{СВ}$ = 100 А. Основные параметры для обычной и импульсной сварки в синергетическом режиме также разработаны компанией «Fronius». Внешне система ручного процесса ХПМ отличается от автоматической лишь своей горелкой Pull-Mig со встроенными двигателями для подачи проволоки и амортизатором проволоки, встроенным в набор шлангов.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ CASPSP-3.12 ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

В Институте электросварки им. Е.О. Патона НАНУ разработан пакет прикладных программ для компьютерного моделирования турбулентных плазменных струй, используемых при плазменном напылении покрытий, а также для моделирования движения и нагрева напыляемых частиц. Он позволяет достаточно быстро производить количественные оценки пространственных распределений температуры и скорости плазмы в струе; траекторий, скоростей и теплового состояния напыляемых частиц в зависимости от параметров процесса напыления. Данное программное обеспечение полезно для специалистов, аспирантов и студентов, занимающихся вопросами плазменного напы-



ления. CASPSP-3.12 является новой версией программного обеспечения и содержит два связанных между собой модуля: CASPSP —Simulation of Plasma Jet (Моделирование плазменной струи); CASPSP — Simulation of Spray Particles (Моделирование напыляемых частиц).

Данное программное обеспечение имеет дружественный интерфейс пользователя (англоязычный), который включает следующие системы для каждого модуля: управляющее меню, систему ввода-вывода и обработки данных; систему графического отображения и печати результатов моделирования; систему помощи.

Первый модуль предназначен для моделирования турбулентных плазменных струй, создаваемых плазмотронами с гладким каналом и истекающих в среду с атмосферным давлением. В основе соответствующей компьютерной программы лежит математическая модель газодинамики и теплообмена в термической дуговой плазме, описываемой системой МГД-уравнений в приближении турбулентного пограничного слоя. Этот модуль позволяет рассчитывать, отображать и выводить на печать пространственные распределения температуры и скорости плазменной

струи с учетом электродуговых процессов, протекающих в плазмотроне, в зависимости от размеров его сопла-анода, тока дуги, состава и расхода плазмообразующего газа.

Второй модуль предназначен для моделирования поведения напыляемых частиц в плазменной струе с предварительно рассчитанными распределениями температуры и скорости плазмы. В основе соответствующей компьютерной программы лежит математическая модель нагрева и ускорения напыляемой частицы, которая описывается нелинейным уравнением теплопроводности и уравнением движения для сферической частицы в плазменном потоке. Этот модуль позволяет рассчитывать и отображать траекторию движения, скорость и температурное поле напыляемой частицы в зависимости от материала и начального диаметра частицы, а также условий ее ввода в плазменную струю.

Новая версия программного обеспечения позволяет выбирать различные единицы измерения вводимых и выводимых данных: размеры (cm | in), температура (K | F | C), расход газа (SLPM | SCFH), расход порошка (kg/hr | lb/hr), плазмообразующий газ (Ar, N_2, Ar+H_2, Ar+He), материал частиц (Al, Cu, Mo, Ni, Ti, Al_2O_3, Cr_2O_3, Fe_3O_4, TiO_2, ZrO_2, Cr_3C_2, TiC, WC, CaF_2, хромистый чугун).

Программное обеспечение уже приобрели ряд фирм США, Канады, Германии, Беларуси, Украины, РФ, Швеции, Италии, Швейцарии.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ СВАРКА ЗАКЛАДНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ ДЕТАЛЕЙ КОМПАКТНОГО СЕЧЕНИЯ В МОНТАЖНЫХ УСЛОВИЯХ

В 2006 г. на Иркутском алюминиевом заводе (г.Шелехов, Иркутская область РФ) прошла проверку новая разработка ИЭС им. Е. О. Патона — электродуговая сварка закладным электродом деталей компактного сечения. Работа выполнялась применительно к приварке плат с гибкими спусками к стальным катодным блюмсам сечением 80×220 мм при строительстве 5-1 серии ИркАЗ (два цеха по 104 электролизера на силу тока 330 кА). По проекту на каждом электролизере требуется сварить 80 стыков (по 40 с каждой стороны), т. е. в общем свыше 16 тыс. в обоих цехах. Для выполнения этой масштабной работы специалистами ИЭС разработаны новая технология, специализированное оборудование (аппарат АДПМ-2) и сварочные материалы (проволока ПП-АНПМ1 и закладные электроды АНПМ-8), позволяющие обеспечить требуемые производительность и качество сварных соединений. Главной сложностью при решении этой задачи являлись условия проведения работ, которые необходимо вести при монтаже в стесненных условиях при отрицательных температурах (до -40 °С). Разработанное оборудование — аппарат сварочный марки АДПМ-2 в комплекте с технологической оснасткой для сборки стыка и формирования сварного шва — отличается компактностью, что особенно важно в монтажных условиях. Аппарат имеет два исполнения — для сварки правого и левого блюмса. В качестве источника сварочного тока применяется сварочный выпрямитель ВДУ-1250 фирмы «СЭЛМА».

Машинное время стыка при номинальном зазоре 16...18 мм составляет 10...12 мин, в резуль-

тате чего достигается производительность до 15 стыков на одном аппарате в смену.

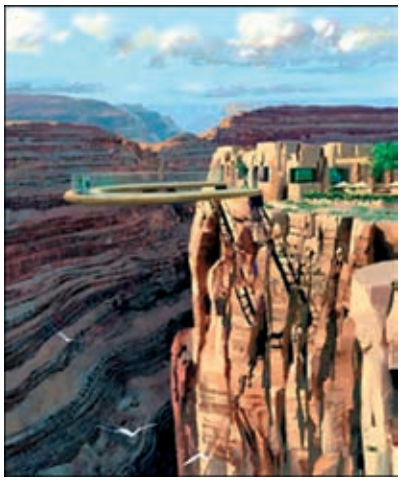
ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ КОМПАНИИ LINCOLN ELECTRIC ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СТАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ CRAND CANYON SKYWALK

Подвешенная на 1200 м над рекой Колорадо новая подковообразная площадка выдвинута на 20 м от края скалы Большого каньона по западной кромке. Пол и стенки, выполненные из стекла, гарантируют учащенное сердцебиение у каждого посетителя. Для мостоподобной конструкции Большой каньон является не самым уютным местом. В обычный день в уникальной окружающей среде может подняться ветер до 40 м/с.

Для обеспечения безопасности нового Grand Canyon Skywalk инженеры закрепили его в виде консольной балки к скале с помощью стальных стержней, входящих в известняк на 14 м. По расчетам он должен выдержать нагрузку в 28 тыс. т, что приблизительно равно 71 полностью загруженному Боингу 747. Но эксплуатационники ограничили максимальную нагрузку 120 чел.

До того, как проект был начат в 2004 г., компания «Mark Steel Corporation» из Солт-Лейк-Сити (штат Юта) участвовала в конкурсе на изготовление, зная, что конкуренция будет жесткой. Чтобы вложиться в плотный график проекта были выбраны установки для сварки последовательными дугами (одна переменного тока, другая постоянного тока), позволяющими значительно увеличить производительность сварки.

Стальные анкерные устройства конструкции были сварены под флюсом с помощью Lincoln Electric 5/64 Outershield® и 1/16 Outershield® 71M с 100%-й защитой газом CO_2. Стальные секции



были толщиной 50 мм, длиной 24 м, шириной 0,75 м и глубиной 1,35 м. Они соединены в 15-метровые анкерные связи и закреплены цементным раствором, чтобы обеспечить безопасность конструкции.

Основная подковообразная структура была сформирована из двух балок коробчатого сечения из углеродистой стали A572 марки 50, сваренной проволокой Lincoln Lincolnweld® L-61 под флюсом 865 для дуговой сварки. Профиль балки имеет толщину 50 мм, длину 1,8 м и ширину 0,75 м. Их транспортировали в 12-метровых секциях и собирали на месте.

При соединении балок коробчатого сечения выигрыш в производительности был обеспечен в основном за счет сварки последовательными дугами. При одной дуге переменного и другой постоянного тока операторы использовали цифровую кнопочную систему управления на PowerFeed® 10 A для задания частоты колебания, уравновешивания и амплитуды для получения оптимальной комбинации проплавления и наплавки. Сварочный ток может быть настроен на любую частоту от 10 до 100 Гц поворотом ручки. Это позволило операторам обеспечить максимальную производительность и качество для различных материалов и работ.

Встроенное программное обеспечение позволяет встречным дугам гореть последовательно, не пересекаясь друг с другом. Это дает возможность получить скорость сварки 66...72 м/мин. Скорость наплавки увеличилась приблизительно от 11 кг/ч при одной дуге постоянного тока приблизительно до 22 кг/ч при использовании проволоки диаметром 3/16 дюйма на двух дугах. Это оказалось особенно выгодно для сварки некоторых длинных швов, которые имели непрерывную протяженность 11...15 м.

Использование более узкой разделки (22,5 вместо 30°) позволило уменьшить время подготовки и шлифовки кромок под сваркой при меньшем количестве металла шва, необходимого на метр шва. В целом «Mark Steel» получила 25...30%-й прирост продуктивности и соответствующее снижение себестоимости. Компания также уменьшила на 10...15 % потребление электроэнергии благодаря использованию инверторных источников.

Сегодня Grand Canyon Skywalk является самой высокой в мире конструкцией, на создание которой ушло более чем 400 т стали. Она была спроектирована, чтобы выдержать 8-балльное землетрясение на расстоянии 50 миль. Конструкция оснащена тремя качающимися стальными пластинами, внутри полых мостовых балок, которые выполняют роль антивибратора. Они движутся вверх и вниз для нейтрализации вибраций от пешеходного потока и порывов ветра. Установленная на балках коробчатого сечения сама площадка выполнена из термоупрочненного стекла толщиной 75 мм.

ТУРБОАТОМ НА ПОДЪЕМЕ

ОАО «Турбоатом» (г. Харьков) постоянно наращивает темпы изготовления энергетического оборудования для атомных, тепловых и гидравлических электростанций Украины, стран ближнего и дальнего зарубежья. Например, своевременно и в полном объеме выполнены заказы по изготовлению оборудования для ГЭС «Эль Кахон» (Мексика), а также для АЭС «Кайга» и «Раджистан» (Индия). Изготовлена

одна турбина К-325 для ТЭС «Аксу» (Казахстан), а изготовление другой находится на завершающей стадии.

Изготовлено также несколько турбин для Камской ГЭС (Россия). Закончено изготовление турбины и ее узлов для Днестровской ГАЭС, конструкция которой является оригинальной и не имеет аналогов. Продолжается поэтапная комплексная модернизация ГЭС Днепровского каскада, в которую входят Днепродзержинская, Каховская, Киевская, Каневская и другие станции. Их модернизация позволит заменить устаревшее, выработавшее свой ресурс, оборудование на новое, высокоэффективное, экологически чистое, повысить КПД и количество производимой электроэнергии, уве-

личить суммарную мощность каскада ГЭС на 350 МВт, обеспечить повышение надежности эксплуатации гидроагрегатов путем использования новых конструкционных и функциональных материалов, усовершенствовать систему диагностики энергетического оборудования; увеличить экспорт электроэнергии.

На предприятии идет широкомасштабное техническое перевооружение и модернизация производственного оборудования. Внедряются новые ресурсосберегающие технологии. Значительную долю в изготавливаемом энергетическом оборудовании составляют сварочные работы. Для повышения качественных характеристик

выпускаемой продукции намечено заменить устаревшие источники питания, сварочные автоматы и полуавтоматы на современные, а также внедрить новые сварочные технологии. Учитывая возрастающие требования к надежности изготавливаемых турбоагрегатов, а также увеличение их мощности при одновременном снижении материалоемкости, приобретается оборудование для неразрушающего и разрушающего контроля качества.

В 2006 г. ОАО «Турбоатом» в жесткой конкуренции выиграло проводимый Индией тендер на модернизацию энергоблока АЭС «Нарора». Положительное решение по тендеру обеспечено благодаря современному техническому уровню производства, высокой квалификации инженерных служб, службе маркетинга, эффективной работе управленческого персонала и возросшей исполнительской трудовой дисциплине.

За 2006 г. объем производства вырос на 15 %, а полученная чистая прибыль составила 22,2 млн грн., что выше плановых показателей. Наличие по-

явившихся оборотных средств позволило обновлять производственное оборудование, финансировать научно-исследовательские работы, а также выполнять социально-орентированные программы. Среднемесячная зарплата работников предприятия возросла на 70 % и в настоящее время составляет 1325 грн., а у рабочих-сдельщиков возросла на 94 % и составляет 2410 грн. Повышение заработной платы и решение различных социальных задач обеспечило снижение текучести кадров и приток на предприятие молодых рабочих, которым по необходимости предоставляется общежитие. На протяжении 2006 года организовано свыше 100 рабочих мест. Работают курсы подготовки рабочих основных профессий: сварщиков, станочников и металлургов.

На 2007 г. запланирован дальнейший рост объемов производства по сравнению с прошлым годом, выполнение которого в условиях продуманной организации производства представляется вполне реальным.

УДК 621.791:624.073

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНОГО УЗЛА АРОЧНОГО ПИЛОНА МОСТА

О. В. МАХНЕНКО, канд. техн. наук, академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Применительно к сварному узлу арочного пилона моста выполнено прогнозирование долговечности его сварных соединений на основе представленной информации о спектре нагрузок и номинальных напряжениях в них.

Ключевые слова: сварные узлы, спектр нагрузок, долговечность соединений, циклическая прочность, расчетное прогнозирование

В настоящее время сварные конструкции находят все более широкое применение в мостостроении. На рис. 1 показана схема сварного узла арочного пилона из низколегированной стали 10ХСНД (ГОСТ 6713–75) в виде фигурной коробчатой балки из листов толщиной 32 мм, выполненного с помощью сварки в защитных газах. К стенке балки по осям *1*, *2* тавровыми соединениями № 3 (табл. 1) по всей длине, исключая участки между узловыми точками 82 и 213 и 597 и 433, приварены продольные брикеты толщиной 20 мм. Между узлами 82 и 213 и 597 и 433 используются соответствующие соединения № 2 и 22 (табл. 1). По осям *3* и *4* приварены поперечные брикеты соединениями № 21 и 20.

Необходимо было оценить долговечность сварных соединений из условия инициирования усталостных разрушений в «горячих» точках *A* и *B* (см. рисунки в табл. 1), учитывая соответствующие нормальные номинальные мембранные напряжения.

В табл. 2 приведены выборочные результаты численного анализа номинального напряженного состояния в наиболее характерных точках вдоль осей *1– 4* в направлении, способствующем образованию продольных усталостных трещин в точках *A*, *B*. При этом значения $\sigma^{н}_{п}$ соответствуют распределению напряжений от постоянных нормативных нагрузок, напряжения $\sigma^{н}_{врI}$ и $\sigma^{н}_{врII}$ — то же от дополнительных временных нормативных нагрузок. По этим данным можно выделить три варианта циклов переменного нагружения с крайними точками цикла по напряжениям:

$$\begin{aligned}
&1)\ \text{от } (\sigma^{н}_{п}+\sigma^{н}_{врI})\ \text{ до } \sigma^{н}_{п}, && \Delta\sigma_1=|\sigma^{н}_{врI}|;\\
&2)\ \text{от } (\sigma^{н}_{п}+\sigma^{н}_{врII})\ \text{ до } \sigma^{н}_{п}, && \Delta\sigma_2=|\sigma^{н}_{врII}|; \quad (1)\\
&3)\ \text{от } (\sigma^{н}_{п}+\sigma^{н}_{врI})\ \text{ до } (\sigma^{н}_{п}+\sigma^{н}_{врII}), && \Delta\sigma_3=|\sigma^{н}_{врI}-\sigma^{н}_{врII}|,
\end{aligned}$$

где $\Delta\sigma_j$ — размах изменения напряжений в цикле $j = 1...3$. Максимальные и минимальные значения σ^{j}_{max} и σ^{j}_{min} определяются указанными крайними точками в зависимости от $\sigma^{н}_{п}$, $\sigma^{н}_{врI}$, $\sigma^{н}_{врII}$ (рис. 2).

Продольные нормальные номинальные напряжения вдоль осей *1* и *2* по данным численного анализа характеризуются значениями $\sigma^{н}_{п} = –134{,}9$ МПа при $\Delta\sigma = 20{,}8$ МПа, незначительно изменяющемся вдоль сварных соединений по осям *1* и *2*. Необходимо было оценить долговечность рассматриваемых сварных соединений сначала из наиболее консервативного варианта циклического нагружения (1) по заданным значениям из табл. 2, а затем в точках, где рассчитанная долговечность не укладывается в требование $2\cdot10^6$ циклов, провести более точный расчет, исходя из спектра нагружения (1) при различных долях α_j количества *j*-й составляющей спектра.

Расчетная методика. Для определения долговечности сварных соединений, представленных в табл. 1, для которых трещинообразные дефекты типа непроплавления недопустимы, использовали методику, разработанную в Международном институте сварки для оценки долговечности такого типа сварных соединений на основе возникновения усталостной трещины в зоне перехода от металла сварного шва к основному металлу («го-

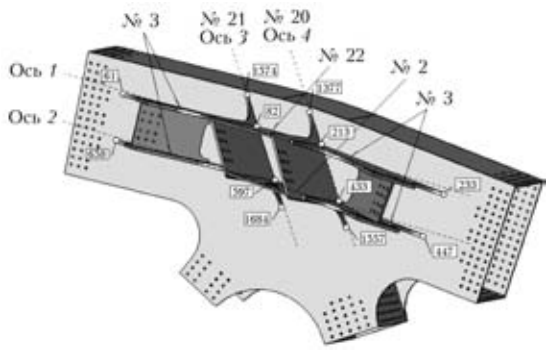


Рис. 1. Схема сварного узла арочного пилона с указанием осей *1– 4*, вдоль которых необходимо оценить долговечность сварных соединений № 2, 3, 20–22 (цифры в рамке — контрольные точки, узлы)

© О. В. Махненко, В. И. Махненко, 2007

Та б л и ц а 1. Сварные соединения, подлежащие расчету на прочность

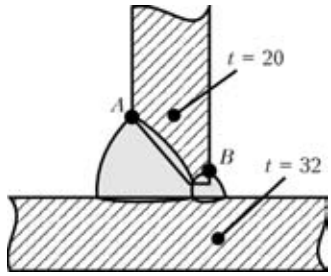
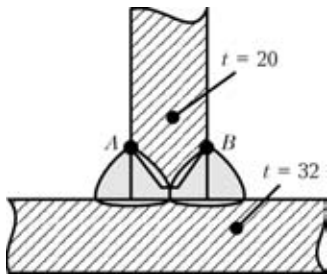
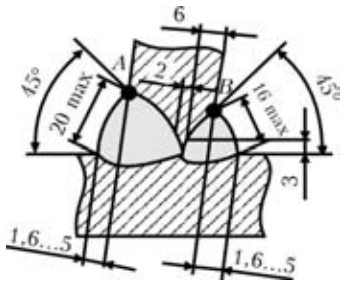
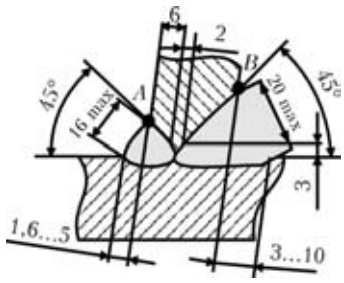
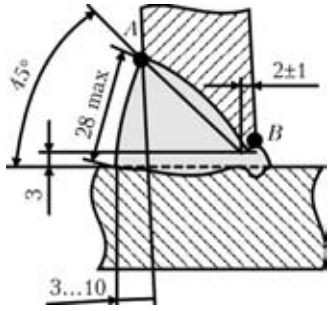
№ шва	Стандарт	Эскиз сварного соединения	Характеристики, учитываемые при расчете	Расположение узла на схеме
		Стандартные		
2	ГОСТ 23518–79	Т4-ИП(УП) 	Двухстороннее тавровое сварное соединение со скосом кромки с одной стороны. Полное проплавление	Вдоль оси *2*: между узлами 597 и 433
3	ГОСТ 23518–79	Т7-ИП(УП) 	Двухстороннее тавровое сварное соединение со скосом кромок с двух сторон. Полное проплавление	Вдоль оси *1*: между узлами 61 и 82; 213 и 233. Вдоль оси *2*: между узлами 658 и 597; 433 и 447
		Нестандартные (дуговая сварка в среде защитных газов)		
20	ГОСТ 14771–76*		Полное проплавление	Вдоль оси *4*: между узлами 1377 и 1557
21	ГОСТ 14771–76*		» »	Вдоль оси *3*: между узлами 1574 и 1684
22	ГОСТ 14771–76*		» »	Вдоль оси *1*: между узлами 82 и 213

Таблица 2. Исходные значения номинальных напряжений в поперечном сечении сварного шва вдоль осей *1–4*

№ п/п	Ось *1*				Ось *2*			
	№ узла (МКЭ)	$\sigma^{н}_{п}$, МПа	$\sigma^{н}_{врI}$, МПа	$\sigma^{н}_{врII}$, МПа	№ узла (МКЭ)	$\sigma^{н}_{п}$, МПа	$\sigma^{н}_{врI}$, МПа	$\sigma^{н}_{врII}$, МПа
1	61	3,4	1,5	1,0	658	3,0	1,2	1,0
2	82	8,4	–12,7	0,5	5220	–53,7	–26,6	–2,5
3	76	–40	–25,1	–1,6	672	–53,5	–29,2	–2,8
4	7130	–35,6	–29,4	–1,9	5217	–52,9	–32,2	–3,1
5	77	–39,9	–32,2	–2,9	673	–51,7	–39,3	–3,3
6	7126	–30,5	–34,5	–2,2	5214	–49,8	–35,1	–3,4
7	78	–24,6	33,4	–1,9	674	–47,2	–34,0	–3,3
8	7124	–13,7	–28,1	–1,3	5211	–43,0	–30,7	–3,0
9	79	–6,4	–2,34	–0,7	597	21,4	0,4	0,2
10	213	24,9	4,5	2,7	433	–25,5	–2,6	–1,0
11	233	1,6	0	0	447	5,5	0,5	1,0

Окончание табл. 2

№ п/п	Ось *3*				Ось *4*			
	№ узла (МКЭ)	$\sigma^{н}_{п}$, МПа	$\sigma^{н}_{врI}$, МПа	$\sigma^{н}_{врII}$, МПа	№ узла (МКЭ)	$\sigma^{н}_{п}$, МПа	$\sigma^{н}_{врI}$, МПа	$\sigma^{н}_{врII}$, МПа
1	1574	1	0	0	1377	0,7	0,1	0,1
2	1578	11,2	3,5	1,7	1404	43,7	5,3	2,7
3	1657	41,6	1,6	1,5	6773	34,4	4,7	2,7
4	2549	43,6	1,4	1,1	3214	48,2	6,6	2,7
5	2552	432	1,6	0,9	3207	49,8	6,7	2,5
6	2555	41,3	1,9	0,7	1403	49,4	6,4	2,6
7	1656	43,3	1,4	1,3	1402	49,7	6,9	2,5
8	1654	42,4	1,7	0,8	1401	48,1	7,1	2,3
9	1653	39,6	2,1	0,8	1399	40,2	7,2	1,6
10	1652	33,3	2,7	5,5	433	–25,5	2,6	–1,0
11	1684	1,8	0	0	1557	1,7	0,3	0,1

рячие» точки *A* либо *B*). Эта методика обобщает большой объем экспериментальных исследований для типовых сварных соединений, что позволяет для каждого из них сформулировать рекомендации по определению допустимого размаха номинальных напряжений при регулярном нагружении в виде

$$[\Delta\sigma] = \frac{FAT f_1(R) f_2(N) f_3(\partial) f_4(T)}{\gamma_M}, \qquad (2)$$

где *FAT* — класс соединения или допустимый размах напряжений для данного соединения на базе $2 \cdot 10^6$ циклов регулярного нагружения (постоянные параметры цикла нагрузки) при $f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = \gamma_M = 1{,}0$; γ_M — коэффициент безопасности.

В данном документе МИСа* приведена таблица значений *FAT* для различных типовых сварных соединений. Рассматриваемые соединения из табл. 1 при отсутствии непроплавлений и выполнении сварочных работ в нижнем положении соответствуют варианту шва № 411, для которого *FAT* = 80 МПа (табл. 3). Если зона перехода от сварного шва к основному металлу не обработана, то сварные соединения соответствуют № 412 и *FAT* = 71 МПа (для рассматриваемых сварных соединений принимаем *FAT* = 71 МПа).

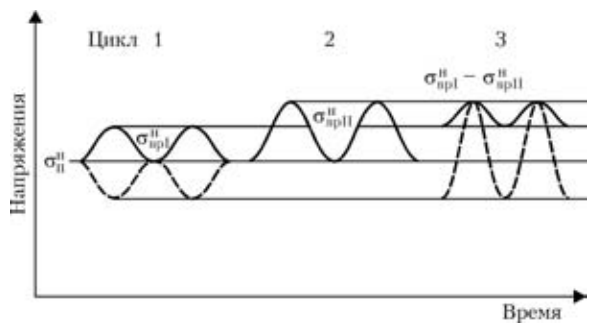


Рис. 2. Графическая интерпретация циклов нагружения (1) при одинаковых $\sigma^{н}_{вр}$ (сплошная кривая) и различных (штриховая) знаках

* *Recommendations* for fatigue design of welded joints and components. — [2002]. — 153 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1539–96/XV-845–96).

В выражении (2) множитель $f_1(R)$ учитывает влияние асимметрии цикла нагружения

$$R = 1 - \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{max}}, \quad (3)$$

а также уровень остаточных напряжений в зоне соединения.

В случае, если остаточные напряжения не превышают $0{,}2\sigma_т$ (для стали 10ХСНД $\sigma_т \approx 400$ МПа), то согласно документу МИСа:

$$\begin{aligned} f_1(R) &= 1{,}6 \quad \text{для } R < -1{,}0; \\ f_1(R) &= -0{,}4R + 1{,}2 \quad \text{для } -1{,}0 \le R \le 0{,}5; \\ f_1(R) &= 1{,}0 \quad \text{для } R > 0{,}5. \end{aligned} \quad (4)$$

В случае, если остаточные напряжения больше $0{,}2\sigma_т$ (примерно 80 МПа для рассматриваемого случая), либо имеет место сочетание двух- или трехмерных элементов, то $f_1(R) = 1{,}0$, т. е. значение множителя $f_1(R)$ для зависимости (2) минимальное. Для рассматриваемого случая можно принять $f_1(R) = 1{,}0$.

Множитель $f_2(N)$ учитывает ограниченную усталость. В диапазоне $10^4 < N < 5\cdot10^6$ циклов $f_2(N)$, согласно методике МИСа (рис. 3, 4), определяется зависимостью

$$f_2(N) = \left(\frac{C}{N}\right)^{1/m}, \quad (5)$$

где N — долговечность сварного соединения; $C = 2\cdot10^6$, $m = 3$ при $10^4 < N < 5\cdot10^6$ циклов и $C = 2{,}54\cdot10^6$, $m = 5$ при $5\cdot10^6 < N < 10^8$ циклов.

Поправка на толщину примыкающего элемента, где возникает усталостная трещина, $f_3(\delta) = 1{,}0$, если толщина $\delta < 25$ мм. При больших толщинах

$$f_3(\delta) = \left(\frac{25}{\delta}\right)^{0{,}3}. \quad (6)$$

Для рассматриваемых соединений $f_3(\delta) = 1{,}0$.

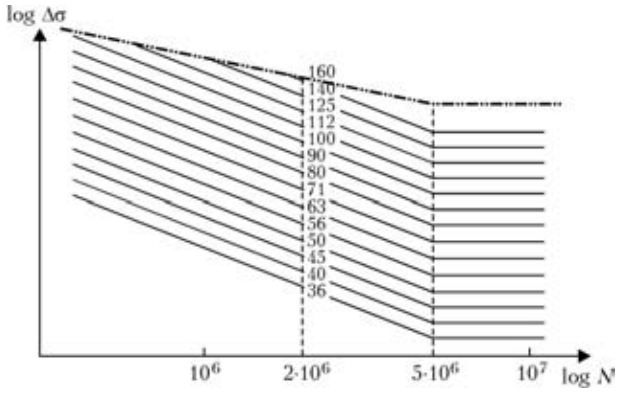


Рис. 3. Обобщенные кривые Веллера для различных *FAT* (сталь) при $m = 3$ для нормальных номинальных напряжений при $N < 5\cdot10^6$ циклов

Множитель $f_4(T)$ учитывает рабочую температуру T эксплуатации соединения. В соответствии с документом МИСа при $T < 100$ °С можно принимать $f_4(T) = 1{,}0$.

С учетом изложенного выше для рассматриваемых сварных соединений зависимость (2) можно представить в виде

$$[\Delta\sigma] = \frac{FAT}{\gamma_M}\left(\frac{C}{N}\right)^{1/m}. \quad (7)$$

Соответственно предельная долговечность N_j при регулярном нагружении с размахом $\Delta\sigma_j$ из (7) выражается следующим образом:

$$N_j = C\left(\frac{FAT}{\Delta\sigma_j\gamma_M}\right)^m. \quad (8)$$

При выборе коэффициента безопасности γ_M следует учитывать, что *FAT* рекомендуют на уровне 0,95 вероятности неразрушения экспериментальных данных. Поэтому в документе рекомендуют выбирать γ_M в пределах 1…1,4 ($\gamma_M = 1{,}4$ соответствует случаю, когда существует угроза человеческой жизни).

Соответственно приняв $\gamma_M = 1{,}4$ и $FAT = 71$ МПа, из (8) получим

$$N_j = C\left(\frac{51}{\Delta\sigma_j}\right)^m, \quad (9)$$

где $C = 2\cdot10^6$, $m = 3$ при $10^4 < N_j < 5\cdot10^6$ циклов; $C = 2{,}54\cdot10^6$, $m = 5$ при $5\cdot10^6 < N_j < 10^8$ циклов.

Зависимость (9) можно использовать для определения долговечности по наиболее консервативному варианту регулярного циклического нагружения (1) исходя из данных табл. 2.

В случае учета спектра нагружения из трех регулярных циклов, отражаемых зависимостями (1), долговечность $N_{спек}$ определяется путем линейного суммирования повреждаемостей (метод Пальмгрена–Майнера):

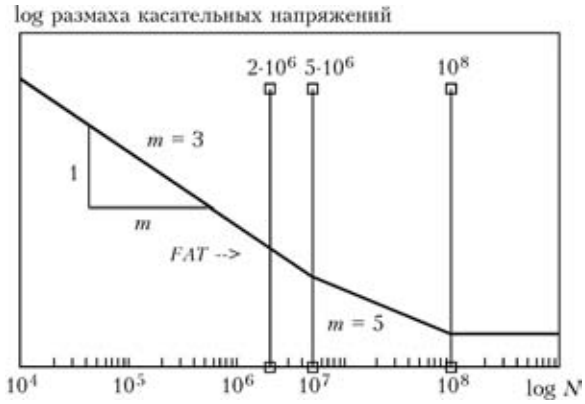
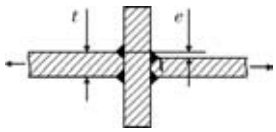
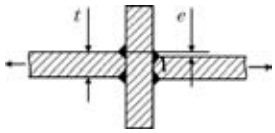
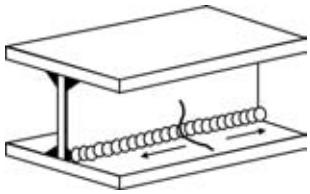
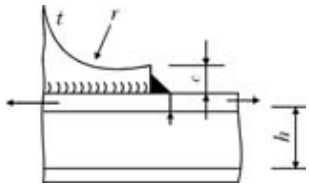


Рис. 4. Кривая Веллера для некоторого *FAT* при $N < 10^8$ циклов

Таблица 3. Типы сварных соединений и соответствующие для них значения *FAT* применительно к узлу арочного пилона

№ шва	Эскиз соединения	Характеристики	*FAT*, МПа
411		Крестовое или *T*-образное соединение с *K*-образной разделкой кромок примыкающих элементов, полное проплавление, смещение $e < 0{,}15t$. Зона перехода обработана	80
412		То же, что и для № 411, но зона перехода не обработана	71
323		Продольные сплошные угловые швы, ручная сварка с *K*-образной разделкой кромок либо без нее (напряжения в полке)	90
522		Продольная косынка с радиусом $r > 150$ мм приварена угловыми швами. Швы обработаны; $c < 2t$, $c_{max} = 25$ мм	90

$$\sum_{j=1}^{M} \frac{n_j}{N_j} = 1, \qquad (10)$$

где n_j — количество j-х циклов с размахом $\Delta\sigma_j$.

Если $n_j = \alpha_j N_{\text{спек}}$, где α_j — доля j-го нагружения в общем нагружении на базе $N_{\text{спек}}$ циклов, то из (10) следует

$$N_{\text{спек}} = \left(\sum_{j=1}^{M} \frac{\alpha_j}{C_j [51/(\Delta\sigma_j)]^{m_j}} \right)^{-1}. \qquad (11)$$

Что касается методических вопросов оценки циклической прочности рассматриваемых соединений по осям *1* и *2* вдоль сварных швов (см. рис. 1), то в соответствии с исходными данными в стенке узла пилона толщиной 32 мм, к которой привариваются примыкающие элементы швами № 2, 3 и 22, действуют нормативные постоянные напряжения $\sigma_{zz}^{\text{н}} = -134{,}9$ МПа при размахе $\Delta\sigma^{\text{н}} = 20{,}8$ МПа вдоль указанных осей. Под действием такой нагрузки могут возникать поперечные усталостные трещины. Вероятность возникновения таких трещин предлагается оценивать также на основе *FAT* для такого типа соединений. Вдали от концов рассматриваемые сварные соединения соответствуют № 323 и имеют значение *FAT* = 90 МПа. В конце приваренного примыкающего элемента, имеющего плавный переход с радиусом $r > 150$ мм (табл. 3), сварные соединения соответствуют № 522 и имеют также значение *FAT* = 90 МПа. Следует отметить, что высокие отрицательные напряжения $\sigma_{zz}^{\text{н}}$ не являются помехой для инициирования усталостного повреждения, поскольку в этой зоне действуют высокие растягивающие остаточные продольные напряжения (на уровне $\sigma_{\text{т}}$ основного материала, т. е. примерно 350…400 МПа), поэтому реальный цикл нагружения будет в зоне растяжения при $R > 0{,}5$, т. е. в зависимости (2) для допускаемого $[\Delta\sigma]$ значение $f_1(R) = 1{,}0$.

Аналогичная ситуация наблюдается и при поперечном нагружении рассматриваемых сварных соединений, когда (см. табл. 2) нормативные постоянные напряжения в отрицательной зоне достигают значения –53 МПа. Хотя поперечные остаточные напряжения при сварке редко превышают $0{,}5\sigma_{\text{т}}$ (~ 170 МПа), тем не менее при указанных $\sigma_{\text{п}}^{\text{н}}$ циклическое нагружение происходит в зоне растяжения.

Таблица 4. Расчетная долговечность для точек вдоль осей *1– 4* (см. табл. 2)

№ п/п	Ось *1*			Ось *2*		
	N_1, цикл	N_2, цикл	N_3, цикл	N_1, цикл	N_2, цикл	N_3, цикл
1	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$
2	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$6{,}8\cdot10^7$	>108	$7{,}4\cdot10^7$
3	$9{,}1\cdot10^7$	$>10^8$	$9{,}7\cdot10^7$	$4{,}3\cdot10^7$	$8{,}4\cdot10^7$	$4{,}6\cdot10^7$
4	$4{,}1\cdot10^7$	$7{,}3\cdot10^7$	$4{,}4\cdot10^7$	$2{,}6\cdot10^7$	$5\cdot10^7$	$2{,}8\cdot10^7$
5	$2{,}6\cdot10^7$	$4{,}7\cdot10^7$	$2{,}8\cdot10^7$	$1{,}9\cdot10^7$	$3{,}6\cdot10^7$	$2{,}1\cdot10^7$
6	$1{,}9\cdot10^7$	$3{,}3\cdot10^7$	$2\cdot10^7$	$1{,}7\cdot10^7$	$3{,}2\cdot10^7$	$1{,}8\cdot10^7$
7	$2{,}2\cdot10^7$	$3{,}8\cdot10^7$	$2{,}3\cdot10^7$	$2\cdot10^7$	$3{,}8\cdot10^7$	$2{,}2\cdot10^7$
8	$5{,}2\cdot10^7$	$8{,}8\cdot10^7$	$5{,}6\cdot10^7$	$3{,}3\cdot10^7$	$6{,}3\cdot10^7$	$3{,}6\cdot10^7$
9	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$
10	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$
11	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$	$>10^8$

Примечания. 1. N_1 — минимальная долговечность трех циклов (1); N_2 — долговечность для спектра нагрузок по варианту 2); N_3 — то же по варианту 3). 2. Для осей *3*, *4* значения долговечности для всех циклов (N_1,N_2 и N_3) $>10^8$.

Результаты расчета долговечности сварных соединений узла арочного пилона. В табл. 4 приведены результаты расчета минимальной долговечности N по зависимости (9) для вариантов (1), исходные данные по которым приведены в табл. 2. Этот наиболее консервативный вариант регулярного циклического нагружения дает долговечность N выше 10^7 ($1{,}7\cdot10^7$) циклов во всех рассматриваемых точках сварных соединений № 2, 3, 20–22 вдоль осей *1– 4* (см. рис. 1). Для сравнения там же приведена долговечность $N_{\text{спек}}$ по зависимости (11) для спектра циклических нагрузок (1) в каждом узле. Значения α_j принимали в следующих пределах:

вариант 2): для $\Delta\sigma_{max}$ α_j = 0,9, остальные — 0,05;

вариант 3): α_j = 1/3 для j = 1...3.

Видно, что используемые схемы спектра нагрузок дают менее консервативные результаты по расчетной долговечности по сравнению с экстремальным вариантом регулярного циклического нагружения (1).

Для сварных соединений № 2, 3, 22 вдоль осей *1*, *2* (см. рис. 1) долговечность по условию образования поперечных усталостных трещин определяется в виде (8)

$$N = C\left(\frac{FATf_3(\delta)}{\Delta\sigma\gamma_M}\right)^m, \qquad (12)$$

где $C = 2\cdot10^6$, m = 3 при $10^4 < N < 5\cdot10^6$ циклов, или $C = 2{,}54\cdot10^6$, m = 5 при $5\cdot10^6 < N < 10^8$ циклов; FAT = 90 МПа; $f_3(\delta)$ определяется по (6), т. е. $f_3(\delta) = (25/32)^{0,3} = 0{,}93$; $\Delta\sigma$ = 20 МПа; γ_M = 1,4.

Соответственно по (12) получим долговечность

$$N = C\left(\frac{918\cdot0{,}93}{208\cdot1{,}4}\right)^m = 5{,}5\cdot10^8 \text{ (циклов).}$$

В заключение можно отметить, что результаты расчета долговечности сварных соединений № 2, 3, 20–22 вдоль осей *1– 4* сварного узла арочного пилона на основе заданных нагрузок и рекомендаций Международного института сварки, основанных на достаточно консервативном обобщении экспериментальных данных, полученных для типовых сварных соединений, показывают, что:

усталостная прочность указанных сварных соединений под действием поперечных номинальных напряжений не хуже $1{,}7\cdot10^7$ циклов;

долговечность соединений вдоль осей *1*, *2* под действием продольных номинальных напряжений не ниже 10^8 циклов.

Service life of welded joints on bridge arched pylons was predicted on the basis of the information on a range of loads and rated stresses in these joints.

Поступила в редакцию 05.10.2006

УДК 621.791:621.643.1/.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ОБЕЧАЕК ТУРБИННЫХ ВОДОВОДОВ ГЭС

В. Н. ПАНИН, канд. техн. наук (ОАО ИТЦ «Прометей», г. Чехов, РФ)

Применение электрошлаковой сварки при изготовлении обечаек турбинных водоводов гидроэлектростанций сопровождается их формоизменением под действием остаточных сварочных деформаций. Приведены расчетные зависимости формоизменения обечаек, учитывающие их геометрические размеры и технологические факторы при изготовлении.

Ключевые слова: электрошлаковая сварка, турбинные трубопроводы, обечайки, остаточные сварочные деформации, стрела прогиба, расчет формоизменения

Обечайки турбинных трубопроводов (водоводов) являются составными элементами водопропускного тракта ГЭС и изготавливаются непосредственно на промышленных полигонах строящихся объектов. Схема обечаек и их геометрические характеристики приведены на рис. 1 и в таблице. При этом один из наиболее распространенных технологических вариантов их изготовления предусматривает сборку обечаек из отдельных элементов (секторов) в вертикальном положении и последующую электрошлаковую сварку пазовых стыков.

Известно [1, 2], что применение сварки для изготовления подобных конструкций приводит к их формоизменению вследствие наличия остаточных сварочных деформаций. Имеющиеся расчетные схемы прогнозирования деформаций относятся в основном к судовым конструкциям. Кроме того, они получены для ручной дуговой и автоматической сварки под флюсом, мощность тепловложения которых значительно меньше по сравнению с электрошлаковой. Применительно к обечайкам турбинных трубопроводов, выполняемых с применением электрошлаковой сварки, эти сведения носят экспериментальный характер.

Целью настоящей работы являлось получение расчетных зависимостей формоизменения обечаек от их геометрических размеров (длины, диаметра, толщины), а также технологических факторов при их изготовлении.

Замеры деформаций проводили на натурных обечайках. При этом режимы электрошлаковой сварки пазовых стыков соответствовали штатной технологии. Кроме того, последняя предусматривала сведение к минимуму влияния поперечных деформаций, возникающих в стыке при сварке, в результате установления жесткостей в виде скоб по всей длине стыка, поэтому основное формоизменение происходило за счет наличия продольного поля напряжений и проявлялось в выходе пазового стыка из плоскости.

Замеры стрелки прогиба проводили до и после сварки с помощью металлической линейки и струны непосредственно в районе стыка, а также на определенном расстоянии от него по заранее нанесенной сетке. Разницу между этими замерами принимали за фактическую величину прогиба. При этом фиксировали режим сварки, а также величину зазоров в стыке до и после сварки. Результаты проведенных замеров после обработки представлены в виде схемы развертки оболочки

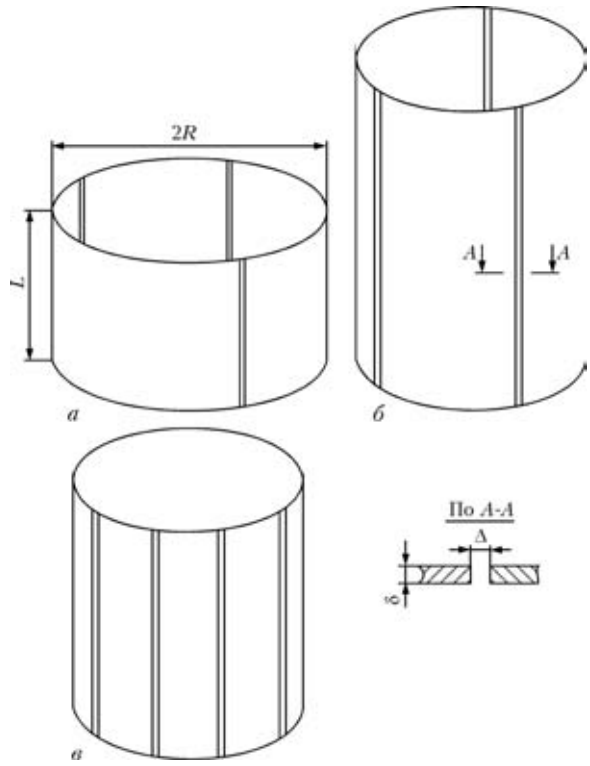


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальных турбинных водоводов ГЭС: *а* — обечайки с переменными L/R и толщиной δ; *б* — звено с продольными секторами «скорлупами» $L/R = 2$, $\delta = 25$ мм; *в* — звено с продольными секторами $L/R = 1$, $\delta = 25$ мм

© В. Н. Панин, 2007

Геометрические характеристики обечаек и средние прогибы

№ п/п	Размеры обечайки($D - L$)×δ, мм	Средняя величина прогиба f, мм	Среднее квадратическое отклонение S, мм	Диапазон прогиба в 95%-м доверительном интервале $f \pm 2S$, мм
1	(6000 – 1450)×25	7,6	1,9	4...12
2	(6000 – 3000)×25	10,2	3,2	4...12
3	(6000 – 3000)×25	9,4	3,3	3...16
4	(6000 – 6000)×25	19,3	—	—
5	(6000 – 2000)×22	7,7	2,1	4...12
6	(6000 – 1680)×36	8,5	1,6	5...12
7	(6000 – 2300)×32	7,8	1,0	6...10

Примечания. 1. В № 3 применяли сварку с порошковым присадочным материалом. 2. D — диаметр; L — длина; δ — толщина обечайки.

(рис. 2). По аналогичной схеме обработаны результаты замеров прогибов 20 обечаек различных геометрических размеров. Полученные данные максимальных прогибов подвергали статистической обработке [3].

Данные расчета доверительных интервалов показывают, что стрелки максимального прогиба изменяются в довольно широких пределах со средним коэффициентом вариации 15…30 %. В таком широком интервале изменений прогибов сравнение по критериям равенства дисперсий и средних значений показывает незначимость влияния геометрических размеров обечаек на величину прогибов. Это объясняется тем, что при сварке рассматриваемых оболочечных конструкций в монтажных условиях существенное влияние на величину прогибов оказывают основные параметры процесса сварки, влияющие на уровень деформации, в частности, величина погонной энергии. Последняя зависит от тепловложения при сварке, что, в свою очередь, определяется режимом сварки (ток, напряжение, скорость сварки и

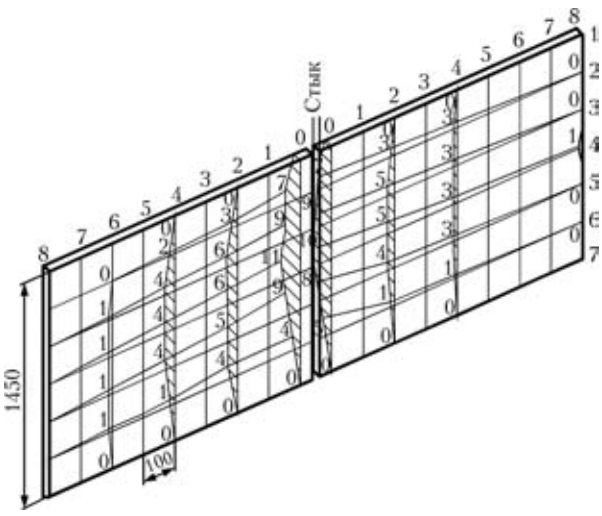


Рис. 2. Схема распределения прогибов на обечайке при электрошлаковой сварке продольного стыка (D = 6000 мм, δ = = 25 мм)

т. д.). Изменение скорости сварки в рассматриваемых диапазонах (2,5…4 м/ч) уменьшает прогиб в 2...3 раза. В то же время в ходе проведения работы выяснено, что зазоры в продольных стыках изменяются в значительных пределах (20…32 мм), что превышает нормативные требования технологии электрошлаковой сварки (24 ± 2 мм). При этом значение погонной энергии в зависимости от зазора в указанных пределах для толщины свариваемого металла 25 мм в среднем изменяется в 1,5…2 раза, аналогичная ситуация наблюдается и на других толщинах.

Для повышения чистоты опытов в ходе экспериментов были собраны несколько обечаек со стыками с одинаковыми зазорами (26 мм) и заварены на одинаковом режиме. В этом случае прогиб изменялся в пределах 1 мм и коэффициент вариации составлял 6…7 %, что в 2...4 раза ниже общего уровня коэффициента вариации, отмеченного выше.

Таким образом, незначимость геометрических размеров обечаек на величину прогибов, отмеченная выше, является следствием изменения погонной энергии сварки, которая, в свою очередь, зависит от величины зазоров в стыке, толщины свариваемого металла и мощности тепловложения. В то же время выполнение нормативных требований по подготовке стыков под сварку приводит к стабильности погонной энергии сварки по всей длине, что обусловливает существенное снижение коэффициента вариации остаточных прогибов. В ситуации постоянства погонных энергий величина остаточных прогибов, а следовательно, формоизменение всей оболочки будет определяться ее геометрическими размерами.

Необходимо также отметить, что указанное формоизменение оболочки имеет сложный характер. В плоскости максимальных прогибов она представляет собой криволинейный контур с внутренней вогнутостью в области стыка, по мере удаления от которого знак остаточных деформаций меняется на обратный (выпуклость наружу) с последующим уменьшением деформаций до нуля (рис. 3). При этом величина B, которая определяет зону сопротивления оболочки ее формоизменению и где величина прогиба изменяется от максимальной (в зоне стыка) до нуля, как показали экспериментальные данные, при максимальном прогибе минимальна, и наоборот (рис. 4).

Если длина обечайки L меньше ее диаметра $2R$, то продольное укорочение пазового сварного

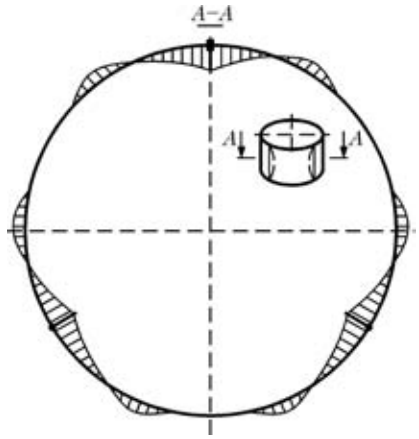


Рис. 3. Характер формоизменения обечайки в плоскости максимальных прогибов продольных швов обечаек звеньев трубопровода

соединения не будет восприниматься всем сечением обечайки, а только его участками, лежащими справа и слева от сварного соединения общей шириной B (рис. 5). В этом случае местные деформации укорочения и изгиба определяются по формуле

$$f = \frac{\varphi L}{8} = \frac{VL^2 z}{8J}, \quad (1)$$

где J — момент инерции части кольцевого сечения обечайки шириной B, сопротивляющейся изгибу от продольного укорочения сварного соединения, см^4; z — расстояние центра тяжести объема до пересечения центральной оси с внутренней стенкой части обечайки шириной b, см; f — стрелка прогиба паза в плоскости, проходящей через линию паза и ось цилиндра, см; V — погонный объем продольного укорочения, см^3. Для конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей

$$V \cong 3{,}6 \cdot 10^6 q_{\text{п}}, \quad (2)$$

где $q_{\text{п}}$ — погонная энергия одного прохода, кал/см.

Используя соотношение

$$\frac{z}{J} = \frac{30}{\delta R^2 \alpha^3} \quad (3)$$

и данные экспериментальных исследований, автор работы [1] для коротких обечаек ($L < 2R$) установил следующую зависимость прогиба пазовых стыков:

$$f = \frac{15}{4} \frac{VR}{K^3 \delta L} \cong 14 \frac{VR}{\delta L}, \quad (4)$$

которая существует при условии $\alpha = K\frac{L}{R}$, где $K \cong 0{,}65$.

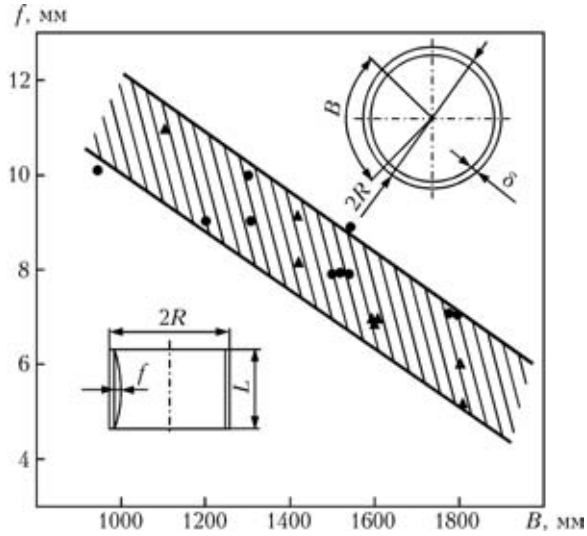


Рис. 4. Зависимость стрелки прогиба f от параметра B на стыках обечаек, сваренных электрошлаковым способом (● — толщина металла 36, ▲ — 25 мм)

Проверка применимости формулы (4) для расчета прогибов пазовых швов оболочек, рассматриваемых в настоящей работе, показала, что расчетные данные не соответствуют экспериментальным, более того, изменения расчетного прогиба и экспериментального по характеру противоположны. Анализ формулы (4) показывает, что с уменьшением отношения L/R прогиб возрастает и стремится к бесконечности. Очевидно, указанная зависимость получена на основании замеров оболочек в узкой области изменения их геометрических параметров и режимов сварки, что подробнее будет рассмотрено ниже.

Для дальнейшего рассмотрения объединим формулы (1)–(3) и сделаем некоторые перестановки их членов:

$$f = 13{,}5 \cdot 10^{-6} \frac{q_{\text{п}}}{\delta} \frac{L^2}{R^2} \frac{1}{\alpha^3}. \quad (5)$$

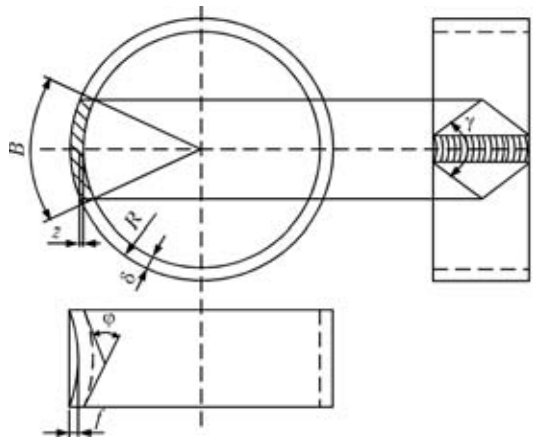


Рис. 5. Схема ширины оболочки B обечайки, сопротивляющейся изгибу от продольного укорочения пазового соединения (остальные обозначения см. в тексте)

Однако при расчете прогиба f по формуле (5) необходимо знать изменение угла α от геометрических параметров обечайки, в частности, длины L и радиуса R. Зависимость угла α от указанных параметров следует из априорного утверждения, что чем длиннее обечайка, тем большая часть ее поперечного сечения вовлекается в сопротивление продольному укорочению сварного соединения [1]. Решая обратную задачу путем подстановки средних экспериментальных значений прогиба f и известных величин соотношения L/R, а также средних значений используемых погонных энергий сварки, можно определить зависимость реального угла α от L/R, которая приведена на рис. 6, из которого видно, что с возрастанием L/R тенденция к увеличению угла α сохраняется. Однако в нашем случае характер изменения величины α отличается от прямолинейного. Кривая зависимости α от L/R аппроксимирована выражением

$$\alpha = 0{,}65\left(\frac{L}{R}\right)^{0{,}63}. \qquad (6)$$

Подставляя полученное выражение в формулу (5), после преобразования получаем эмпирическую зависимость

$$f = 49{,}2\cdot 10^{-6}\,\frac{q_{\text{п}}}{\delta}\left(\frac{L}{R}\right)^{0{,}11}. \qquad (7)$$

Анализ формулы (7) показывает, что влияние на прогиб геометрических параметров R и L незначительно, но в большей степени прогиб определяется удельным тепловложением $q_{\text{п}}/\delta$. На основании выражения (7) построена расчетная номограмма для определения стрелки максимального прогиба f в зависимости от погонной энергии $q_{\text{п}}$, толщины металла δ и соотношения L/R (рис. 7). По известным толщине металла обечайки и соотношению L/R, конкретной погонной энергии определяется удельная погонная энергия $q_{\text{п}}/\delta$, затем по соотношению L/R — максимальный прогиб f. На графике зависимости $q_{\text{п}}/\delta = f(q_{\text{п}}, \delta)$ выделена заштрихованная область, определяющая погонные энергии наиболее часто используемых режимов электрошлаковой сварки (при скорости подачи электрода $v_{\text{э}}$ = 360…430 м/ч, диаметре электрода 3 мм, сварочном токе $I_{\text{св}}$ = 650…750 А, зазоре между свариваемыми кромками Δ = 24 мм). Если величина зазора отличается от указанного, значение $q_{\text{п}}$ или $q_{\text{п}}/\delta$ должно быть умножено на поправочный коэффициент K_{Δ} (зависимость K_{Δ} от зазора показана на номограмме).

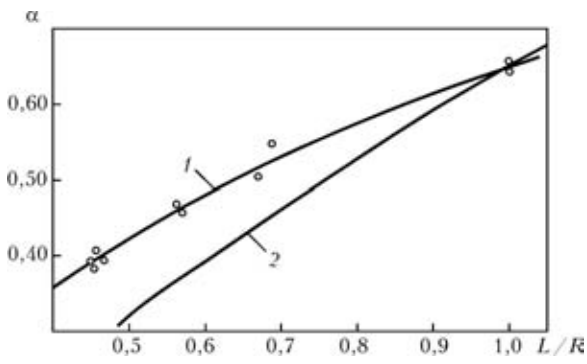


Рис. 6. Расчетная зависимость угла α от соотношения геометрических размеров обечайки L/R: *1* — расчетные данные настоящей работы ($\alpha = 0{,}65(L/R)^{0{,}63}$); *2* — расчетные данные работы [1] ($\alpha = 0{,}65(L/R)$); точки — эксперимент

Как видно из номограммы, практически для всех рассматриваемых толщин металла оболочек с различными соотношениями L/R в используемом диапазоне режимов сварки прогибы изменяются в небольшом диапазоне. Однако изменение зазора в стыке и, как следствие, погонной энергии сварки (за пределы регламентируемых) вызовет значительное возрастание прогиба.

Из расчетной формулы и анализа номограммы следует, что уменьшать прогиб продольных стыков обечаек, свариваемых электрошлаковой сваркой, наиболее рационально путем снижения погонной энергии. Поскольку в ходе настоящих экспериментов использовались минимально возможные погонные энергии для сварки проволокой диаметром 3 мм, то снижение уровня деформации на данных оболочках при традиционной технологии сварки практически невозможно. Однако его можно значительно снизить при применении сварки проволокой большого диаметра 4…5 мм, уменьшении зазора, применении порошкового присадочного металла, дополнительного стока тепла (спреера) и т. д.

Необходимо отметить, что зависимость (7) может быть использована с определенной корректировкой и при расчете деформаций тонких оболочек, свариваемых другими способами сварки, что подтверждается сравнением данных расчета для оболочек, представленных в работе [1].

Из рис. 8 видно, что расчетные значения прогибов, определенные по формулам (4) и (7), весьма близки к пределу поля разбросов экспериментальных значений для исследованных автором работы [1] геометрических размеров обечаек.

В заключение следует отметить, что изготовление обечаек турбинных водоводов ГЭС по штатной технологии (с использованием электрошлаковой сварки) приводит к существенным формоизменениям этих конструкций, вызванных сварочными деформациями. Максимальная стрелка прогиба пазового стыка за счет выхода его из плоскости для исследованного диапазона обечаек составляет 3...19 мм, а контур обечайки в плоскости максимальных прогибов представляет собой кри-

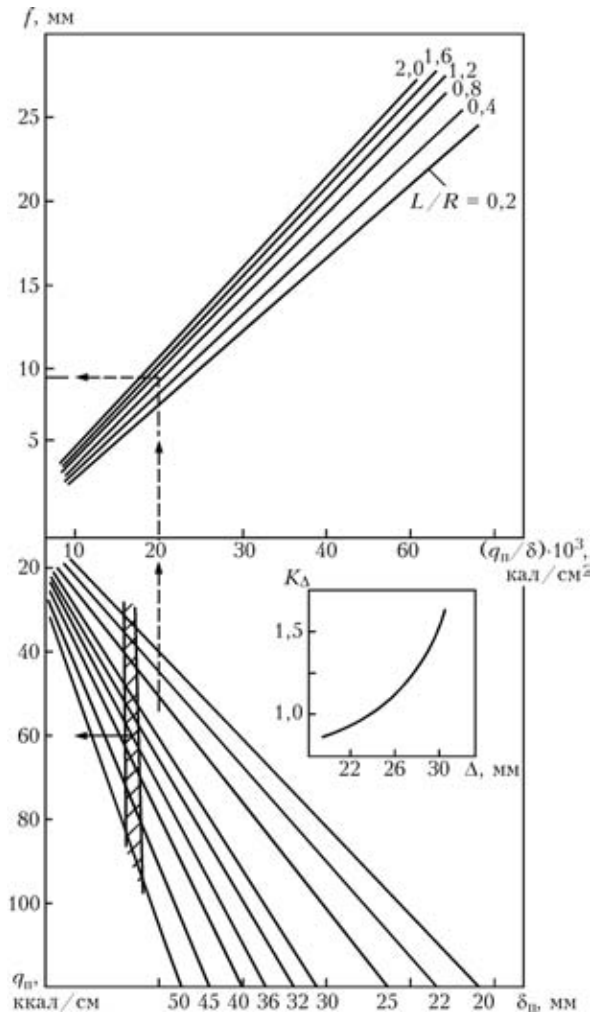


Рис. 7. Номограмма для определения максимальной стрелки прогиба f при электрошлаковой сварке продольного стыка обечайки звена трубопровода

волинейную замкнутую линию с вогнутостью в районе шва и выпуклостью на некотором расстоянии от него с последующим выходом на правильную окружность.

Статистический анализ полученных данных показал незначимость влияния геометрических размеров свариваемых обечаек на максимальные прогибы, что объясняется большим разбросом полученных экспериментальных данных (коэффициент вариации 15…30 %). Последний вызван значительными отклонениями зазоров в стыках от

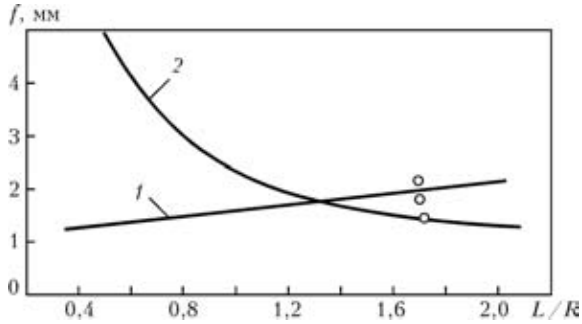


Рис. 8. Расчетные значения максимальных прогибов f продольных швов обечаек толщиной 12 мм, выполненных с использованием сварки: *1* — по формуле (4); *2* — по (7); точки — эксперимент

нормативных и, как следствие, большими колебаниями погонных энергий сварки.

При выполнении нормативных требований по подготовке стыков под сварку изменение геометрических размеров и погонных энергий сварки оказывает значимое влияние на прогиб пазовых стыков, при этом разброс экспериментальных данных характеризуется коэффициентом вариации 6…7 %.

Полученная эмпирическая зависимость остаточных максимальных прогибов пазовых стыков с учетом влияния погонной энергии сварки и жесткости свариваемой обечайки позволяет прогнозировать ее формоизменение.

Проведен расчетный анализ влияния погонной энергии сварки, а также геометрических размеров обечаек на максимальный прогиб пазовых стыков. Построена номограмма, позволяющая определить максимальный прогиб в зависимости от изменения указанных выше факторов.

Расчетным путем установлено, что для обечаек, применяемых в гидротехнике, основным фактором, определяющим их формоизменение, является погонная энергия сварки.

1. *Кузьминов С. А.* Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. — Л.: Судостроение, 1974.
2. *Панин В. Н. и др.* Оценка остаточных сварочных деформаций обечаек турбинных водоводов ГЭС // Сварочные работы в энергетическом строительстве. — 1982. — Вып. 7.
3. *Химмельблау Д.* Анализ процессов статистическими методами. — М.: Мир, 1973.

Application of electroslag welding in fabrication of shells of turbine penstocks in hydroelectric stations leads to a change of their shape under the action of residual welding deformations. Calculated dependencies of shell shape change are given, allowing for their geometrical dimensions and technological factors in manufacturing.

Поступила в редакцию 18.08.2006

УДК 621.791.753.042.5

МИКРОЛЕГИРОВАНИЕ ШВОВ ТИТАНОМ И БОРОМ ПРИ МНОГОДУГОВОЙ СВАРКЕ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

Л. И. ФАЙНБЕРГ, инж., **А. А. РЫБАКОВ**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
А. Н. АЛИМОВ, канд. техн. наук (ООО «АРКСЭЛ», г. Донецк),
Р. РОЗЕРТ, д-р-инж. («Drahtzug Stein Wire & Welding», Германия)

Исследовано микролегирование металла швов титаном и бором при многодуговой сварке труб, которое осуществляется через порошковую проволоку, установленную на одной из дуг. Особенностью этого процесса является применение нейтральных и слабокислых флюсов вместо основных, что улучшает качество формирования швов при повышенной скорости. Определено оптимальное содержание титана и бора, обеспечивающее высокую ударную вязкость металла шва. Производственные испытания процесса сварки с использованием разработанной порошковой проволоки марки ПП-АСФ-1 дали положительные результаты.

Ключевые слова: газонефтепроводные трубы, многодуговая сварка, порошковая проволока, микролегирование шва, титан, бор, плавленый нейтральный флюс, основный агломерированный флюс, ударная вязкость

В связи с ростом требований к газонефтепроводным трубам большого диаметра по-прежнему актуальной остается задача повышения ударной вязкости металла швов, выполненных многодуговой сваркой под флюсом. Эффективным способом ее решения является микролегирование швов титаном и бором, что улучшает структуру металла, способствуя образованию игольчатого феррита внутри зерен и подавлению выделений первичного феррита по их границам. Для этой цели за рубежом применяют агломерированные флюсы алюминатно-основного типа АВ (EN 760), которые ограничивают содержание кислорода в швах, в сочетании со сварочной проволокой типа S3Mo–TiB или с порошковой проволокой (ПП), легированной титаном и бором. Разновидностью второго способа является более экономичный процесс FMI (Fluxocord-Micro-Injection), при котором легирование многодугового шва осуществляется посредством ПП (например, FLUXOCORD 35.25-3D или 35.25-4D), устанавливаемой на одной из дуг [1–5]. Недостатками этих способов являются высокая стоимость импортных агломерированных флюсов и относительно низкие технологические свойства большинства из них при сварке труб толщиной менее 14 мм (узкие швы с высоким усилением).

Цель настоящей работы — совершенствование процесса сварки за счет использования более экономичных и технологичных нейтральных плавленых флюсов типа АН-67 или АН-47 с обеспечением существенного повышения ударной вязкости (KCV^{-20} = 60…80 Дж/см^2) металла швов на трубах текущего производства, выполненных под этими флюсами.

Известно [6–10], что необходимым условием получения металла шва с высоким уровнем ударной вязкости является баланс титана, бора, кислорода, азота, а также активных раскислителей — алюминия, кальция, редкоземельных металлов. Подавление формирования первичного феррита по границам зерен обеспечивается наличием бора, оставшегося после образования оксида B_2O_3 и нитрида BN. Зародышами для формирования игольчатого феррита внутри аустенитного зерна в основном являются дисперсные частицы оксида титана TiO, образовавшиеся в результате соединения титана со свободным кислородом.

При сварке под основным флюсом рекомендуется, чтобы в металле шва присутствовало 0,015…0,030 мас. % Ti, 0,002…0,005 мас. % B, 0,02…0,04 мас. % [O] и не более 0,006…0,008 мас. % [N]. Содержание алюминия обычно постоянно и составляет 0,020…0,025 мас. %. Такое соотношение элементов способствует получению оптимальной структуры металла шва.

При выборе способа легирования шва применение ПП (процесс FMI) предпочтительно по следующим причинам:

использование проволоки сплошного сечения типа S3Mo–TiB в сочетании с нейтральными флюсами вместо основных агломерированных флюсов требует увеличения содержания в ней бора и титана, в результате чего повышается твердость и жесткость проволоки, что еще более усугубляет трудности, возникающие при ее изготовлении и применении;

вариант с микролегированием металла шва через флюс представляется недостаточно надежным из-за низкой металлургической активности бора

© Л. И. Файнберг, А. А. Рыбаков, А. Н. Алимов, Р. Розерт, 2007

Таблица 1. Химический состав (мас. %) сварочных проволок и основного металла

Материал	C	Mn	Si	Mo	Ni	Cr	Ti	B	Al	Nb	S	P
Сварочная проволока: S3Mo–TiB	0,08	1,3	0,28	0,52	0,05	Не опр.	0,165	0,0164	0,017	0,013	0,01	0,018
Св-08ХМ	0,10	0,6	0,29	0,61	0,17	1,2	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	<0,025	<0,030
Св-08Г1НМА	0,09	1,5	0,41	0,70	0,70	0,1	» »	» »	» »	» »	<0,015	<0,020
Основной металл сталь 10Г2ФБ	0,11	1,7	0,32	<0,03	Не опр.	Не опр.	» »	» »	0,04	0,007	0,016	0,016

и титана, которые содержатся в плавленом флюсе в виде оксидов;

ПП можно изготавливать небольшими партиями, оперативно изменяя ее состав в зависимости от марки основного металла и условий сварки.

На начальном этапе работ определено оптимальное содержание титана и бора в швах, выполненных на хладостойкой стали 10Г2ФБ, которую применяют для труб ответственного назначения. Контрольные соединения стальных пластин толщиной 18,7 мм сваривали с двух сторон тремя или четырьмя дугами под флюсами АН-67Б и АН-47П (последний выпускает ОАО «Запорожстеклофлюс»). Погонная энергия процесса сварки составляла 5 кДж/мм. Опытные ПП с различным содержанием титана и бора устанавливали на второй дуге, а на остальных — экономичную молибденсодержащую проволоку сплошного сечения Св-08ХМ.

Для сравнения в некоторых опытах использовали проволоку S3Mo–TiB и агломерированные флюсы ОР 132 (фирма «Oerlikon») и ОК 10.74 (фирма ESAB). Химический состав основного металла и сварочных материалов приведен в табл. 1 и 2.

Применение ПП не привело к существенным изменениям режима сварки и качества формирования швов. Горение дуги на ПП было несколько менее стабильным, чем на проволоке сплошного сечения, что объясняется отсутствием омеднения. Ударную вязкость металла швов определяли на образцах с острым надрезом типа IX (ГОСТ 6996–66), которые отбирали из последнего шва или места пересечения швов.

В результате экспериментов установлено, что при сварке под указанными плавлеными флюсами содержание кислорода и азота в металле шва изменяется соответственно в пределах 0,045…0,070 и 0,0077...0,0110 мас. %, т. е. оно выше, чем при сварке под основным флюсом, при этом массовая доля алюминия остается неизменной. Оптимальное для повышения ударной вязкости содержание титана в металле шва составляет 0,022…0,038 мас. %, а бора — 0,0025…0,0065 мас. %. При содержании титана менее 0,018 мас. % положительный эффект отсутствовал, а при более 0,038 мас. % ударная вязкость резко снижалась. Как видно из табл. 3, при сварке с использованием нейтральных плавленых флюсов микролегирование титаном и бором повышает ударную вязкость KCV^{-20} металла шва в 2,0…2,5 раза (п. 2 и 4) по сравнению вариантами сварки, в которых оно отсутствовало (п. 1 и 3).

Увеличение содержания бора вплоть до 0,0100 мас. % не приводило к снижению ударной вязкости металла шва, однако ввиду опасности образования трещин его предельное содержание ограничили 0,0065 мас. %. Такое значение близко к рекомендуемому в работе [8] оптимальному содержанию бора при N ≤ 80 ppm и O = 330…380 ppm. Оно определяется соотношением B = 0,7N + + 15 ppm и равно 0,0071 мас. % при N = 80 ppm.

Известно, что при выполнении второго (наружного) шва трубы ударная вязкость металла первого (внутреннего) шва уменьшается на 20…30 % вследствие дисперсионного упрочнения. Благодаря микролегированию создается «запас» ударной вязкости, который (несмотря на снижение этого показателя при повторном нагреве) обеспечивает приемлемое ее значение для металла первого шва и места перекрытия швов. Так, например, KCV^{-20} металла последнего шва, выполненного под флюсом АН-67Б, составила 178 Дж/см^2 (п. 2, табл. 3), а места перекрытия швов — 132 Дж/см^2. При этом, однако, возможно локальное снижение ударной

Таблица 2. Химический состав (мас. %) флюсов

Флюс	Al_2O_3	CaO	MgO	CaF_2	MnO	SiO_2	TiO_2	Fe_2O_3	ZrO_2
АН-67Б	35...40	<10,0	—	11...16	14,0...18,0	12...16	4,0...7,0	<1,0	—
АН-47П	10...18	12,0...17,0	6...10	8...13	10,0...16,0	27...30	4,0...7,0	0,8...3,0	3,5...5,0
ОР 132	23...26	3,5...6,0	20...24	13...16	6,5...8,5	17...20	2,0...3,5	1,3...3,2	—
ОК 10.74	21...26	5,0...7,0	19...25	16...20	5,0...7,0	19...24	<1,3	—	—

Таблица 3. Химический состав (мас. %) и ударная вязкость металла швов, выполненных под флюсами

№ п/п	Флюс	Сварочная проволока	C	Si	Mn	Mo	Cr	Ti	B	[O]	[N]
Плавленые											
1	АН-67Б	Св-08ХМ	0,09	0,27	1,63	0,14	0,26	—	—	0,045	0,008
2		Св-08ХМ+ПП	0,07	0,30	1,60	0,22	0,37	0,030	0,0044	0,047	0,007
3	АН-47П	Св-08Г1НМА	0,10	0,48	1,63	0,20	—	—	—	0,047	0,010
4		Св-08ХМ+ПП	0,08	0,30	1,67	0,27	0,31	0,028	0,0034	Не опр.	Не опр.
Агломерированные											
5	ОК 10.74	Св-08Г1НМА	0,06	0,43	1,60	0,30	—	0,011	—	0,037	0,005
6		Св-08ХМ+ПП	0,07	0,41	1,62	0,28	0,36	0,036	0,0053	0,032	0,005
7		S3MoX–TiB	0,07	0,45	1,78	0,22	—	0,026	0,0025	0,022	0,006
8	ОР 132	Св-08Г1НМА	0,08	0,30	1,74	0,33	—	0,011	—	0,051	0,008
9		S3Mo–TiB	0,07	0,31	1,67	0,29	0,36	0,024	0,0019	0,048	0,008

Примечания. 1. Содержание в металле швов алюминия составило 0,02…0,03 мас. %, а в металле швов, выполненных с применением проволоки Св-08Г1НМА, содержание никеля — от 0,18 до 0,22 мас. %. 2. Образцы типа IX для испытания на ударный изгиб отбирали из последнего слоя шва.

Окончание табл. 3

№ п/п	Флюс	Сварочная проволока	*KCV*, Дж/см^2		
			0	–20 °С	–40 °С
Плавленые					
1	АН-67Б	Св-08ХМ	Не опр.	82	49
2		Св-08ХМ+ПП	183	178	135
3	АН-47П	Св-08Г1НМА	76	49	Не опр.
4		Св-08ХМ+ПП	Не опр.	122	87
Агломерированные					
5	ОК 10.74	Св-08Г1НМА	168	153	111
6		Св-08ХМ+ПП	102	63	Не опр.
7		S3Mo–TiB	Не опр.	187	151
8	ОР 132	Св-08Г1НМА	147	104	98
9		S3Mo–TiB	216	205	195

вязкости на участках шва, где температура повторного нагрева превышает 750 °С [7].

При использовании основных агломерированных флюсов микролегирование швов титаном и бором целесообразно в случае, если необходимо обеспечить высокую ударную вязкость при температуре ниже –20 °С. Так, KCV^{-20} металла швов, выполненных на стали 10Г2ФБ проволокой Св-08Г1НМА под флюсами ОК 10.74 и ОР 132 с основностью 1,4…1,5, не превышало 153 Дж/см^2 (п. 5 и 8, табл. 3). Микролегирование титаном и бором повысило этот показатель — $KCV^{-40} > 150$ Дж/см^2.

Вследствие меньшей окислительной способности указанных флюсов оптимальное содержание титана и бора в металле шва (и соответственно в ПП) должно быть ниже, чем при сварке под нейтральными флюсами АН-67Б и АН-47П. В наших экспериментах при сварке проволокой S3Mo–B содержание указанных элементов в металле шва составило соответственно 0,024…0,026 и 0,0019…0,0025 мас. % (п. 7 и 9, табл. 3). Полученные результаты (с учетом содержания кислорода и азота) не противоречат приведенным выше рекомендациям применительно к основным агломерированным флюсам.

При использовании в сочетании с агломерированными флюсами ПП не скорректированного состава содержание титана и бора в металле шва составило соответственно 0,0360 и 0,0053 мас. %, что превысило их оптимальное содержание и привело к резкому уменьшению его ударной вязкости (п. 6, табл. 3).

Состав металла швов, выполненных под флюсом ОК 10.74 проволоками S3Mo–TiB и Св-08ХМ+ПП (п. 6 и 7, табл. 3) отличается в основном содержанием титана и бора. Из этого следует, что корректировка состава ПП путем снижения содержания титана и бора позволит достичь при сварке под основными агломерированными флюсами таких же высоких результатов, как и при использовании проволоки S3Mo–TiB.

Учитывая жесткие требования к содержанию микролегирующих элементов в металле шва, необходимо с высокой точностью обеспечить однородность состава ПП по ее длине. После доработки технологии изготовления ПП выполнена серия двенадцатиметровых наплавок на трубах с контролем химического состава металла шва через каждые 0,5 м его длины. Стандартное отклонение содержания в металле шва титана и бора составило соответственно ±0,0010 и ±0,0002 мас. % , т. е. не более 12,5 % диапазона изменения их оптимального содержания в металле шва — 0,016 мас. % Ti и 0,004 мас. % B.

Таблица 4. Зависимость состава металла швов, выполненных на стали 10Г2ФБ под флюсом АН-67Б с использованием проволоки сплошного сечения Св-08ХМ, от режима горения дуги на ПП

Количество дуг	I, А	U, В	$v_{св}$, м/ч	Массовая доля элементов, %						
				C	Si	Mn	Cr	Mo	Ti	B
1	900	30	38	0,12	0,37	1,89	0,23	0,17	0,118	0,0212
		37		0,10	0,37	1,93	0,21	0,14	0,099	0,0170
3	850	30	80	0,10	0,33	1,63	0,28	0,15	0,027	0,0042
	900	37		0,10	0,33	1,65	0,27	0,15	0,026	0,0044

Примечания. 1. I — ток дуги; U — напряжение на дуге, где установлена ПП. 2. Режим трехдуговой сварки: I_1 = 1150 А, U_1 = = 37 В; I_2 = 850…900 А, U_2 = 30…37 В; I_3 = 1000 А, U_3 = 45…47 В; $v_{св}$ = 80 м/ч; ПП установлена на второй дуге.

Опытно-промышленные партии ПП производили в две стадии последовательно на двух заводах. Вначале заготовку, заполненную флюсовым сердечником, изготавливали в Германии на заводе фирмы «Drahtzug Stein Wire & Welding». Затем ее доставляли в Украину на предприятие «АРКСЭЛ», где выполняли финишные операции (термообработку, волочение, перемотку на потребительские катушки), а также проводили испытание и контроль готовой проволоки. В ходе производственных испытаний установлено, что увеличение диаметра ПП с 4,0 до 4,5 мм повышает стабильность процесса многодуговой сварки на токе более 800 А. При этом разница между массой 1 пог. м ПП диаметром 4,5 мм и проволоки сплошного сечения диаметром 4,0 мм не превышает 4 %.

На основании полученных данных разработаны ПП марок ПП-АСФ-1-2, ПП-АСФ-1-3 и ПП-АСФ-1-4 для многодуговой сварки под флюсом (ТУУ 28.7-31206116-008–2003 с Изменением № 1). На указанные ПП получен патент Украины и положительное решение на заявку на изобретение [11, 12].

Разработку состава ПП проводили с учетом типовых заводских режимов многодуговой сварки, которым соответствовали определенные диапазоны отношений суммы скоростей подач электродных проволок сплошного сечения к скорости подачи ПП. При использовании электродных проволок сплошного сечения диаметром 4,0 мм и ПП диаметром 4,5 мм, установленной на второй дуге, это отношение для трех- и четырехдуговой сварки составляло соответственно 1,1…1,9 и 1,5…2,7. В производственных условиях с учетом допуска на состав ПП, изменений их состава по длине проволоки, колебаний режимов сварки, различных типов разделки кромок и значений коэффициента перемешивания шва рекомендуется, чтобы режимы трех- и четырехдуговой сварки соответствовали более узкому диапазону указанных отношений (1,3…1,7 и 1,8…2,4), что гарантирует оптимальное микролегирование шва.

С целью расширения диапазона режимов сварки возможна установка ПП, кроме второй, и на других дугах, поскольку ограниченное изменение режима горения дуги не оказывает существенного влияния на переход титана и бора из ПП в металл шва. Например, в условиях трехдуговой сварки при увеличении напряжения на второй дуге на 7 В (ток 850…900 А) содержание титана в металле шва уменьшилось на 0,001 мас. %, а бора практически не изменилось (табл. 4). Однако устанавливать ПП на первую дугу не желательно из-за избыточного количества наплавляемого металла, которое для ПП диаметром 4,5 мм на 20…30 % выше, чем для проволоки сплошного сечения диаметром 4,0 мм, а также соответствующего снижения провара. Кроме того, применять ПП на первой и последней дугах не рекомендуется в связи с возможностью возникновения неоднородности шва [13].

Результаты лабораторных испытаний промышленной партии ПП № 232 марки ПП-АСФ-1-3 при трехдуговой сварке контрольного сварного соединения из стали 10Г2ФБ под флюсом АН-67Б (I_1 = 1220 А; U_1 = 34 В; I_2 = 825 А; U_2 = 38 В; I_3 = 980 А; U_3 = 43 В; $v_{св}$ = 85 м/ч) приведены ниже:

металл шва имел следующий химический состав, мас. %: 0,074 C; 0,30 Si; 1,60 Mn; 0,32 Cr; 0,27 Mo; 0,027 Al; 0,030 Ti; 0,0044 B;

среднее значение ударной вязкости металла шва при температуре испытаний 0, –20 и –40 °С составило соответственно 183, 177 и 135 Дж/см^2;

твердость металла шва не превышала *HV* 237, что удовлетворяет требованиям действующей нормативной документации на газопроводные трубы.

Результаты испытания шва на статическое растяжение, полученные на образцах типа II (ГОСТ 6996–66), приведены в табл. 5.

Проволоку ПП-АСФ, помимо проволоки типа Св-08ХМ, можно применять также в сочетании

Таблица 5. Механические характеристики металла швов, полученных при испытании на статическое растяжение

Образец	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т/\sigma_в$	δ, %	ψ, %
1	596,7	751,9	0,79	27,0	66,3
2	594,7	734,8	0,81	24,0	62,3

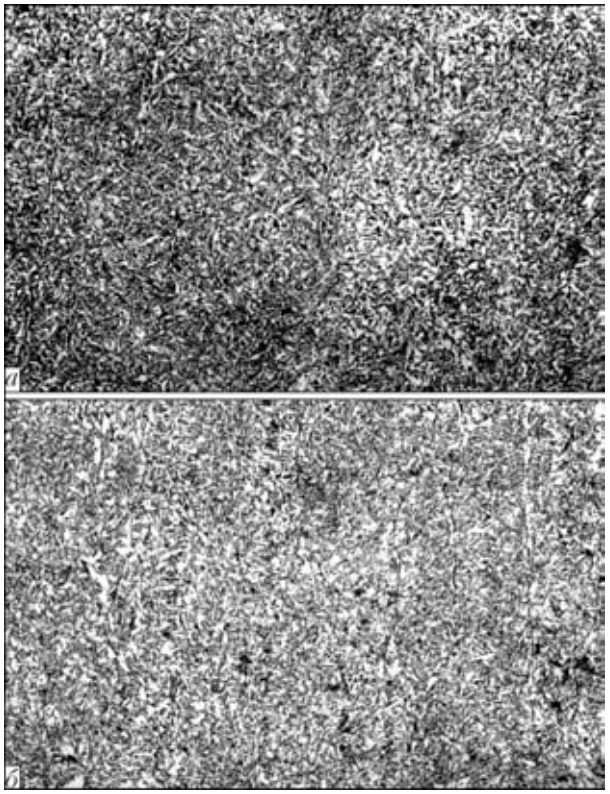


Рис. 1. Микроструктура (×500, травление в металле) металла швов, выполненных на трубах из стали класса прочности Х70, с использованием проволок Св-08ХМ + ПП-АСФ под флюсами АН-67Б (*а*) и АН-68 (*б*)

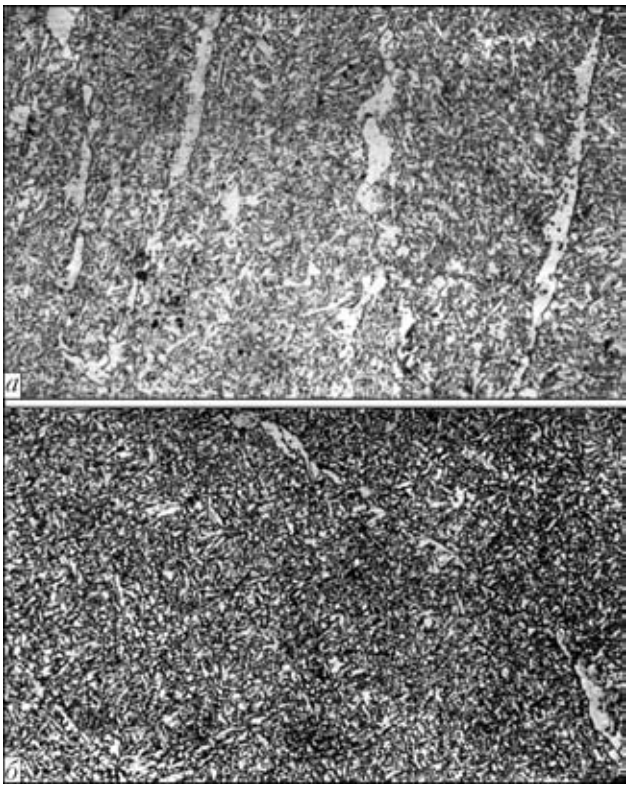


Рис. 2. Микроструктура (×500, травление в металле) металла швов, выполненных на трубах из стали класса прочности Х70 с использованием проволоки Св-08Г1НМА под смесью флюсов 50 % АН-67Б + + АН-60 (*а*) и под флюсом АН-67Б (*б*)

с проволоками Св-08ГМ (S2Mo). Использование проволоки типа Св-08Г1НМА не приемлемо из-за чрезмерного увеличения содержания в шве марганца и возможных падений значений ударной вязкости ниже допустимого уровня.

Сварка с применением разработанной ПП наружных швов опытных партий труб из стали класса прочности Х70 размером (1020…1420)×(16…19) мм, изготовленных на Харцызском трубном и Выксунском металлургическом заводах, подтвердила эффективность рассматриваемого способа, который позволил увеличить ударную вязкость шва примерно в 2 раза. Испытания показали, что, помимо нейтрального флюса АН-67Б (KCV^{-20} = 120…180 Дж/см^2), можно применять слабокислый флюс типа АН-68 (KCV^{-20} = 85…100 Дж/см^2), состав которого эквивалентен составу смеси флюсов 50 % АН-67Б+АН-60. Использование ПП в сочетании с кислым флюсом АН-60 существенного эффекта не дало вследствие повышенного содержания в металле шва кислорода (0,09…0,11 мас. %).

Металл швов, выполненных многодуговой сваркой проволоками Св-08ХМ и ПП-АСФ-1 под флюсом АН-67Б на трубах из стали класса прочности Х70, имел мелкодисперсную структуру*, содержащую до 85 об. % игольчатого феррита практически при отсутствии межзеренного полигонального феррита (рис. 1, *а*). Применение флюса АН-68 приводит к некоторому снижению доли игольчатого феррита и появлению редких прерывистых прослоек межзеренного полигонального феррита толщиной 2…5 мкм (рис. 1, *б*). Твердость металла швов в обоих случаях составляла *HV* 232…237.

Для сравнения на рис. 2 представлены менее благоприятные микроструктуры металла швов, выполненных проволокой Св-08Г1НМА без применения ПП на трубах текущего производства под смесью флюсов 50 % АН-67Б+АН-60 (рис. 2, *а*) и флюсом АН-67Б (рис. 2, *б*). Они характеризуются меньшим содержанием игольчатого феррита и большим полигонального, причем содержание межзеренного полигонального феррита составляет 7…11 об. %.

При внедрении процесса многодуговой сварки с применением на одной из дуг ПП, легированной титаном и бором, основной проблемой является обеспечение указанного выше соотношения суммы скоростей подач проволок сплошного сечения к скорости подачи ПП. Учитывая широкий сортамент труб и диапазон изменения режимов сварки, целесообразно использовать для этой цели средства автоматического регулирования.

Для реализации указанного процесса сварки на станах сварки внутренних швов необходимо обеспечить равнопрочность стыкового соединения концов ПП при замене катушек ввиду больших

* Металлографический анализ структуры металла швов выполнен ведущим инженером Л. Г. Шитовой.

усилий, которые возникают при протягивании проволоки через проводки длиной до 15 м. Для решения этой задачи требуется специальная подготовка торцов ПП к сварке и применение стыкосварочных машин с программируемым циклом.

Выводы

1. Микролегирование швов титаном и бором при многодуговой сварке под нейтральными или слабокислыми флюсами в 1,5…2,5 раза увеличивает их ударную вязкость на трубах из сталей типа 10Г2ФБ. Оптимальное содержание в металле шва титана и бора составляет соответственно 0,022…0,038 и 0,0025…0,0065 мас. %.

2. Исследован вариант микролегирования металла шва через ПП, установленную на одной из дуг, в сочетании с проволоками сплошного сечения Св-08ХМ на остальных дугах при сварке под флюсами АН-67Б, АН-68, АН-47П и смесью флюсов 50 % АН-67Б+АН-60. Ударная вязкость KCV^{-20} последнего слоя шва в зависимости от марки флюса составляет 80…180 Дж/см^2. Помимо проволоки Св-08ХМ, можно применять проволоку типа Св-08ГМ (S2Mo).

3. Отношение суммы скоростей подач проволок сплошного сечения к скорости подачи ПП должно находиться в диапазоне значений, определяемом маркой ПП и условиями сварки.

4. Разработан состав ПП, легированной титаном и бором, марок ПП-АСФ-1-2, ПП-АСФ-1-3 и ПП-АСФ-1-4 (ТУУ 28.7- 31206116-008–2003 с Изменением № 1) для многодуговой сварки низколегированных сталей под нейтральными или слабокислыми флюсами в сочетании с проволоками типа Св-08ХМ или Св-08ГМ. Применение указанных ПП дало положительные результаты при изготовлении опытных партий газопроводных труб.

5. При определенном снижении содержания титана и бора проволока типа ПП-АСФ может применяться для сварки под основными агломерированными флюсами с целью повышения ударной вязкости шва при температуре ниже –20 °С.

6. Микролегирование металла швов титаном и бором через ПП, установленную на одной из дуг, может найти применение при многодуговой сварке под флюсом различных конструкций из низколегированной стали.

1. *Nies H., Keville B., Schlatter B.* Schweiβen von Groβrohren mit dem Unterpulver — Mehrdrahtverfahren // Oerlikon Schweissmitteilungen. — 1996. — № 131, May. — S. 4–13.
2. *Sordi J., Scholz E., Schuster G.* Groβrohren fur Sauergas — Optimierung des UP-Mehrdrahtschweiβens mit Fuelldrahtelektroden // Ibid. — 1990. — № 122, Febr. — S. 11–17.
3. *Scholz E., Weiland F.* Derzeitige Stand des UP Schweiβens mit mikrolegierten Fuelldrahtelektroden // Ibid. — 1984. — № 106, Okt. — S. 4–14.
4. *Engindeniz E.* Unterpulver — Hohleistungsschweiβen mit Fuelldrahtelektroden // Ibid. — 1994. — № 130, April. — S. 11–20.
5. *Engindeniz E.* Unterpulver — Schweiβen mit Fuelldrahtelektroden // Jahrbuch der Schweiβtechnik. — Duesseldorf, DVS, 2000. — S. 11–20.
6. *Liu Z., Lau T., North T. H.* Deposit properties and the Ti–O–B–N balance in submerged arc welding. — S.l., [1987]. — 24 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. II-A-713–87).
7. *Study* on the toughness of large-heat input weld metal for low temperature-service TMCP steel / Y. Horii, S. Ohkita, M. Wakabayashi, M. Namura // Nippon Steel Techn. Rep. — 1988. — № 37, April. — P. 1–9.
8. *Measures* for toughness improvement of heavy-walled UOE pipe's submerged arc weld metal / F. Kawabata, S. Sacaguchi, J. Matsuyama, N. Nishiyama. — S.l., [1987]. — 22 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-953–86 II-A-713–87).
9. *Подгаецкий В. В.* О влиянии химического состава шва на его микроструктуру и механические свойства (Обзор) // Автомат. сварка. — 1991. — № 2. — С. 1–9.
10. *Влияние* кислорода на образование структуры игольчатого феррита в низколегированном металле сварных швов. (Обзор) / И. К. Походня, В. В. Головко, Л. В. Денисенко, В. Ф. Грабин // Там же. — 1999. — № 2. — С. 3–11.
11. *Пат. 74469 Україна, МКИ 7 В 23 К 35/368.* Склад порошкового дроту / А. М. Алімов, А. О. Рибаков, С. Ю. Бать та ін. — Опубл. 15.12.2005.
12. *Заявка 2004106363/02 РФ, МКИ 7 В 23 К 35/368.* Состав порошковой проволоки / А. Н. Алимов, А. А. Рыбаков, С. Ю. Бать и др. — Опубл. 02.03.2004.
13. *Engindeniz E., Berg B., Linden W.* Groβrohrfertigung fur Sauergasleitungen aus schweiβtechnischer Sicht // Jahrbuch der Schweiβtechnik. — Duesseldorf: DVS, 2000. — S. 539–544.

Microalloying of the weld metal with titanium and boron in multi-arc welding of pipes, performed through a flux-cored wire placed on one of the arc, was investigated. This process is characterised by the use of neutral and sub-acid fluxes, instead of the basic ones, which is accompanied by improvement of weld formation at increased welding speeds. The optimal content of titanium and boron providing high impact toughness of the weld metal was determined. Industrial tests of the welding process using the developed flux-cored wire of the ПП-АСФ-1 grade yielded positive results.

Поступила в редакцию 17.01.2007

УДК 621.791:004.518

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЦЕПЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ТОКОМ СВАРОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Чл.-кор. НАН Украины **О. К. НАЗАРЕНКО**, **В. С. ЛАНБИН**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены с использованием компьютерной математической симуляции высоковольтные цепи управления током пучка электронов сварочных пушек. Показано, что в случае применения автономного источника управляющего напряжения искровой пробой в эмиссионной системе сопровождается длительным (около 10 мс) полным открыванием эмиссионной системы, что ведет к скачку тока, нарушающему формирование сварного шва. При управлении током пучка с помощью автоматического смещения такие опасные скачки тока после искровых пробоев исключаются.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, управление, ток пучка, высоковольтные цепи, эмиссионная система, искровой пробой, переходные процессы, дефекты, формирование швов

Основным способом управления током пучка электронов является изменение потенциала управляющего электрода эмиссионной системы сварочной пушки. При этом наиболее распространены две схемы формирования управляющего напряжения:

с использованием автономного источника напряжения (причем минус источника ускоряющего напряжения подключен к катоду эмиссионной системы);

с применением автоматического смещения [1] (в цепь катода эмиссионной системы включена электронная лампа с сеточным управлением [2], а минус источника ускоряющего напряжения соединен с управляющим электродом эмиссионной системы).

В стационарном режиме работы эмиссионной системы управление током пучка электронов осуществляется одинаково успешно при использовании любой из указанных схем. Однако в практике применения автономного источника напряжения приходится сталкиваться со значительными нарушениями формирования швов на тонколистовых материалах, возникающими после искровых пробоев эмиссионной системы, которые сопровождаются разрядом емкостей высоковольтных цепей за доли микросекунды [3]. При этом процесс сварки не прерывается, поскольку защита не отключает источник, но в шве образуется кратер (рис. 1) или может произойти прожог изделия. Как показали исследования, значение энергии пучка, необходимой для образования такого дефекта, составляет приблизительно 300 Дж. Поэтому образование дефекта не может быть объяснено только высвобождением запасенной энергии источника питания, поскольку ее значение составляет менее 10 Дж [3]. Вероятность нарушения процесса сварки увеличивается при использовании сварочных пушек, перемещаемых внутри крупногабаритных вакуумных камер, когда длина высоковольтного кабеля достигает 50 м, а его собственная емкость — $1 \cdot 10^{-8}$ Ф. Степень дефектности швов тем выше, чем больше мощность используемого энергоблока сварочная пушка–источник питания. В то же время при сварке металлов большой толщины такое нарушение практически не влияет на формирование шва. Затронутые выше вопросы ранее не обсуждались в технической литературе, что обусловило проведение ряда исследований, результаты которых освещены ниже. В настоящей работе не рассматриваются переходные процессы, которые связаны с возникновением дуговых разрядов в эмиссионной системе, поскольку в современном источнике ускоряющего напряжения эффективно предотвращается переход искровых разрядов в дуговые [4].

Упрощенные схемы двух высоковольтных цепей управления током пучка — с автономным источником управляющего напряжения (рис. 2, *а*) и автоматическим смещением (рис. 2, *б*) — позволяют рассмотреть происходящие в них переходные процессы после искрового пробоя эмиссионной системы.

Практически всегда искровой пробой вакуумной изоляции происходит в ускоряющем промежутке анод–управляющий электрод, при этом пробойный ток поддерживается за счет разряда рас-

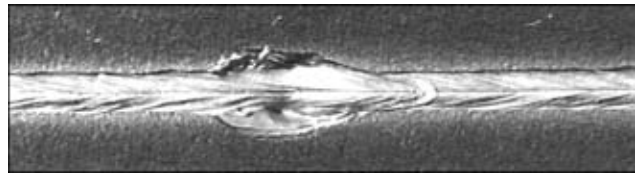


Рис. 1. Внешний вид металла шва с дефектом в виде кратера, обусловленного кратковременным импульсом тока пучка электронов с энергией приблизительно 300 Дж

© О. К. Назаренко, В. С. Ланбин, 2007

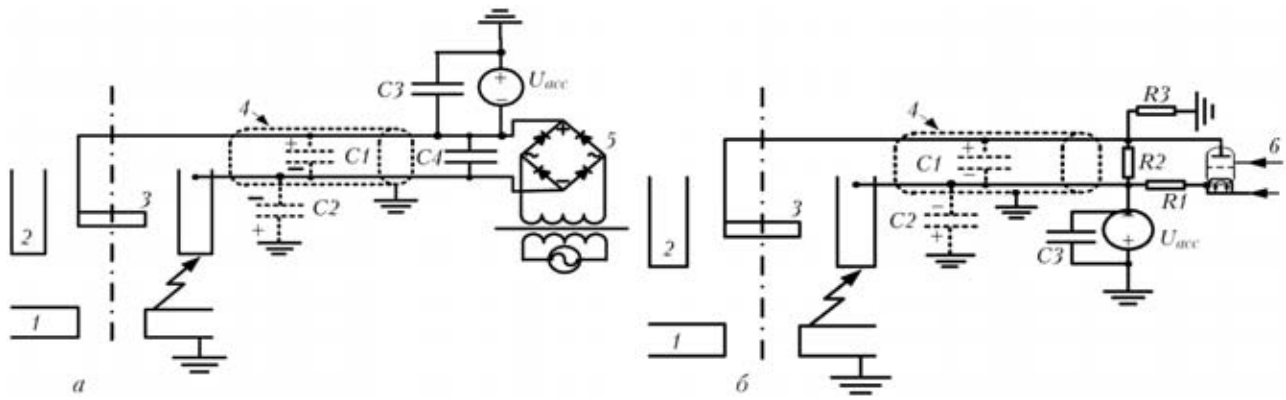


Рис. 2. Упрощенные схемы управления током пучка электронов с использованием автономного источника управляющего напряжения (*а*) и автоматического смещения (*б*): *1* — анод; *2* — управляющий электрод, *3* — катод; *4* — высоковольтный кабель; *5* — источник управляющего напряжения; *6* — управляющая лампа; *R1* — резистор обратной связи в цепи стабилизации тока пучка; *R2*, *R3* — сопротивление плечей высоковольтного делителя напряжения; стрелками указано основное место искрового пробоя ускоряющего промежутка; остальные обозначения см. в тексте

пределенной емкости кабеля *C2* и суммарной емкости фильтра *C3*, а также распределенных емкостей источника ускоряющего напряжения U_{acc}. Во время искрового пробоя эмиссионной системы управляющий электрод оказывается практически накоротко соединенным с землей. Важно отметить, что в случае использования источника управляющего напряжения (рис. 2, *а*) разряд емкости *C3* произойдет через распределенную емкость *C1* кабеля и емкость фильтра *C4* источника управляющего напряжения $U_{упр}$. При работе с автоматическим смещением (рис. 2, *б*) ток разряда емкости *C3* не проходит по цепям формирования управляющего напряжения, при этом условия их работы улучшаются. После разряда емкостей искровой разряд прекращается, что позволяет восстановиться вакуумной изоляции и зарядиться емкостям высоковольтных цепей за время, зависящее от внутреннего сопротивления источников, самих емкостей и параметров токоведущих цепей.

Остается неизвестным, как изменяются во время пробоя и после него разность потенциалов управляющий электрод–катод и ток пучка.

Осуществить непосредственно с помощью электронных устройств запись быстротекущих переходных процессов при искровом пробое эмиссионной системы весьма затруднительно, поскольку исследуемые цепи погружены в трансформаторное масло и находятся под высоким потенциалом. Кроме того, на сами измерительные цепи при пробоях воздействуют мощные электромагнитные помехи, существенно искажающие картину регистрируемых процессов. Поэтому нами применено компьютерное моделирование высоковольтных цепей управления сварочным током с использованием одной из известных программ OrCAD PCB Designer with Pspice (фирма «Cadence Design Systems»).

При моделировании схем полагаем, что в обоих случаях применены одинаковые высоковольтные кабели, эмиссионные системы, а также источники ускоряющего напряжения 60 кВ мощностью 30 кВт с внутренним сопротивлением 5 кОм. Модуляционные характеристики эмиссионных систем приведены на рис. 3, по ним можно задать значения управляющего напряжения и внутреннего сопротивления эмиссионной системы, соответствующие выбранному значению стационарного тока пучка. Высоковольтный кабель длиной 50 м имеет три токоведущих провода для питания катода и его подогревателя (спирали). Провода окружены оплеткой, которая соединена с управляющим электродом пушки. Распределенная емкость между проводами составляет 50 пФ/п.м, а между оплеткой и внешним заземленным экраном — 150 пФ/п.м. Распределенная индуктивность оплетки и каждого из проводов равна 1,5 мкГн/п.м, внутреннее сопротивление источника управляющего напряжения — 30 кОм.

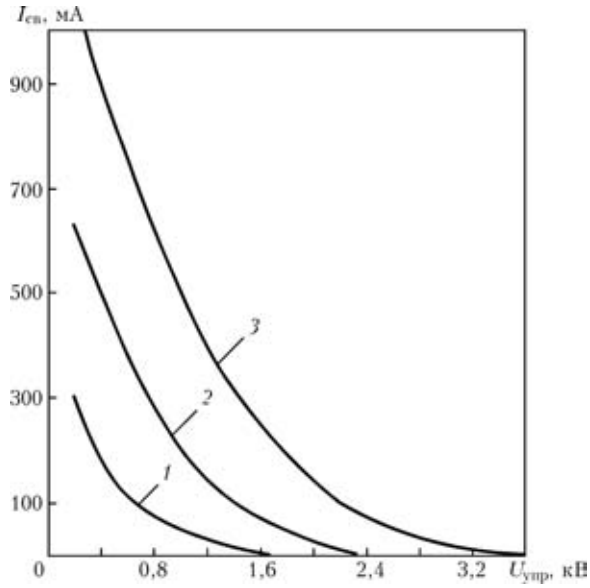


Рис. 3. Модуляционные характеристики эмиссионных систем мощностью 15 (*1*), 30 (*2*) и 60 кВт (*3*) при U_{acc} = 60 кВ

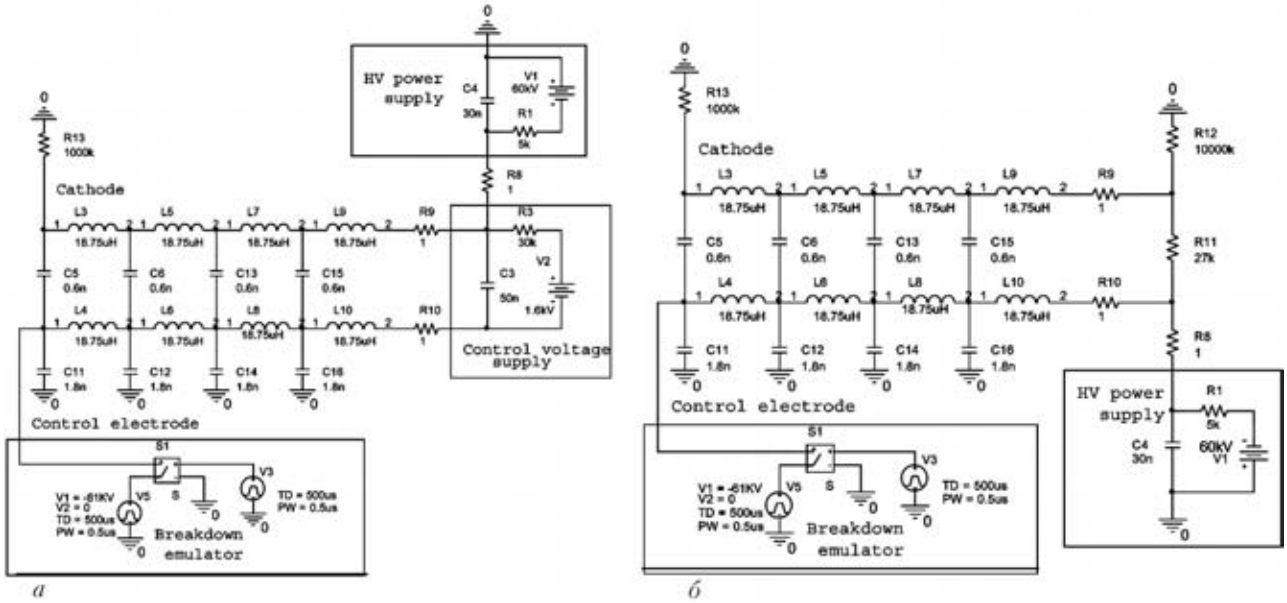


Рис. 4. Графические окна компьютерного математического симулятора для анализа высоковольтных цепей управления током пучка 60 мА с автономным источником (*а*) и автоматическим смещением (*б*)

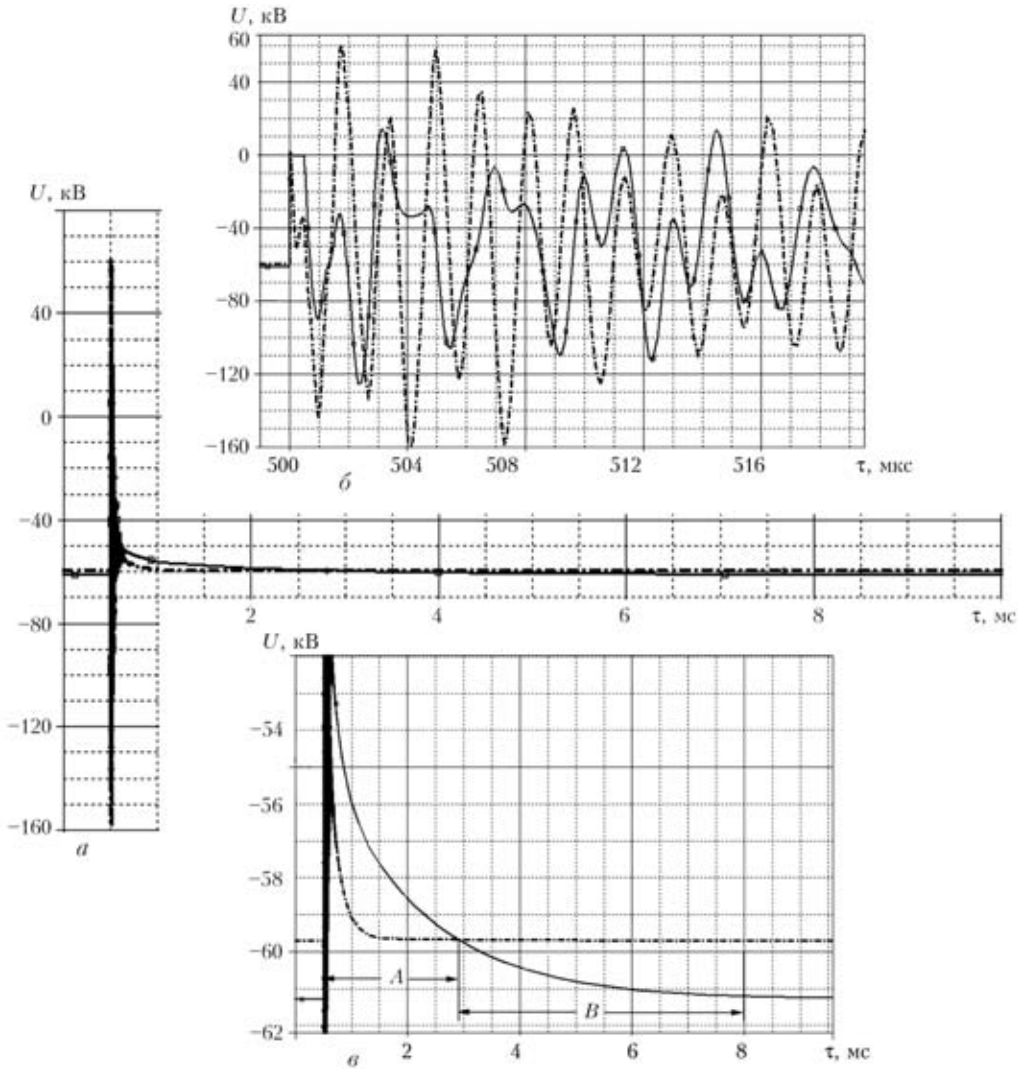


Рис. 5. Изменение потенциалов *U* управляющего электрода (сплошные кривые) и катода (штрихпунктирные) после пробоя эмиссионной системы с автономным источником управляющего напряжения: *а* — общая картина; *б*, *в* — растянутые шкалы соответственно времени и потенциала

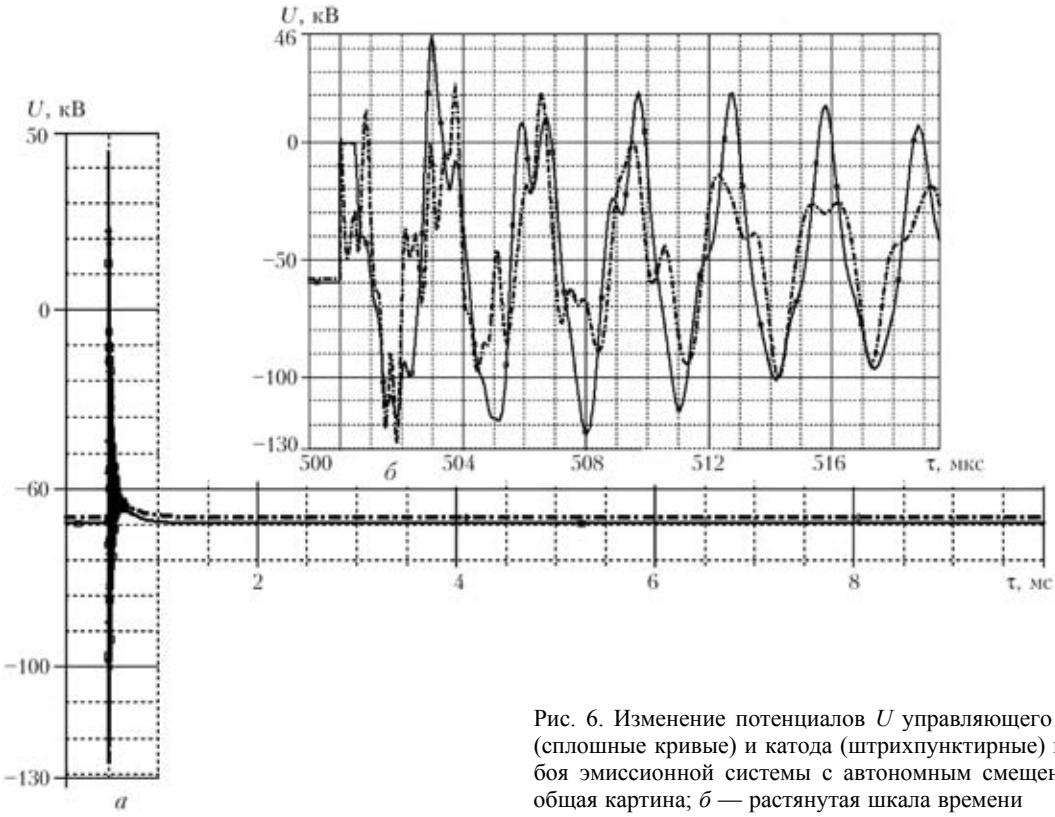


Рис. 6. Изменение потенциалов U управляющего электрода (сплошные кривые) и катода (штрихпунктирные) после пробоя эмиссионной системы с автономным смещением: *а* — общая картина; *б* — растянутая шкала времени

На рис. 4 показаны графические окна компьютерного математического симулятора высоковольтных цепей управления током пучка с автономным источником управляющего напряжения (рис. 4, *а*) и автоматическим смещением (рис. 4, *б*) при исходном стационарном токе пучка 60 мА и других заданных выше параметрах.

Электронная проводимость сварочной пушки, соответствующая току 60 мА, эмулируется резистором с сопротивлением 1 мОм, подключенным в цепь между землей и токоподводом к катоду. Токоподвод к управляющему электроду соединен с эмулятором контактора, замыкающим на 0,5 мкс управляющий электрод на землю с задержкой 100 мкс после начала процесса эмуляции. Представление высоковольтного кабеля в виде одной пары сосредоточенных элементов — емкости и индуктивности — не выявило в полной мере резонирующий характер цепи. Поэтому кабель рассматривается как длинная линия и моделируется четырьмя звеньями, причем дальнейшее увеличение количества звеньев не меняет характера переходных процессов, которые обнаруживаются путем эмуляции.

На рис. 5 приведены временные изменения потенциалов управляющего электрода и катода после искрового пробоя эмиссионной системы с автономным источником управляющего напряжения. Видно, что перед пробоем эмиссионная система формирует пучок электронов с током 60 мА, а управляющее напряжение составляет 1,6 кВ (рис. 5, *в*). После пробоя потенциалы как управляющего электрода, так и катода становятся равными потенциалу земли (рис. 5, *б*), после чего потенциал катода сразу, а потенциал управляющего электрода с задержкой на время существования короткого замыкания (0,5 мкс) в результате затухающих автоколебаний начинают изменяться с частотой около 1 мГц и амплитудой +60…–160 кВ. Автоколебания прекращаются примерно через 10 мкс; общее время восстановления стационарного состояния цепи составляет около 10 мс. В течение этого времени управляющий электрод находится 3 мс под положительным потенциалом по отношению к катоду (участок *A* на рис. 5, *в*), т. е. эмиссионная система работает в режиме полного отбора тока катода. В это время на изделии может выделиться энергия пучка до 200 Дж. С момента уравнивания потенциалов управляющего электрода и катода и до установления исходной стационарной разности потенциалов — 1,6 кВ (участок *B* на рис. 5, *в*) дополнительно выделяется энергия пучка не менее 100 Дж. Всего за период восстановления стационарного состояния высоковольтной цепи на изделии выделится энергия до 300 Дж, чем и объясняется образование в шве в виде кратера (см. рис. 1).

При пробое вакуумного промежутка эмиссионной системы, работающей в режиме автоматического смещения, характер переходных процессов существенно отличается от рассмотренного выше (рис. 6):

потенциал управляющего электрода остается отрицательным по отношению к потенциалу ка-

тода, что исключает повреждение изделия избыточным током;

время восстановления стационарного состояния высоковольтной цепи составляет всего 1 мс, т. е. на порядок ниже;

амплитуда перенапряжений меньше почти на 25 %, что несколько снижает риск повреждения элементов высоковольтных цепей.

Выводы

1. В случае применения автономного источника управляющего напряжения искровой пробой эмиссионной системы сварочной пушки сопровождается длительным (около 10 мс) открыванием эмиссионной системы, причем в течение 3 мс управляющий электрод находится под положительным потенциалом по отношению к катоду и эмиссионная система работает в режиме полного отбора тока катода. Как следствие, уже после завершения пробоя на изделие может воздействовать пучок электронов, значение мощности которого существенно выше заданной, что приводит к нарушению формирования шва.

2. При управлении током пучка с помощью автоматического смещения потенциал управляющего электрода остается отрицательным по отношению к потенциалу катода, что исключает повреждение изделия избыточным током. Время восстановления стационарного состояния высоковольтной цепи составляет только 1 мс, т. е. на порядок меньше, чем в случае применения автономного источника управляющего напряжения.

3. Результаты компьютерного моделирования высоковольтных цепей управления сварочным током хорошо согласуются с опытом их практического использования и убедительно свидетельствуют в пользу управления током пучка с помощью автоматического смещения.

Авторы считают своим долгом выразить признательность В. Е. Локшину и В. В. Галушке за конструктивное участие в дискуссии по обсуждаемой выше теме.

1. *Бонч-Бруевич А. М.* Применение электронных ламп в экспериментальной физике. — М.: Гостехтеориздат, 1955. — 654 с.
2. *Pat. 24 60 424 Deutsche, H 01 J 37/24.* Strahlstromsteuerung fur eine Elekronenstrahl-Schweissmachine / R. Mayer. — Publ. 17.03.77.
3. *Раховский В. И.* Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. — М.: Наука, 1970. — 320 с.
4. *Назаренко О.К., Локшин В. Е.* Динамические характеристики высоковольтных источников питания для электронно-лучевой сварки // Автомат. сварка. — 2005. — № 1. — С. 36–38.

High-voltage circuits for control of the welding gun beam current were studied using mathematical computer simulation. It is shown that in the case of using an independent control voltage source the spark breakdown in the emission system is accompanied by a long (about 10 ms) full opening of the emission system, this leading to a surge of current violating the weld formation. Control of the beam current using an automatic offset eliminates such dangerous current surges after spark breakdowns.

Поступила в редакцию 30.12.2005

СИ «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Сигнальная информация (СИ) «Сварка и родственные технологии» содержит оперативную информацию на языке оригинала и в русском переводе оглавлений научно-технических журналов, монографий, сборников, трудов конференций, названий переводов статей, перечней документов Международного института сварки и других отечественных и зарубежных информационных материалов из более чем 100 периодических изданий 52 стран мира.

Сигнальная информация (СИ) «Сварка и родственные технологии» издается научно-технической библиотекой Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины с 1995 г. Периодичность 6 номеров в год. С 2005 г. СИ выпускается и рассылается в электронном варианте.

Сигнальная информация «Сварка и родственные технологии» предназначена для научных работников и инженеров, профессорско-преподавательского состава, аспирантов и специалистов сварочного производства.

Местом хранения оригиналов всех изданий, представленных в выпусках СИ, является научно-техническая библиотека Института электросварки. С материалами можно ознакомиться в читальном зале библиотеки или заказать ксерокопии отдельных статей, переводов, документов и т. п. Для заказа определенного документа достаточно указать только регистрационный номер материала, который находится в конце каждого описания. Например: СИ. 06.01.10.

По вопросам подписки и условиям выполнения заказов обращаться по адресу:
03680, ГСП, Киев-150, ул. Боженко, 11. Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Научно-техническая библиотека.
Факс: (044) 5280486; справки по телефону: 287-07-77.
E-mail: library@paton.kiev.ua

УДК 621.791.052: 620.17

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТА НА ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С НЕСИММЕТРИЧНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ*

А. А. ОСТСЕМИН, д-р техн. наук (Южно-Уральский научно-производственный центр, г. Челябинск, РФ)

На основе метода решения плоской задачи теории пластичности выполнена расчетная оценка статической прочности с несимметричной механической неоднородностью сварных соединений с поверхностным трещиноподобным дефектом. Исследовано напряженное состояние механически неоднородных стыковых соединений с поверхностным дефектом. Предложенная методика оценки статической прочности сварных соединений с несимметричной механической неоднородностью позволит определить несущую способность путем введения в расчетные формулы коэффициентов механической неоднородности.

Ключевые слова: дуговая сварка, стыковые соединения, относительная толщина, мягкая прослойка, поверхностная трещина, предельное растягивающее усилие, контактное упрочнение, несимметричная механическая неоднородность, касательные напряжения на линии сплавления шва, коэффициенты механической неоднородности

Сварные соединения с несимметричной механической неоднородностью распределения прочностных свойств часто встречаются на практике [1–5]. В соединениях из низколегированных сталей магистральных трубопроводов по обе стороны металла ЗТВ (участков мягкой прослойки) располагается участок с наибольшей прочностью (сварной шов) и менее прочный (основной металл) [1]. Мягкая прослойка хорошо определяется замерами твердости.

В работе [4] показано, что на прочность сварных соединений при статическом нагружении оказывает влияние вид механической неоднородности. В сварных соединениях с несимметричной механической неоднородностью контактное упрочнение может реально проявляться как при статическом, так и циклическом нагружениях [5].

В сварном продольном стыке магистрального трубопровода сварной шов является самым прочным (СТ), основной металл имеет меньшую прочность (Т); между ними находится мягкая прослойка (М) [6]. Такой характер несимметричной механической неоднородности влияет в целом на свойства сварного соединения труб большого диаметра [7].

Существующие методы расчета на прочность таких соединений основаны на теории, что мягкая прослойка, ослабляющая сварной стык, окружена более прочным металлом с одинаковыми механическими свойствами [8, 9].

На основании экспериментальных исследований механических характеристик для сварных соединений с несимметричной механической неоднородностью (рис. 1) проводится расчет [3] по усредненному значению степени механической неоднородности сварных соединений

$$K_{\text{в ср}} = \frac{K_{\text{в1}} + K_{\text{в2}}}{2},$$

где $K_{\text{в1}} = \sigma_{\text{в}}^{\text{СТ}}/\sigma_{\text{в}}^{\text{М}}$; $K_{\text{в2}} = \sigma_{\text{в}}^{\text{Т}}/\sigma_{\text{в}}^{\text{М}}$; $\sigma_{\text{в}}^{\text{СТ}}$, $\sigma_{\text{в}}^{\text{Т}}$, $\sigma_{\text{в}}^{\text{М}}$ — пределы прочности сварного шва, основного металла и металла ЗТВ.

При этом особенности совместного пластического деформирования более прочных (СТ и Т) и менее прочного (М) металлов рассматриваемых соединений не учитываются. При статических испытаниях сварных образцов на растяжение их разрушение при наличии пластической деформации, как правило, происходит по месту минимальной твердости металла ЗТВ, который характеризуется развитой структурной, химической и механической неоднородностью. При строительно-монтажных работах возникают различные отклонения от заданной технологии, появляются такие поверхностные дефекты, как несплавления, подрезы, трещины, кратеры, а также дефекты, обнаруженные в металле ЗТВ (надрезы, риски, трещины, царапины, задиры), на трубопроводах. Актуальной задачей является изучение влияния поверхностного плоскостного дефекта в металле ЗТВ труб, где пластичность (относительное удлинение δ и сужение ψ) достигает минимального значения.

Влияние поверхностного дефекта, расположенного в металле ЗТВ, на статическую прочность при симметричной механической неоднородности приведено в работе [10]. При этом установлено, что основным видом разрушения труб большого диаметра являются поверхностные трещины, расположенные рядом с линией сплавления сварного

* Работа поддержана грантом РФФИ 05.08.18179а.

© А. А. Остсемин, 2007

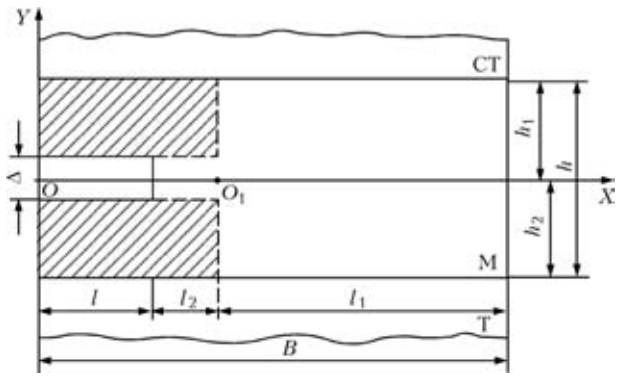


Рис. 1. Параметры мягкой прослойки с несимметричной механической неоднородностью и поверхностным трещиноподобным дефектом сварного шва (обозначения см. в тексте)

шва. В очаге разрушения обнаружены трещиноподобные дефекты в виде трещин, рисок, механических царапин. Все случаи разрушения стенок труб происходили при средних рабочих давлениях в металле ЗТВ вблизи концентраторов напряжений, поэтому теоретический анализ влияния поверхностных трещиноподобных дефектов в металле ЗТВ сварного шва на статическую прочность магистральных, промысловых трубопроводов при вязком разрушении имеет большое значение. Важное практическое значение имеет также оценка технологии сварки, эксплуатационной надежности сварных соединений труб при наличии поверхностных дефектов и разработка рекомендаций по определению степени опасности трещиноподобных дефектов.

Для получения более точного теоретического решения предлагается расчетная методика, основанная на закономерностях механического поведения влияния поверхностных дефектов соединений с несимметричной неоднородностью сварного шва. В данной работе, наряду с обычными предположениями и упрощающими условиями, которые принимаются при теоретическом изучении механически неоднородных соединений [10, 11], используется предположение [12], которое согласуется с теорией пластического слоя [13] и обобщает известное допущение Л. Прандтля — касательные напряжения τ_{xy} в мягкой прослойке зависят от расстояния от плоскости, на которой $\tau_{xy} = 0$ (рис. 1). Метод исследования основан на теоретическом решении плоской задачи теории пластичности [12, 14].

Целью данной работы является определение влияния поверхностного трещиноподобного дефекта на статическую прочность сварных соединений с несимметричной механической неоднородностью при вязком разрушении. Особенностью характера пластической деформации сварных соединений с трещиноподобным дефектом является наличие точки ветвления пластического течения мягкой прослойки O_1 (рис. 1). В зоне между свободным краем прослойки, содержащим дефект, и точкой O_1, над и под дефектом (заштрихованная область) считается, что пластическое течение отсутствует, что согласуется с результатами работы [15].

В работе [16] на основе теоретического анализа напряженного состояния механически неоднородного сварного соединения в окрестности контактной поверхности получена зависимость параметра α от $K_в$, которая при малой механической неоднородности соединения ($K_в < 1{,}5$) с высокой точностью может быть представлена выражением $\alpha = K_в - 1$.

На контактной поверхности касательные напряжения $\tau_{xy}^{кон}$ не достигают предела текучести на сдвиг $K_М$ вследствие вовлечения в пластическую деформацию основного металла и шва, поэтому для больших значений x, т. е. для точек, удаленных от оси OY (плоскости раздела течения) и находящихся вблизи контактной поверхности, граничные условия будут следующими [14]:

$$\tau_{xy}^{K_1} = \tau_{xy}(x_1 h_1) = \alpha_1 K \quad (0 < \alpha_1 \le 1), \tag{1}$$

$$\tau_{xy}^{K_2} = \tau_{xy}(x_1 - h_2) = \alpha_2 K \quad (0 < \alpha_2 \le 1), \tag{2}$$

где $\tau_{xy}^{K_1}$, $\tau_{xy}^{K_2}$ — соответственно касательные напряжения на поверхности контакта СТ–М и М–Т; h_1, h_2 — соответственно расстояния от плоскости, на которой касательные напряжения равны нулю, до контактной поверхности СТ–М и М–Т ($h_1 + h_2 = h$, h — толщина мягкой прослойки); α_1, α_2 — коэффициенты, характеризующие механическую неоднородность и зависимые соответственно от $K_{в1}$ и $K_{в2}$.

Решение для касательного напряжения определяем в следующем виде [11]:

$$\tau_{xy}(x, y) = \varphi(x) y, \tag{3}$$

где $\varphi(x)$ — нечетная функция, требующая определения.

Зная параметры α_1 и α_2, можно найти h_1 и h_2 [14]. Для этого в равенство (3) поочередно вводим $y = h_1$ и $y = -h_2$ и сравниваем полученные выражения с граничными условиями (1) и (2). Тогда $\alpha_1 h_2 = \alpha_2 h_1$, откуда

$$h_1 = \frac{\alpha_1 h}{\alpha_1 + \alpha_2}, \quad h_2 = \frac{\alpha_2 h}{\alpha_1 + \alpha_2}. \tag{4}$$

Положение нейтральной линии в прослойке (где $\tau_{xy} = 0$) не совпадает с геометрической осью симметрии и смещено в сторону менее прочного (Т) основного металла, что подтверждается экспериментальными исследованиями [5]. Сдерживание пластических деформаций мягкой прослойки тем больше, чем меньше относительная тол-

щина χ прослойки и чем прочнее окружающий ее металл. Если мягкую прослойку окружают металлы с различной прочностью (Т и СТ), то сдерживание пластических деформаций мягкого металла будет проявляться в большей мере на контакте с более прочным металлом (СТ). Поэтому участок ЗТВ, прилегающий к металлу с большей прочностью (СТ), становится более прочным и разрушение переносится в сторону металла с меньшей прочностью (Т).

Решая приближенно систему уравнений пластического равновесия при условии пластичности Губера–Мизеса с помощью результатов работы [12], получаем

$$\sigma_{x,\,i} = K_{\text{M}}\{-0{,}5\ln\operatorname{ch}\frac{2(\alpha_1+\alpha_2)\,[x-(l+l_2)]}{h_i}+ \\ +\frac{(\alpha_1+\alpha_2)^2}{h_i^2}y^2+\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2\chi}- \\ -0{,}5\ln 2-\frac{1}{3}(\alpha_1^2-\alpha_1\alpha_2+\alpha_2^2)\}, \qquad (5)$$

$$\sigma_{y,\,i} = K_{\text{M}}\{-0{,}5\ln\operatorname{ch}\frac{2(\alpha_1+\alpha_2)\,[x-(l+l_2)]}{h_i}+ \\ +\frac{(\alpha_1+\alpha_2)^2}{h_i^2}\frac{y^2}{\operatorname{ch}^2\left[\frac{2(\alpha_1+\alpha_2)}{h_i}\chi\right]}+ \\ +2-0{,}5\ln 2+\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2\chi}-\frac{1}{3}(\alpha_1^2-\alpha_1\alpha_2+\alpha_2^2)\}, \qquad (6)$$

$$\tau_{xy,\,i} = K_{\text{M}}\frac{\alpha_1+\alpha_2}{h_i}y\operatorname{th}\frac{2(\alpha_1+\alpha_2)\,[x-(l+l_2)]}{h_i}, \qquad (7)$$

где $-h_1 < y < h_2$, $i = 1,2$.

Если $l + l_2 < x < B$ (l — длина трещиноподобного дефекта, l_2 — зона пластического слоя, B — ширина сварного соединения), то в формулах (5)–(7) следует принять $h_i = h_1$. В этом случае формулы (5)–(7) определяют компоненты тензора напряжений в мягкой прослойке справа от точки ветвления O_1. Для зоны пластического слоя l_2, расположенной между вершиной дефекта и точкой O_1, т. е. $l < x < l + l_2$, принимаем $h_1 = h_2$. Координаты точки ветвления O_1 получим, если приравнять значения напряжений σ_x слева и справа от этой точки: $l_1/h_1 = l_2/h_2$. Далее приходим к системе уравнений относительно l_1 и l_2 (см. рис. 1):

$$l_1 + l_2 = B - l, \quad l_1 = \frac{h(B-l)}{h+\Delta},$$

или

$$l_1\Delta = h_2 h, \quad l_2 = \frac{\Delta(B-l)}{h+\Delta}, \qquad (8)$$

где h — толщина сварного соединения; Δ — ширина дефекта.

Для сварных соединений с непроваром $\Delta \le$ $\le$ 0,1 мм согласно уравнению (8) смещение точки ветвления пластического течения l_2 от вершины дефекта мало по сравнению с шириной образца B. Можно считать, что точка ветвления O_1 находится на вершине непровара и снижение напряжений σ_y от их максимального значения $\sigma_y^{\max}$ до предела текучести металла ЗТВ на свободной поверхности дефекта происходит скачком на малой базе $l_2 \to 0$. Такое допущение позволяет существенно упростить расчет средних предельных напряжений для сварных соединений с поверхностным дефектом в металле ЗТВ.

Использовав условие статической эквивалентности суммарных напряжений σ_y внешнему усилию P и проинтегрировав их, найдем среднее предельное напряжение $\sigma_{y\,\text{ср}}$. Затем получим суммарное усилие

$$P = P_1 + P_2, \; P_1 = \int_{l+l_2}^{\beta}\sigma_y(x, h_1)dx, \; P_2 = \int_{l}^{l+l_2}\sigma_y(x, h_2)dx.$$

Вычислив интегралы, получим

$$P_i = K_{\text{M}} l_i\left[-\frac{\alpha_1^2+\alpha_2^2+0{,}2}{\alpha_1+\alpha_2}\chi^{**}+\frac{\alpha_1+\alpha_2}{4\chi^{**}}+ \right. \\ \left. +2-\frac{1}{3}(\alpha_1^2-\alpha_1\alpha_2+\alpha_2^2)\right], \qquad (9)$$

где $\chi^{**} = \dfrac{2(h+\Delta)}{B-l}$.

С учетом формул (5)–(9) вычислим среднее напряжение для несимметричной механической

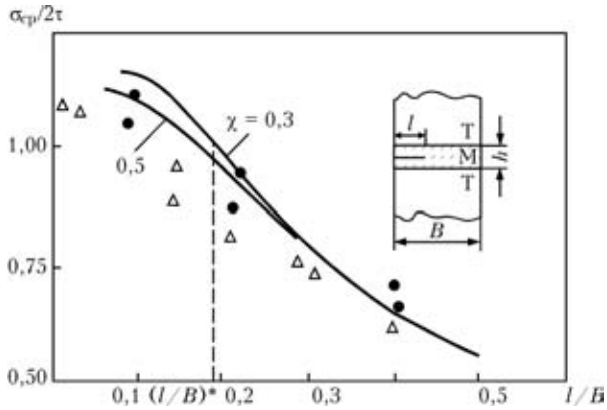


Рис. 2. Сравнение теоретических (сплошные кривые) по формуле (13) при $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$ и экспериментальных данных по прочности сварных соединений при χ = 0,3 (●) и 0,5 (Δ) [17] и $K_{\text{в}}$ = 1,33; $(l/B)^*$ = 0,19

неоднородности сварного соединения с поверхностным трещиноподобным дефектом длиной l, используя представления функций th и ln, ch в виде степенных рядов, игнорируя малые члены, с точностью 1...2 %:

$$\sigma_{y\,\text{ср}}^{K,\,i} = K_{\text{M}}\left(1-\frac{l}{B}\right)\left[-\frac{\alpha_i^2+0{,}2}{(\alpha_1+\alpha_2)}\chi^* + \frac{\alpha_1+\alpha_2}{4\chi^*} + 2 - \right.$$
$$\left. - \frac{1}{3}(\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2)\right]. \qquad (10)$$

Для трещин при $\Delta = 0$ получаем $\chi^* = \frac{\chi}{1 - l/B}$. С учетом замены K_{M} на $\sigma_{\text{в}}^{\text{M}}/\sqrt{3}$ формула (10) для поверхностных трещин принимает вид

$$\sigma_{y,\,\text{ср}}^{K,\,i} = \frac{\sigma_{\text{в}}^{\text{M}}}{\sqrt{3}}\left\{\left[\frac{\alpha_1+\alpha_2}{8\chi}(1-\frac{l}{B})^2 - \left[1 - \frac{\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2}{6}\right]\times\right.\right.$$
$$\left.\left.\times(1-\frac{l}{B}) - \frac{\alpha_i^2+0{,}2}{2(\alpha_2+\alpha_2)}\chi\right]\right\}, \qquad (11)$$

где $\chi^* = \frac{h+\Delta}{B-l}$; $\chi = \frac{h}{B}$.

Следует отметить, что при отсутствии дефекта в формуле (11) $l = \Delta = 0$, получим формулы, приведенные в работе [14]. Из формулы (11) определяем допустимый диапазон относительных критических размеров трещин, для которых сварное соединение равнопрочно основному металлу без дефекта при условии $\sigma_{y\,\text{ср}} = 2K_{\text{M}}$:

$$\left(\frac{l}{B}\right)^{\text{кр}} = 1 - \frac{2\chi}{\alpha_1+\alpha_2}\left[1 - \frac{\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2}{6} + \right.$$
$$\left. + \sqrt{(1-\frac{\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2}{6})^2 + \frac{\alpha_1+\alpha_2}{2\chi} + \frac{\alpha_i^2+0{,}2}{4}}\ \right\}. \qquad (12)$$

Для симметричной механической неоднородности при $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$ выражение (12) принимает вид формулы, полученной в работе [10]. С уменьшением коэффициентов механической неоднородности $K_{\text{в1}}$ и $K_{\text{в2}}$ критическое значение поверхностного дефекта в металле ЗТВ уменьшается.

При условии $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$ формула (11) превращается в зависимость для средних нормальных напряжений $\sigma_{y\,\text{ср}}^{K,\,i}/2K_{\text{M}}$ сварных соединений с симметричной механической неоднородностью с поверхностным дефектом в металле ЗТВ, полученную в работе [10]

$$\sigma_{y\,\text{ср}}^{K,\,M} = 2K_{\text{M}}\left[\frac{\alpha}{2\chi}(1-\frac{l}{B})^2 - (1-\frac{\alpha^2}{6})(1-\frac{l}{B}) - \frac{\alpha_i^2+0{,}2}{4\alpha}\chi\right]. \qquad (13)$$

На рис. 2 приведена теоретическая зависимость по формуле (13) и экспериментальные значения [17] для титановых сплавов (сварные соединения размером 100×95×25 мм, $\sigma_{\text{в}}^{\text{T}} = 875$ МПа, $\sigma_{\text{в}}^{\text{M}} = 600$ МПа, $K_{\text{в}} = 1{,}33$, $\alpha = 0{,}33$ при $\chi = 0{,}3$ и $\chi = 0{,}5$). Наружный односторонний поверхностный дефект имитировали острыми надрезами. С уменьшением относительной толщины мягкой прослойки χ от 0,5 до 0,3 средние нормальные напряжения $\sigma_{y\,\text{ср}}^{K,\,i}$ увеличиваются за счет контактного упрочнения мягкой прослойки. Получено хорошее соответствие новых теоретических результатов и экспериментальных исследований [17].

Новые теоретические формулы можно использовать для оценки прямошовных труб большого диаметра с поверхностным дефектом, расположенным в металле ЗТВ при коэффициенте механической неоднородности $K_{\text{в}} = 1{,}1 - 1{,}2$. Для этого в формулах [18] необходимо заменить временное сопротивление металла труб $\sigma_{\text{в}}$ на средние напряжения $\sigma_{y\,\text{ср}}$ по формуле (11).

Приравнивая $\sigma_{y\,\text{ср}}$ по формуле (11) значению $\sigma_{\text{ср}} = 2K_{\text{т}}(1 - l/B)$ прочности сварного шва с поверхностным дефектом l/B, определим χ_p с учетом контактного упрочнения сварного соединения, при которой прочность сварного соединения СТ–М–Т равна прочности основного металла:

$$\chi_{p,\,i} = \left\{-\left[\sqrt{3}K_{\text{в},i} + \left(1 - \frac{\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2}{6}\right)(1-\frac{l}{B})\right] + \right.$$
$$\left. + \sqrt{[\sqrt{3}\,K_{\text{в},\,i} + (1-\frac{\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2}{6})(1-\frac{l}{B}) + (\alpha_1^2+\alpha_2^2+0{,}2)(1-\frac{l}{B})^2]}\times\right.$$
$$\left.\times\frac{2(\alpha_1+\alpha_2)}{\alpha_1^2+\alpha_2^2+0{,}2}\right\}. \qquad (14)$$

По формуле (14) при $K_{\text{в}} = 1{,}33$ ($l/B = 0$) получаем $\chi_p = 0{,}18$, что хорошо соответствует теоретическим результатам ($\chi_p = 0{,}181$) [7] и экспериментальным данным [17].

Исходя из обеспечения несущей способности сварных соединений труб большого диаметра с несимметричной механической неоднородностью на уровне прочности основного металла установлены оптимальные диапазоны размеров ЗТВ. Диапазон относительных размеров мягких прослоек, при которых прочность сварного соединения СТ–М–Т равна прочности основного металла, довольно узок ($\chi_p = 0{,}15...0{,}17$), т. е. максимальный размер ЗТВ при толщине трубы 22 мм равен 3,74 мм, что не отвечает размерам разупрочненных участков труб большого диаметра ($\chi_p = 0{,}3...0{,}5$) [1] из-за широкого сварного шва, высокой погонной энергии сварки q/v и применяемого сварочного оборудования.

Если участки СТ, Т и М сварного соединения склонны к упрочнению, то для определения средних разрушающих напряжений $\sigma_{\text{ср}}$ в формулах

(10) и (11) необходимо заменить K_M на $(\beta\sigma_в^M)/2$, где β — параметр, характеризующий неустойчивость процесса пластического деформирования сварного соединения (для идеального упругопластического тела $\beta = 2/\sqrt{3}$). Проведенный теоретический анализ показывает, что с уменьшением погонной энергии сварки q/v снижается степень разупрочнения $K_в$ и ширина разупрочненного участка χ, поэтому прочность сварного соединения $\sigma_{y\,ср}$ повышается за счет контактного упрочнения и при некоторых режимах и технологиях сварки может быть достигнута равнопрочность сварного соединения с несимметричной механической неоднородностью при вязком разрушении основному металлу.

Данные результаты могут быть использованы при экспертизе аварий [18, 19], внутритрубной диагностике магистральных трубопроводов, экспертной оценке сварного шва для повышения эксплуатационной надежности магистральных газо-, нефтепроводов.

Выводы

1. Получены формулы для вычисления тензора напряжений, предельных растягивающих усилий и средних разрушающих напряжений с несимметричной механической неоднородностью сварных соединений с поверхностным трещиноподобным дефектом, которые являются обобщениями соответствующих формул для симметричных сварных соединений и хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

2. Предложенная методика оценки статической прочности сварных соединений с несимметричной механической неоднородностью позволит определить несущую способность путем введения в расчетные соотношения коэффициентов механической неоднородности $K_{в1}$ и $K_{в2}$.

3. Участком предполагаемого разрушения прямошовных труб большого диаметра при превышении предельного давления является линия, расположенная в ЗТВ рядом с линией сплавления сварного шва.

1. *Анучкин М. П., Горицкий В. Н., Мирошниченко Б. И.* Трубы для магистральных трубопроводов. — М.: Недра, 1986. — 231 с.
2. *Дуговая* сварка неповоротных стыков магистральных трубопроводов / И. К. Походня, М. З. Шейнкин, В. Н. Шлепаков и др. — М.: Недра, 1987. — 190 с.
3. *Астафьев А. С., Навоев В. С.* Сварка термически упрочненной низколегированной стали // Свароч. пр-во. — 1965. — № 3. — С. 1–4.
4. *Оценка* прочности сварных соединений из термоупрочненных сталей / О. А. Бакши, Б. П. Пиксаев, Т. В. Кульневич и др. // Вопр. свароч. пр-ва. — 1968. — № 63. — С. 84–93.
5. *Клыков Н. А., Решетов А. Л.* Прочность сварных соединений с несимметричной механической неоднородностью // Автомат. сварка. — 1979. — № 12. — С. 29–32.
6. *Остсемин А. А., Шахматов М. В., Ерофеев В. В.* Влияние дефектов сварки, расположенных на границе сплавления, на прочность сварного стыка труб большого диаметра // Пробл. прочности. — 1984. — № 8. — С. 111–116.
7. *Остсемин А. А., Дильман В. Л.* Оценка влияния механической неоднородности на прочность термоупрочненных труб большого диаметра и пластин с дефектами в сварных швах // Вест. машиностроения. — 2004. — № 9. — С. 23–28.
8. *Остсемин А. А.* Прочность и напряженное состояние мягкой прослойки в тонкостенном цилиндрическом сосуде при двухосном нагружении // Автомат. сварка. — 1994. — № 5/6. — С. 18–20.
9. *Бакши О. А.* Об учете фактора механической неоднородности сварных соединений при испытании на растяжение // Свароч. пр-во. — 1985. — № 7. — С. 32–34.
10. *Остсемин А. А., Дильман В. Л.* Статическая прочность механически неоднородных сварных соединений с односторонним поверхностным дефектом при вязком разрушения // Хим. и нефт. машиностроение. — 2005. — № 10. — С. 9–12.
11. *Дильман В. Л., Остсемин А. А.* Напряженное состояние и прочность сварных швов труб большого диаметра // Там же. — 1998. — № 4. — С. 16–20.
12. *Остсемин А. А., Дильман В. Л.* О сжатии пластического слоя двумя шероховатыми плитами // Пробл. прочности. — 1990. — № 7. — С. 107–112.
13. *Теория* ковки и штамповки / Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др. — М.: Машиностроение, 1992. — 720 с.
14. *Дильман В. Л., Остсемин А. А.* Напряженное состояние и прочность сварных соединений с механической неоднородностью // Свароч. пр-во. — 1998. — № 5. — С. 15–17.
15. *Дильман В. Л., Остсемин А. А.* Прочность механически неоднородных сварных соединений с щелевидным дефектом // Там же. — 1999. — № 2. — С. 12–15.
16. *Дильман В. Л., Остсемин А. А., Воронин А. А.* Несущая способность прямошовных труб большого диаметра с дефектами на границе сплавления сварного шва // Там же. — 2002. — № 3. — С. 3–7.
17. *Шахматов М. В.* Несущая способность сварных соединений с дефектом в твердых и мягких швах // Автомат. сварка. — 1988. — № 6. — С. 14–17.
18. *Остсемин А. А., Заварухин В. Ю.* Прочность нефтепровода с поверхностными дефектами // Пробл. прочности. — 1993. — № 12. — С. 51–59.
19. *Остсемин А. А.* Анализ несущей способности действующего магистрального нефтепровода при наличии дефектов в продольном шве // Свароч. пр-во. — 1998. — № 9. — С. 11–15.

A design evaluation of static strength with non-axisymmetric mechanical non-uniformity of welded joints with a surface cracklike defect is performed based on the method of solving a plane problem of the theory of plasticity. Stressed state of mechanically non-uniform butt joints with a surface defect was studied. The proposed procedure for evaluation of static strength of welded joints with non-symmetrical mechanical non-uniformity will allow determination of the load carrying capacity by introducing the mechanical non-uniformity coefficients into the calculation formulas.

Поступила в редакцию 13.04.2006

УДК 621.791.947.2.03:621.375.826

НОВОЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

Н. И. ГРЕЧАНЮК, д-р техн. наук, **П. П. КУЧЕРЕНКО**, **И. Н. ГРЕЧАНЮК**, инженеры
(НПП «Геконт», г. Винница)

Представлены современные направления деятельности НПП «Геконт» в области практического применения новых технологий плавки, испарения в вакууме материалов для осаждения теплозащитных покрытий системы MeCrAlY и других на лопатки газовых турбин, получения конденсированных композиционных материалов для разнообразных электрических контактов, переплава отходов металлов и сплавов для получения товарных слитков. Более подробно освещаются разработки и особенности применения специализированного оборудования.

Ключевые слова: электронно-лучевые технологии, плавка и испарение в вакууме, осаждение теплозащитных покрытий, конденсирование композиционных материалов, переплав металлов и сплавов, лопатки газовых турбин, электрические контакты, специализированное оборудование

Электронно-лучевое воздействие на металлы, приводящее к их нагреву, плавлению и испарению, как новое технологическое направление в области обработки материалов интенсивно развивается с середины XX в. [1, 2].

Развитие электронно-лучевой технологии идет в трех основных направлениях:

– плавка и испарение в вакууме для получения материалов пленок покрытий; используют мощные (до 1 МВт и более) электронно-лучевые установки при ускоряющем напряжении 20...30 кВ; концентрация мощности относительно невелика (не более 105 Вт/см^2);

– сварка металлов; создано оборудование трех классов: низко-, средне- и высоковольтное, охватывающее диапазон ускоряющих напряжений от 20 до 150 кВ; мощность установок составляет 1...120 кВт и более при максимальной концентрации мощности 105...106 Вт/см^2;

– прецезионная обработка материалов (сверление, фрезирование, резка); используют высоковольтные установки (80...150 кВ) небольшой мощности (до 1 кВт), обеспечивающие удельную мощность $5\cdot10^8$ Вт/см^2.

Одновременно ведется совершенствование оборудования [3, 4], источников нагрева [5], источников паров металлов [6] и разработка аппаратуры для наблюдения, контроля и регулирования процесса электронно-лучевого воздействия. Так, при разработке новых способов выращивания металлических (композиционных) пленок основное внимание уделяется управлению парометаллическими потоками: энергетическим состоянием конденсирующихся частиц, их молекулярным составом, интенсивностью, пространственным распределением потока и т. п. Известно, что широко распространенные испарители открытого типа, включая квазизамкнутые, даже при постоянной температуре характеризуются нестабильностью диаграммы направленности паровой струи во времени. Радиационная нагрузка на поверхность роста пленок от этих источников иногда сравнима с энергией конденсации парового потока. Поэтому при их использовании достаточно сложно получить воспроизводимые пленочные структуры с контролируемыми параметрами. Особые трудности возникают при больших скоростях испарения, когда в паровом потоке обычно присутствуют микрокапли.

В НПП «Геконт» интенсивно развивается первое из перечисленных выше направлений. При этом особое внимание уделяется разработке и изготовлению лабораторного и промышленного электронно-лучевого оборудования для реализации ряда новых технологических процессов:

— осаждения теплозащитных покрытий на лопатки газовых турбин;

— получения конденсированных из паровой фазы композиционных материалов дисперсно-упрочненного, микрослойного и микропористого типов;

— получения чистых тугоплавких металлов, специальных сплавов, ферросплавов, поликристаллического кремния для нужд космической техники, энергетики, авиастроения;

— получения сложнолегированных порошков металлического и керамического типов для плазменного нанесения покрытий.

Защитные покрытия на лопатках газовых турбин и оборудование для их осаждения. В НПП «Геконт» защитные покрытия на газовых

© Н. И. Гречанюк, П. П. Кучеренко, И. Н. Гречанюк, 2007

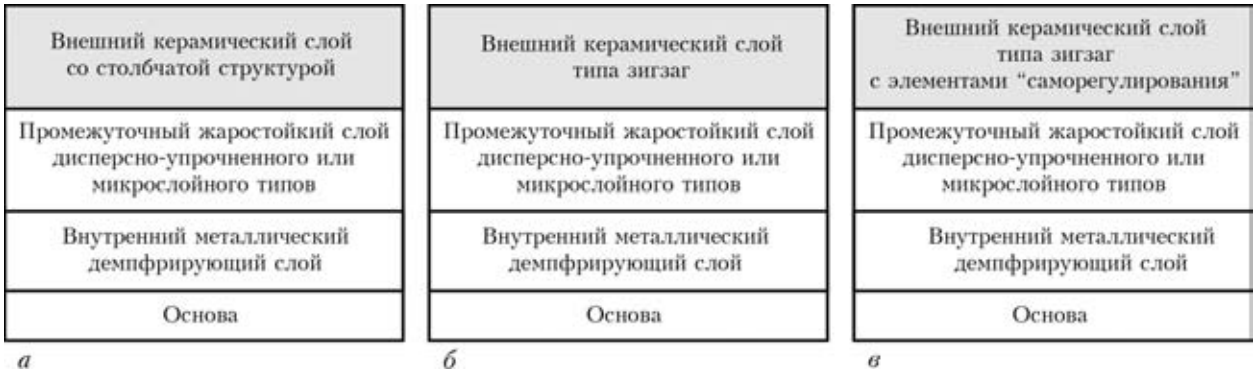


Рис. 1. Схемы теплозащитных покрытий (см. обозначения в тексте)

лопатках получают путем электронно-лучевого испарения сплавов MeCrAlY (где Me–Ni, Co, Fe) MeCrAlYHfSiZr и керамики на основе ZrO_2, стабилизированного Y_2O_3. Наряду с традиционными однослойными металлическими типа MeCrAlY, MeCrAlYHfSiZr, двухслойными металл/керамика разработаны три варианта трехслойных теплозащитных покрытий, схемы которых приведены на рис. 1.

Наиболее простым покрытием является трехслойное покрытие с внутренним металлическим (демпфирующим) MeCrAlY, MeCrAlYHfSiZr (где Me–Ni, Co, Fe или сплавы на их основе), промежуточным композиционным MeCrAlY, MeCrAlYHfSiZr–MeO (где MeO–Al_2O, ZrO_2–Y_2O_3), дисперсно-упрочненным или микрослойным типом и внешним керамическим ZrO_2–Y_2O_3 слоями (рис. 1, *а*) [7]. Второй вариант является аналогичным первому с тем лишь отличием, что внешний керамический слой выполнен в виде зигзага (рис. 1, *в*). Наиболее интересным является третий вариант покрытия, где во внешний керамический слой (ZrO_2–Y_2O_3), который также выполнен в виде зигзага, введены дисперсные частицы тугоплавких боридов. В процессе эксплуатации изделий с таким покрытием при возникновении микротрещин во внешнем керамическом слое частицы боридов, окисляясь, образуют соответствующие оксиды, которые залечивают возникшие микротрещины. Таким образом, подобное покрытие обладает эффектом «самозалечивания», или «самовосстановления».

Для реализации технологических процессов осаждения теплозащитных покрытий на лопатки турбин были созданы два типа промышленного электронно-лучевого оборудования [3, 4, 7–10]. На рис. 2 представлен общий вид промышленной электронно-лучевой установки L-1, которая успешно эксплуатируется в научно-техническом комплексе «Зоря-Машпроект» г. Николаев (Украина). При разработке конструкции установки была использована традиционная трехкамерная схема компоновки оборудования [7, 9]. Рабочая камера установки используется собственно для нанесения покрытия, а две вспомогательные — для загрузки–выгрузки кассет с лопатками. Установка снабжена восьмью электронными пушками мощностью 60 кВт каждая конструкции НПП «Геконт» [7]. Четыре пушки предназначены для испарения исходных материалов диаметром 70 мм, расположенных в один ряд, остальные четыре пушки для нагрева покрываемых изделий снизу или сверху. Максимальные габариты покрываемых изделий: длина до 700 мм, диаметр до 350 мм.

Отличительной особенностью конструкции установки от разработанных ранее [1] является возможность проведения не только технологического процесса осаждения всех типов теплозащитных покрытий, но и получение композиционных материалов дисперсно-упрочненного, микрослойного и микропористого типов в виде листовых заготовок диаметром до 800 мм и толщиной до 5 мм. Указанное оборудование может быть также использовано для осаждения особотвердых износостойких покрытий на штампы, пресс-формы, специальных оптических покрытий (например на зеркала из карбида кремния) и т. д.

В настоящее время в НПП «Геконт» разработана конструкторская документация на принципиально новое промышленное электронно-лучевое оборудование для осаждения защитных покрытий [3, 4]. Установка (рис. 3) представляет собой вакуумный агрегат, состоящий из четырех вакуумных камер (рис. 3, *а*), связанных между собой: собственно главной технологической камеры *1*, переходной камеры *2* и двух шлюзовых

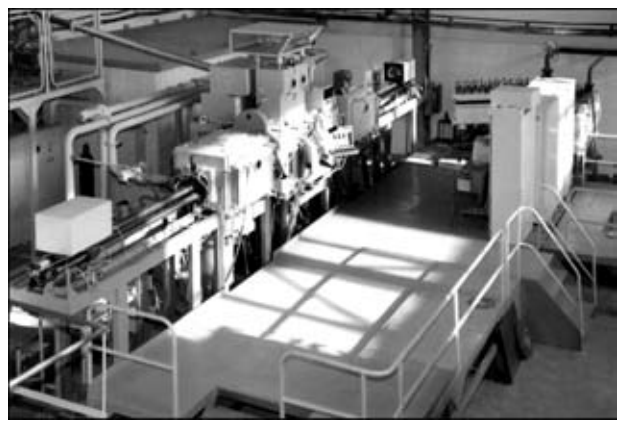


Рис. 2. Электронно-лучевая установка L-1

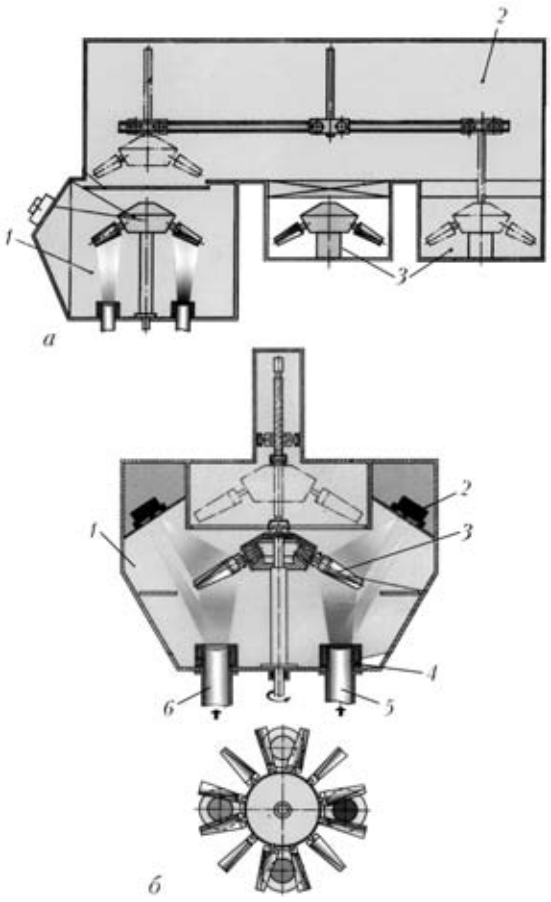


Рис. 3. Установка для осаждения защитных покрытий (см.

камер (форкамер) *3*. Внутри технологической камеры *1* (рис. 3, *б*) установлены водоохлаждающие тигли *4*, в которых размещают слитки *5*, *6* испаряемых материалов. Лучи электронных пушек *2* испаряют материал слитков, который в виде пара конденсируется на изделиях *3*. Количество используемых тиглей может изменяться в зависимости от необходимого химического состава и конструкции (двух-, трехслойное, микрослойное) покрытие. Конструкция установки является принципиально новой [3, 4]. На данной установке возможно осаждение всех типов защитных покрытий, в том числе и новых типов силицидных покрытий микрослойного типа.

Необходимо отметить, что на предприятии реализован замкнутый цикл осаждения покрытий на лопатке турбин, включающий выплавку всех типов слитков на никелевой, кобальтовой и железной основах в соответствии с ТУ У 27.4-20113410-002-2001, использование слитков керамики ТУ У 13.2-20113410-004-2003. Освоено также производство порошков Ni(Co)CrAlYSi фракцией 40…100 мкм для плазменного нанесения покрытий.

Композиционные материалы для электрических контактов и оборудование для их получения. Несмотря на широкое применение процессов испарения и конденсации для осаждения защитных покрытий оказались невостребован-

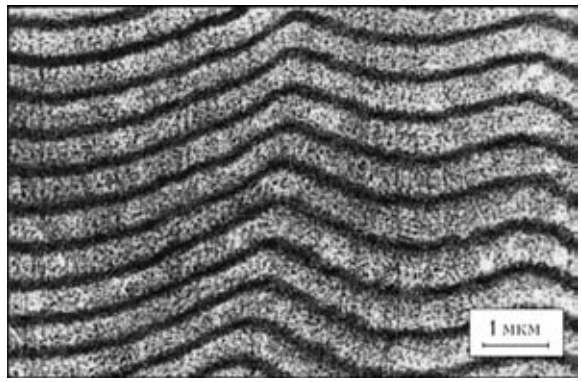


Рис. 4. Тонкая структура микрослойных материалов Cu–Zr–Y/Mo

ными уникальные возможности зонного метода для получения принципиально новых материалов дисперсно-упрочненного, микрослойного и микропористого типов, градиентных функциональных материалов и т. д. Серьезным научным достижением является разработка научных принципов формирования микрослойных материалов с толщиной чередующихся слоев меньше 0,5 мкм при температурах осаждения более 0,3 температуры плавления наиболее легкоплавкого из испаряемых материалов [11]. Как известно, до последнего времени подобные материалы получали методом электронно-лучевого испарения и последующей конденсации металлов и неметаллов в вакууме при температуре подложки не выше 300 °С [12]. На базе данных исследований впервые в мировой практике была разработана промышленная электронно-лучевая технология получения толстых (до 5 мм) микрослойных материалов (Cu–Zr–Y)/Mo (рис. 4) для электрических контактов [13]. Конденсированные материалы Cu — (0,08...0,2) % Zr — (0,08...0,2) % Y — (8...12) % Mo получают на промышленной электронно-лучевой установке L-5 (рис. 5). Технологическая схема получения данного материала представлена на рис. 6. Конденсированные материалы (Cu–Zr–Y)/Mo представляют собой листы диаметром 1000 мм и толщиной до 5 мм, которые рубятся на заготовки и

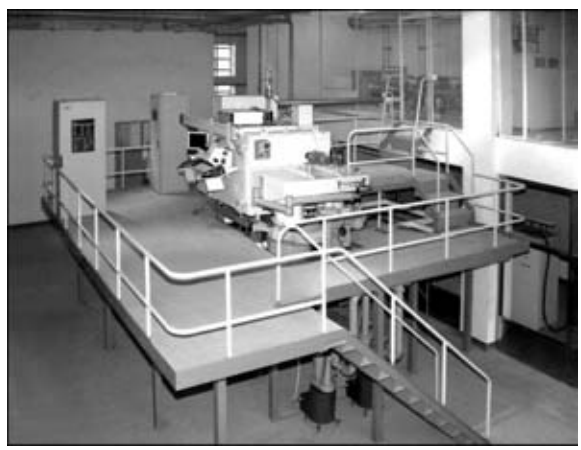


Рис. 5. Электронно-лучевая установка L-5

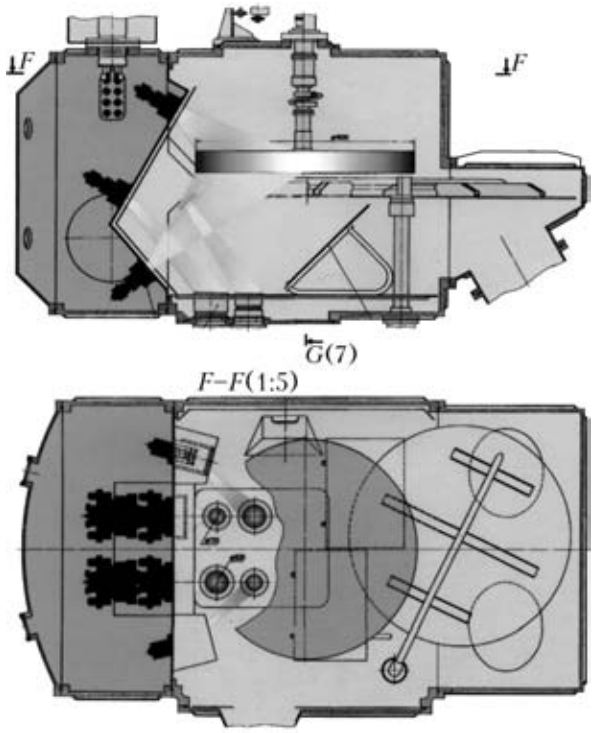


Рис. 6. Технологическая схема получения микрослойных материалов (Cu–Zr–Y)/Mo

напаиваются на контакте-держателе. Предел прочности и условный предел текучести в зависимости от технологических условий получения могут изменяться от 645 до 1200 МПа и от 596 до 1000 МПа соответственно, относительное удлинение от 2 до 8,7 % [14]. Новые композиты, получившие название «Материалы дисперсно-упрочненные для электрических контактов» (МДК), сертифицированы и выпускаются согласно техническим условиям [15].

Основные достоинства материалов МДК:

– отсутствие в составе серебра, поэтому они в 1,8–3 раза дешевле по сравнению с порошковыми электроконтактными и по эксплуатационной надежности превосходят существующие электротехнические материалы в 1,5–3 раза;

– не поддерживают горения дуги;

– полностью заменяют бериллиевую бронзу;

– выдерживают коммутационный ток до 1000 А.

Рис. 7. Внешний вид гаммы электрических контактов

Рис. 8. Внешний вид контактов для вакуумных дугогасительных камер

Наиболее эффективные области применения МДК:

– городской и междугородний электротранспорт (контакты, используемые в трамваях, троллейбусах, поездах, метро);

– лифтовое хозяйство (пассажирские и грузовые лифты);

– портовые, корабельные краны и другие подъемно-транспортные механизмы;

– электрокары всех типов;

– горно-шахтное оборудование;

– промышленные и бытовые электротехнические устройства, содержащие реле, пускатели, контакторы, рубильники и т. п.

– наконечники для плазменной резки металлов и сплавов;

– электроды контактных сварочных машин.

На сегодня согласно [16] произведено более 1,5 млн электрических контактов 370 наименований (рис. 7), которые успешно эксплуатируются в странах СНГ, Чехии, Румынии.

Одновременно с промышленным внедрением материалов для разрывных электрических контактов на предприятии совместно с ИПМ НАНУ, заводом «Генератор» (г. Киев), «Вроцлавским политехническим институтом» (Республика Польша) ведутся работы по созданию композиционных материалов на основе меди, хрома, вольфрама, углерода, применяемых в производстве скользящих контактов, контактов для вакуумных дугогасительных камер (рис. 8).

Промышленные технологии электронно-лучевого переплава металлов и сплавов и оборудование для их осуществления. На предприятии освоена промышленная технология электронно-лучевого переплава отходов быстрорежущих сталей и получение товарных слитков для последующего изготовления из них инструмента [17, 18]. Используемое оборудование позволяет переплавлять в вакууме отходы быстрорежущей

Рис. 9. Специализированная электронно-лучевая установка для плавки металлов и сплавов

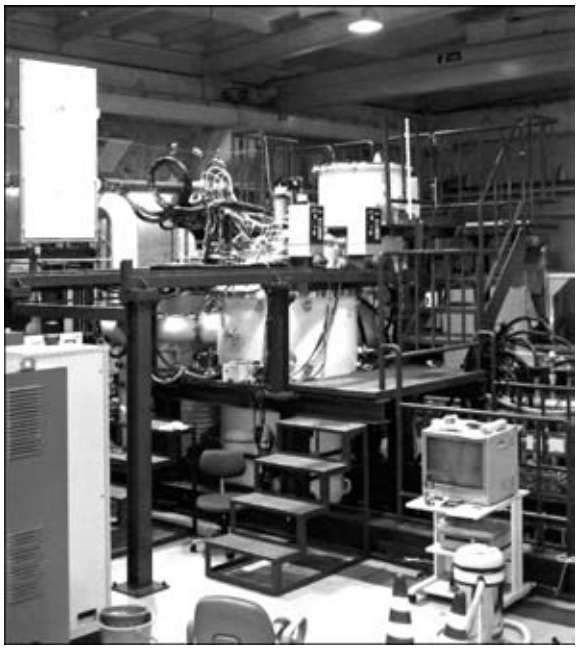


Рис. 10. Электронно-лучевая установка для переплава кремния мощностью 500 кВт

стали (отработанный инструмент, отходы инструментального производства) и получать цилиндрические слитки диаметром от 60 до 130 мм и слитки сечением до 140...160 мм длиной до 2000 мм.

Технологические и экономические преимущества:

– процесс переплава и формирования слитка происходит за один технологический цикл без последующей термомеханической обработки (ковки, отжима);

– возможность переплава кусковой шихты;

– быстрая смена оснастки для изготовления слитков необходимых размеров;

– высокое качество получаемых слитков после вакуумного переплава;

– получение небольших партий товарных слитков;

– стоимость товарных слитков примерно в 2-3 раза ниже стоимости слитков, полученных по традиционной технологии.

В последнее время создан ряд специализированных промышленных электронно-лучевых установок для плавки жаропрочных сплавов, тугоплавких металлов, титана и получения товарных слитков диаметром от 60 до 300 мм и длиной до 2500 мм. Внешний вид установки такого типа приведен на рис. 9. В данных установках впервые использованы новые высоковольтные источники питания конструкции НПП «Геконт» и электронно-лучевые газоразрядные пушки с холодным катодом, разработанные под руководством В. И. Мельника [19].

Особое внимание сегодня уделяется созданию новых технологий и оборудования для плавки кремния и ферросплавов. Предприятием поставлены в Японию три электронно-лучевые установки мощностью 10, 20, 500 кВт для электронно-лучевого переплава кремния (рис. 10).

Приведенные выше примеры практического применения процессов плавки и испарения металлов и неметаллов в вакууме убедительно свидетельствуют о все более широком применении специальной электрометаллургии для создания новых материалов и покрытий.

1. *Мовчан Б. А., Малашенко И. С.* Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. — Киев: Наук. думка, 1983. — 230 с.
2. *Зуев И. В.* Обработка материалов концентрированными потоками энергии. — М.: МЭИ, 1998. — 162 с.
3. Pat. US 6, 923, 868 BZ. Installation for electron-ray coatication of coatings / M. Grechanyuk, P. Kucherenko. — Publ. 02.08.2005.
4. *Пат. 2265078 РФ.* Установка для электронно-лучевого нанесения покрытий / Н. И. Гречанюк, П. П. Кучеренко. — Опубл. 12.27.2005.
5. Пат. Украины 60377. Газоразрядная электронная пушка и способ управления ею / А. А. Новиков. — БИ. — 2003. — № 10.
6. *Золкин А. С.* Источники паров металлов для научных исследований и технологий. — Новосибирск: Институт теплофизики РАН, 1992. — 75 с.
7. *Гречанюк Н. И., Кучеренко П. П., Осокин В. А., Шпак П. А.* Современное состояние и перспективы создания теплозащитных покрытий (ТЗП) для лопаток газотурбинных установок (ГТУ) и оборудования для их нанесения // Новини енергетики. — 2000. — № 9. — С. 32–37.
8. *Пат. 40664* Украина. Электронная пушка с линейным термокатодом для электронно-лучевого нагрева / Н. И. Гречанюк, Е. К. Дятлова, П. П. Кучеренко, Е. Л. Пиюл. — БИ. — 2001. — № 7.
9. *Пат. 42052* Украина. Защитное покрытие для лопаток газовых турбин / Н. И. Гречанюк, П. П. Кучеренко, В. А. Осокин, И. Б. Афанасьев, С. С. Белик, В. А. Акримов, И. Н. Гречанюк // БИ. — 2001. — № 9.
10. *Влияние* технологических параметров на структуру внешнего керамического слоя в двухслойных покрытиях металл–керамика, полученных электронно-лучевым осаждением за один технологический цикл / Н. И. Гречанюк, В. А. Осокин, П. А. Шпак, Е. Л. Пиюл // Порошк. металлургия. — 2005. — № 3/4. — С. 41–48.
11. *Пат. 2271404* РФ. Способ получения микрослойных термостабильных материалов / Н. И. Гречанюк. — Опубл. 03.10.2006.
12. *Ильинский А. И.* Структура и прочность слоистых и дисперсно-упрочненных пленок. — М.: Металлургия, 1986. — 140 с.

13. *Пат. 34875* Украина. Композиционный материал для электрических контактов / Н. И. Гречанюк, В. А. Осокин, И. Б. Афанасьев, И. Н. Гречанюк // БИ. — 2001. — № 2.
14. *Температурные* зависимости статистических механических свойств микрослойного композиционного материала МДК-3 / В. А. Борисенко, В. В. Бухановский, Н. И. Гречанюк и др. // Пробл. прочности. — 2005. — № 4. — С. 113–120.
15. ТУ У 20113410.001-98. Материалы дисперсно-упрочненные для электрических контактов.
16. ТУ У 31.2-20113410-003-2002. Контакты электрические на основе дисперсно-упрочненных материалов (МДК).
17. *Шпак П. А., Гречанюк В. Г., Осокин В. А.* Влияние электронно-лучевого переплава на структуру и свойства быстрорежущей стали Р6М5 // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — № 3. — С. 14–17.
18. Пат. 37658 Украина. Способ изготовления заготовок для инструмента из быстрорежущей стали / Н. И. Гречанюк, И. Ю. Афанасьев, П. А. Шпак и др. // БИ. — 2003. — № 7.
19. *Technological* equipment for electron beam refusing on the base of glow discharge electron guns / V. I. Melnik, I. V. Melnik, B. A. Tugay et al. // Electrotechnica and Electronica. — 2006. — № 5/6. — P. 119–121.

The paper describes the current achievements of SPC «Gekont» (Vinnitsa) in the field of practical application of the technologies of vacuum melting and evaporation of materials for deposition of thermal barrier coatings of MeCrAlY and other systems on gas turbine blades, producing condensed composite materials for diverse electrical contacts, remelting the wastes of metals and alloys to produce sound ingots. Information on development and application of specialized equipment is given.

Поступила в редакцию 27.03.2007

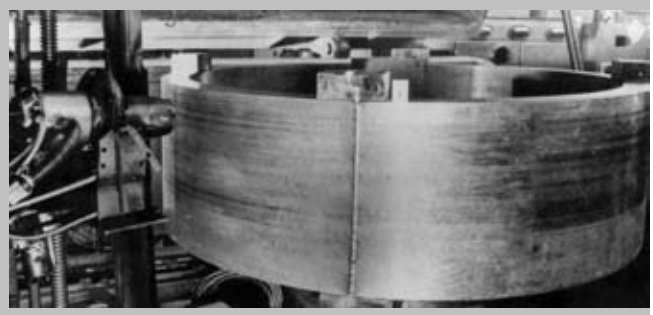
ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛС ЕМКОСТЕЙ И ДРУГИХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ ДО 150 мм ИЗ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ

Разработана комплексная технология изготовления с применением электронно-лучевой сварки цилиндрических или конических оболочек и емкостей диаметром от 300 до 8000 мм, используемых в качестве корпусов ракетно-космических аппаратов, топливных систем, сосудов давления или криогенных емкостей, из алюминиевых и магниевых сплавов.

Кроме операций сварки, технология решает проблемы конструктивного исполнения свариваемых кромок различных типов соединений, подготовки поверхности изделий и кромок перед сваркой, выполнения требований к точности сборки и выбору пространственного положения соединений, а также выбора рациональных способов контроля качества и прочностных испытаний сварных соединений при криогенных температурах включительно.

Технология обеспечивает повышение на 15...25 % временного сопротивления соединений термически упрочняемых и усиленно нагартованных алюминиевых сплавов, уменьшение в 4...5 раз остаточных сварочных деформаций и в 5...7 раз ширины зоны термического влияния по сравнению с дуговыми способами сварки.

Предлагается разработка технической документации, передача «ноу-хау» по технологии, технические консультации и инженерные услуги при освоении технологии в производстве.



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

УДК 621.791:621.643.42:623:153.004

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

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

Предложен структурный подход к разработке технологий ремонта магистральных трубопроводов под давлением для разных видов дефектов линейной части с применением дуговой сварки. Представлены конструктивно-технологические схемы ремонта трубопроводов и критерии выбора способов ремонта в зависимости от характера и параметров дефекта.

Ключевые слова: дуговая сварка, магистральные трубопроводы, конструктивно-технологические схемы ремонта, геометрические параметры дефектов

Украина имеет разветвленную сеть трубопроводов для транспортировки природного газа, нефти и нефтепродуктов. Протяженность магистральных трубопроводов, которые находятся под управлением НАК «Нафтогаз Украины», превышает 45 тыс. км. Основой их являются магистральные газопроводы (около 38 тыс. км) и (в меньшем объеме) магистральные нефте- и продуктопроводы, длина которых составляет соответственно 4,7 и 3,4 тыс. км.

Трубопроводный транспорт — одна из немногих областей народного хозяйства, которая продолжает стабильно работать несмотря на кризисные явления в экономике страны. Стабильность работы трубопроводного транспорта в значительной мере обусловлена тем, что его мощность направлена преимущественно на обеспечение экспорта российских энергоресурсов через территорию Украины в третьи страны: 90 % экспорта российс-

Структурная схема разработки технологий ремонта магистральных трубопроводов под давлением

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

© В. С. Бут, О. И. Олейник, 2007

Таблица 1. Выбор способа ремонта в зависимости от характера и параметров дефекта

№ п/п	Характер дефектов и их геометрические параметры	Способ ремонта (условное обозначение)
	Коррозионно-механические повреждения	
1	$h_д \le 20\ \%\ t_н$; $L_{д.п} \le L_{кр}$	Шлифовка (П13)
2	Внешние ($20\ \%\ t_н < h_д \le 50\ \%\ t_н$; $L_{д.п} \le L_{кр}$)	Бандаж (П1) Композитный бандаж (П14) Компаундная муфта (П4)
3	Внутренние	Герметичная муфта (П2)
4	$50\ \%\ t_н < h_д \le 80\ \%\ t_н$; $L_{д.п} \le L_{кр}$	Герметичная муфта (П2) Композитный бандаж (П14) Компаундная муфта (П4)
5	$h_д > 20\ \%\ t_н$; $t_{ост} \ge 5$ мм, одиночные дефекты ($S \le 80 \times 80$ мм^2 на расстоянии $4t_н$)	Заварка (П12) Заплата-муфта (П6) Композитный бандаж (П14) Компаундная муфта (П4)
6	$L \le 100$ мм или группа расположенных рядом язв $h_д > 40\ \%\ t_н$	Заплата-муфта (П6) Композитный бандаж (П14) Компаундная муфта (П4)
7	Протяженные дефекты в окружном направлении $h_д > 20\ \%\ t_н$; $L_{д.о} \ge 1/6\pi D_н$	Герметичная муфта (П2) Двухслойная муфта (П3)
8	Коррозионно-механические повреждения в околошовной зоне кольцевого стыка ($h_д > 40\ \%\ t_н$)	Двухслойная муфта (П3)
	Расслоения	
9	Без выхода на поверхность	Бандаж (П1) Композитный бандаж (П14) Компаундная муфта (П4)
10	С выходом на поверхность	Герметичная муфта (П2)
11	В околошовной зоне кольцевого шва	Двухслойная муфта (П3) Композитный бандаж (П14)
12	В околошовной зоне продольного (спирального) шва	Композитный бандаж (П14) Герметичная муфта (П2) Компаундная муфта (П4)
13	Выпячивание	Двухслойная муфта (П3) Объемная муфта с наполнителем (П5)
	Трещины	
14	$h_д < 20\ \%\ t_н$; $L_{д.п} \le 2\sqrt{D_н t_н}$; $h_д < 20\ \%\ t_н$; $L_{д.о} < 1/6\pi D_н$	Шлифовка (П13)
15	$L \le 150$ мм; $h_д > 20\ \%\ t_н$	Патрубок-муфта с вырезкой дефектного участка через задвижку, кран (П9)
16	$L > 150$ мм; $h_д > 20\ \%\ t_н$	Вырезка катушки
	Дефекты геометрии трубы	
17	Гофры высотой до $5\ \%\ D_н$	Объемная муфта с наполнителем (П5)
18	Горфы высотой до 20 мм	Двухслойная муфта (П3)
19	Вмятины глубиной до $3{,}5\ \%\ D_н$	Композитный бандаж (П14) Бандаж с заполнением вмятины (П1) Компаундная муфта (П4)
20	Вмятины глубиной более $3{,}5\ \%\ D_н$ и недопустимые по расчетам на прочность	Патрубок-муфта с вырезкой дефектного участка через задвижку (П9) Вырезка катушки
21	Вмятины любой глубины в сочетании с царапиной, трещиной, потерей металла	Патрубок-муфта с вырезкой дефектного участка через задвижку (П9) Вырезка катушки
22	Недопустимые по нормативной технической документации дефекты в кольцевых сварных стыках	Двухслойная муфта (П3)

Окончание табл. 1

№ п/п	Геометрические параметры и характер дефекта	Способ ремонта (условное обозначение)
23	Смещение кромок в кольцевом стыке трубопровода. Косой стык	Двухслойная муфта (П3)
24	Аномалия продольного шва трубопровода	Композитный бандаж (П14) Компаундная муфта (П4) Бандаж (П1)
Сквозные дефекты		
25	Технологические отверстия диаметром более 100 мм	Заплата, усиленная бандажом (П7) Патрубок-муфта (П9) Патрубок с воротником (П8)
26	Сквозные дефекты диаметром менее 50 мм (без давления в трубопроводе)	Чоп–трудопровод–бандаж (П10)
27	Сквозные дефекты диаметром менее 20 мм (под давлением в условиях эксплуатации трубопровода)	Заплата-муфта с герметиком (П11)
28	Дефекты, не подлежащие ремонту, и недопустимые конструктивные элементы или ремонтные конструкции	Вырезка катушки

Примечание. $h_д$ — глубина дефекта; $d_д$ — диаметр дефекта; S — площадь поверхности дефекта; $L_{д.п}$ — длина дефекта в продольном направлении; $L_{д.о}$ — то же в окружном направлении; $D_н$ — наружный диаметр трубы; $t_н$ — номинальная толщина стенки трубы; $t_{ост}$ — остаточная толщина стенки трубы. $L_{кр}$ — критическая длина дефекта (по ANSI/ASME B.31G)

кого газа (до 120 млрд $м^3$ в год) и ежегодный транзит нефти (свыше 30 млн т) в страны Центральной и Западной Европы и Турцию.

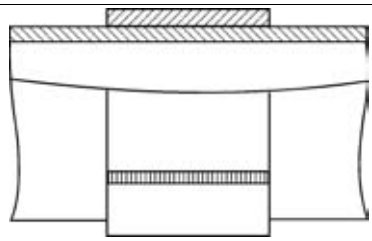
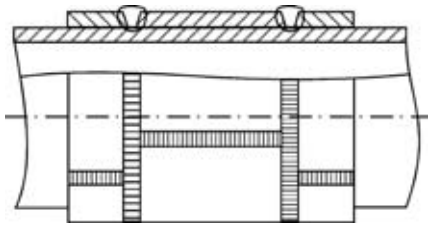
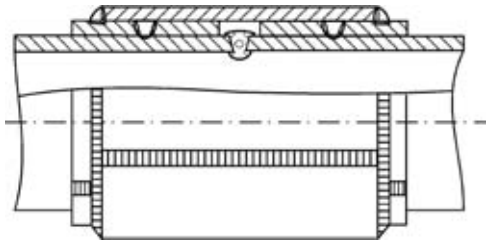
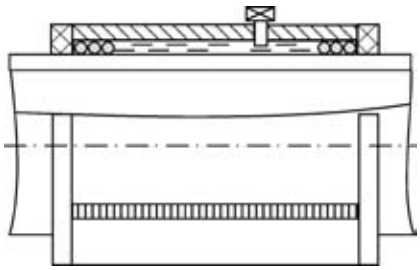
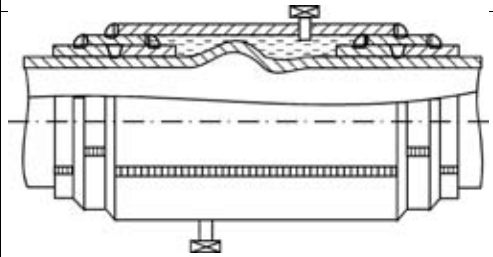
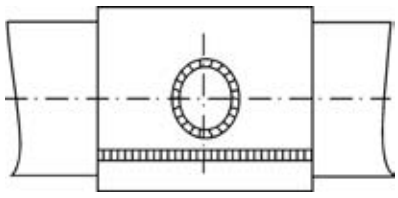
Благодаря постоянной работе газотранспортной и нефтепроводной систем удовлетворяются нужды Украины в энергоносителях и обеспечивается поступление валютных средств. Несмотря на то, что Россия разрабатывает новые маршруты экспорта газа, Украина с ее мощной системой магистральных газопроводов, развитой инфраструктурой и высококвалифицированными кадрами и в дальнейшем будет оставаться основной страной для транзита российского газа.

Структура газопроводов ГК «Укртрансгаз» [1] по сроку эксплуатации распределяется следующим образом: до 20 лет — 45, от 20 до 33 — 32, более 33 лет — 23 %. Больше половины всех газопроводов составляют трубопроводы диаметром не менее 720 мм, значительная часть которых относится к транзитным и магистральным газопроводам диаметром 1020...1420 мм (37 % общей протяженности трубопроводов). Что касается магистральных нефтепроводов, находящихся в подчинении АО «Укртранснафта», то характер распределения трубопроводов по срокам эксплуатации следующий: до 10 лет — 16,7 % (795,7 км), от 10 до 20 — 4,9 % (235,4 км), от 20 до 30 — 18,6 % (885,1 км), от 30 до 40 — 42,9 % (2044 км), более 40 лет — 16,9 % (805,9 км). По диаметрам нефтепроводы распределяются следующим образом: 530, 720, 1020 мм (соответственно 13,7, 52,9 и 19,5 %).

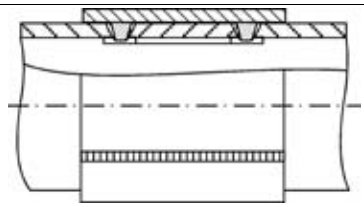
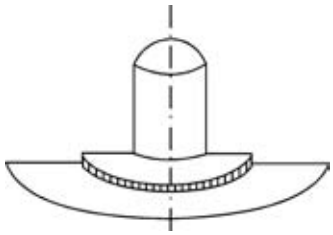
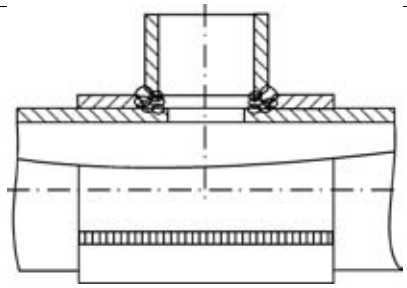
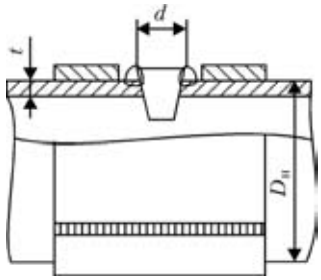
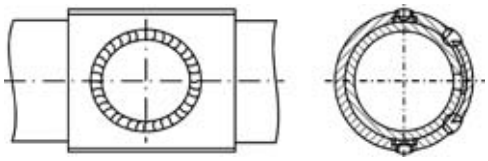
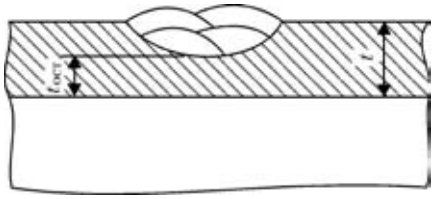
На основе анализа распределения трубопроводов газотранспортной системы, а также магистральных нефтепроводов по срокам эксплуатации и диаметрам можно сделать вывод, что для обеспечения непрерывной работы и рабочего состояния трубопроводов в ближайшее время понадобится выполнить большой объем восстановительно-ремонтных мероприятий.

Магистральные трубопроводы зарекомендовали себя как самый безопасный, надежный и экономичный способ транспортировки газа и нефти на большие расстояния. Однако необходимость поддерживать высокий уровень готовности к аварийным ситуациям по-прежнему остается приоритетной задачей, особенно исходя из социальных, экологических и экономических последствий, которые могут возникнуть в результате потери герметичности трубопровода высокого давления. Поскольку риск таких последствий потенциально появляется с момента создания давления в трубопроводе, готовность к аварийным ситуациям актуальна на протяжении всего срока эксплуатации трубопровода. В связи с этим при каждой конкретной аварийной ситуации или выявлении недопустимых дефектов на линейной части трубопроводов необходима разработка стратегии ремонта, которая бы базировалась на ряде критериев: выборе способа ремонта, безопасности и надежности ремонтных конструкций, влиянии на окружающую среду, обеспечении непрерывности транспортировки продукта, продолжительности ремонта и его экономической целесообразности. При этом предпочтение нужно отдавать способам ремонта, осуществляемым без остановки эксплуатации трубопровода, поскольку в таком случае объем транспортировки продукта не уменьшается или уменьшается незначительно на протяжении короткого промежутка времени и не приводит к значительному материальному и экологическому ущербу.

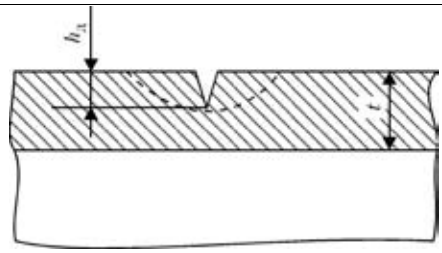
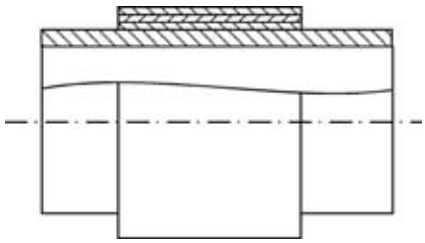
Таблица 2. Конструктивно-технологические схемы ремонта трубопроводов

Условное обозначение	Схема ремонтной конструкции	Метод ремонта с характеристикой дефектов согласно табл. 1
П1		**Бандаж**: • коррозионно-механические повреждения стенки трубы глубиной до 50 % ее толщины (п. 2); • расслоения без выхода на поверхность (п. 9); • вмятины глубиной до 3,5 % $D_н$ (п. 19)
П2		**Герметичная муфта с технологическими кольцами**: • коррозионно-механические повреждения стенки трубы глубиной более 50 % ее толщины (п. 3, 4, 7); • расслоения с выходом на поверхность (п. 10); • расслоения в околошовной зоне (продольные и спиральные швы) (п. 12)
П3		**Двухслойная муфта**: • дефектные кольцевые стыки и прилегающие к ним зоны (п.7, 8, 11, 22, 23); • расслоения в околошовной зоне кольцевого шва (п. 11); • расслоения с выпячиванием (п. 13); • гофры высотой до 20 мм (п. 18)
П4		**Компаундная муфта**: • большие коррозионные повреждения и комбинированные дефекты трубопровода (п. 2, 4–6); • расслоения (п. 9, 12); • вмятины глубиной до 3,5 % $D_н$ (п. 19); • аномалия продольного шва (п. 24)
П5		**Объемная муфта с наполнителем**: • гофры высотой до 5 % $D_н$ (п. 17) • расслоения с выпячиванием (п. 13)
П6		**Заплата-муфта:** • группы локальных коррозионных повреждений (п. 5, 6); • муфта на имеющейся заплате

Продолжение табл. 2

Условное обозначение	Схема ремонтной конструкции	Название ремонтной конструкции для видов дефектов согласно табл. 1
П7		**Заплата, усиленная бандажом:** • технологические отверстия (п. 25)
П8		**Патрубок с воротником**: • технологические отверстия и врезки (п. 25)
П9		**Патрубок-муфта**: • ликвидация трещины (п. 15); • ликвидация вмятины (п. 20, 21); • ликвидация технологических отверстий (п. 25); • присоединение отводов; • вырезка участков с трещинами (п. 15)
П10		**Чоп–трубопровод–бандаж**: • ликвидация отверстий (п. 26)
П11		**Заплата-муфта с герметиком**: • сквозные дефекты под давлением (п. 27)
П12		**Заварка**: • коррозионные язвы и механические повреждения (п. 5)

Окончание табл. 2

Условное обозначение	Схема ремонтной конструкции	Описание ремонтной конструкции для видов дефектов согласно табл. 1
П13		**Шлифовка**: • коррозионно-механические повреждения (п. 1); • поверхностные трещины глубиной до 20 % толщины стенки (п. 14)
П14		**Композитный бандаж**: • продольно-ориентированные механические и коррозионные повреждения труб (п. 2, 4–6); • расслоения (п. 9, 11, 12); • вмятины глубиной до 3,5 % $D_н$ (п.19); • криволинейные поверхности трубопровода (п. 24); • аномалия продольного шва (п. 24)

Большие резервы для повышения эффективности ремонтных работ скрыты в разработке прогрессивных способов ремонта и средств, с помощью которых можно восстанавливать несущую способность труб с разными дефектами, в том числе ликвидировать сквозные дефекты на действующих трубопроводах. К таким работам можно отнести заварку коррозионных язв и раковин; усиление бандажами или герметичными муфтами линейной части трубопровода с коррозионными повреждениями; приварку катодных отводов; локальный ремонт с применением заплат-муфт; присоединение ответвлений с целью подключения новых пользователей или месторождений к основной магистрали, установки перемычек, подключения лупингов или замены протяженных дефектных участков трубопровода в условиях эксплуатации; ликвидацию дефектов в сварных кольцевых стыках трубопровода дуговой сваркой; усиление дефектных кольцевых стыков двухслойными муфтами; установку на участки с коррозионно-механическими повреждениями композитных бандажей и компаундных муфт; ремонт вмятин и гофров герметичными муфтами с заполнением самозатвердевающим раствором межтрубной пустоты; вырезку участков с вмятинами (под давлением), которые мешают прохождению очистительных и диагностирующих внутритрубных устройств; присоединение комбинированной дуговой сваркой патрубков малого диаметра с целью установки контрольно-измерительной аппаратуры.

Важная роль при выполнении ремонтно-восстановительных работ и реконструкции объектов линейной части магистральных трубопроводов отводится дуговым способам сварки. После проведения технической диагностики и выявления дефектов возникает вопрос об их классификации, а затем и о способах ремонта объектов. Поэтому одной из первоочередных задач является обеспечение исполнителей сварочных работ на действующих трубопроводах ведомственной нормативно-технической документацией, разработанной с учетом передового опыта эксплуатации магистральных трубопроводов, достижений научно-технического прогресса в области создания новой техники и технологий, а также международных требований и стандартов. Необходимо также создание программы обучения сварщиков и руководителей сварочных работ, а также их аттестация на допуск к выполнению восстановительного ремонта с применением дуговой сварки на трубопроводах под давлением.

В качестве примера классификации дефектов и их структурного распределения ниже приведены результаты диагностирования технического состояния магистральных газопроводов ГК «Укртрансгаз» (25 % трубопроводов всего объема) с помощью интеллектуального поршня фирмы «Rozen» [2]. Так, потери металла более 60 % толщины стенки трубы равны 0,9 %; 41…60 % — 5 %; 20…40 % — 45,5 %. Дефекты кольцевых швов составляют 10,8 %, поверхностных — 11 %, продольных — 7 %, спиральных 0,9 %, дефекты

основного металла — 11,1 %, неклассифицированные — 7 %; аномальные виды дефектов — 0,8 %. Видно, что наибольшее количество дефектов приходится на потери (вынос) металла. В кольцевых сварных стыках выявлены недопустимые, согласно нормативным документам ВСН 006-89 и ВСН 012-88, дефекты, а также те, которые заложены во время строительства магистральных газопроводов (около 1 % всех выявленных дефектов). Обнаружено также множество поверхностных дефектов в сварных швах (12 %) и внутренних типа расслоения (11 %) в основном металле.

На основе анализа характера и геометрических параметров выявленных дефектов предложен структурный подход к разработке технологий восстановления несущей способности линейной части магистральных трубопроводов под давлением с применением дуговой сварки (рисунок). Здесь способы ремонта сгруппированы по видам дефектов и целевому назначению. Для каждого вида определены безопасные условия выполнения дуговой сварки на трубопроводе под давлением с учетом их рабочих параметров и физико-химических свойств окружающей среды [3], после чего определены условия обеспечения технологической и конструктивной прочности сварных соединений [4]. Учитывая, что в большинстве технических решений применяется новый тип сварного соединения — нахлесточно-стыковое, необходимо разработать технологию контроля качества таких соединений на базе ультразвуковой дефектоскопии.

Разработанные способы ремонта действующих магистральных трубопроводов следует отнести к ресурсосберегающим технологиям, с помощью которых можно повысить безопасность восстановительных работ и снизить техногенную нагрузку на окружающую среду за счет уменьшения выбросов экологически вредных соединений углерода. В табл. 1, 2 представлены конструктивно-технологические решения ремонта магистральных трубопроводов и условия их применения в зависимости от характера и геометрических параметров дефектов.

В настоящее время в системе ГК «Укртрансгаз» действуют три технологические инструкции и разработаны ведомственные строительные нормы, которые регламентируют ремонт линейной части магистральных нефтепроводов. Суммарный экономический эффект от применения некоторых способов ремонта (заварка язв, установление герметичных и компаундных муфт, усиление дефектных стыков двухслойными муфтами) на магистральных газо- и нефтепроводах под давлением превысил 16 млн грн.

Разработаны программы обучения и аттестовано 42 руководителя сварочных работ и приблизительно 80 сварщиков ГК «Укртрансгаз» и АО «Укртранснафта» на допуск к выполнению ремонтных работ на магистральных трубопроводах под давлением.

1. *Обгрунтування* нового підходу до виконання зварювальних робіт на трубопроводах під тиском / В. С. Бут, Ю. Я. Грецький, В. В. Розгонюк, В. М. Коломійїв // Нафт. і газова пром-сть. — 2001. — № 4. — С. 33–39.
2. *Напрямки* розвитку технологій ремонту магістральних трубопроводів в умовах експлуатації / В. С. Бут, В. М. Василюк, Ю. Т. Федоренко, М. Н. Дрогомирецький // Науч.-практ. сем. «Обеспечение эксплуатационной надежности систем трубопроводного транспорта», г. Киев, 11 апр. 2006 г. — Киев, 2006. — С. 31–38.
3. *Математическое* моделирование язвенных дефектов на действующих нефтегазопроводах и разработка многочисленного метода оценки допустимых режимов дуговой заварки таких дефектов / В. И. Махненко, В. С. Бут, Е. А. Великоиваненко и др. // Автомат. сварка. — 2001. — № 11. — С. 3–10.
4. *Определение* допустимых размеров сварных швов при установке тройников и муфт на действующих магистральных трубопроводах / В. И. Махненко, В. С. Бут, Е. А. Великоиваненко и др. // Там же. — 2003. — № 8. — С. 7–12.

A structural approach to development of repair technologies with application of arc welding of the main pipelines under pressure for different defects of the linear part is proposed. Design-technological schematics of pipeline repair and criteria for repair technique selection, depending on defect nature and parameters, are given.

Поступила в редакцию 19.02.2007

УДК 621.791.72

ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Чл.-кор. НАН Украины **И. В. КРИВЦУН**, **В. Д. ШЕЛЯГИН**, **В. Ю. ХАСКИН**, кандидаты техн. наук, **В. Ф. ШУЛЫМ**, **Е. Г. ТЕРНОВОЙ**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы технологические возможности гибридной лазерно-плазменной сварки алюминиевых сплавов в сопоставлении с плазменной и лазерной сваркой. Изучены свойства сварных соединений, выполненных гибридным способом, а также их макро- и микроструктура. Показана перспективность применения лазерно-плазменной сварки тонколистовых алюминиевых сплавов при использовании лазеров с остросфокусированным пятном излучения.

Ключевые слова: гибридная лазерно-плазменная сварка, алюминиевые сплавы, лазерное излучение, диодный лазер, CO_2-лазер, присадочная проволока, очистка, разнополярные импульсы, синергетический эффект, механические свойства, металлографические исследования, структура

В промышленности часто возникает необходимость сварки изделий из алюминиевых сплавов, что служит стимулом для разработки соответствующей технологии. Актуальны такие задачи, как сварка тонкостенных сотовых и стрингерных панелей вагонов высокоскоростной железной дороги, корпусных элементов авиационной техники, судовых конструкций, профильных проставок для стеклопакетов, облегченных корпусов автомобилей и т. д. [1]. Для создания сварных конструкций из тонколистовых алюминиевых сплавов можно использовать различные технологии. В последнее время вызывают интерес технологии, в которых применяется лазерное излучение [1–6]. Большинство авторов признает перспективность лазерной сварки, однако при этом они отмечают ряд проблем, связанных с ней.

Одной из важных проблем, возникающей при лазерной сварке алюминия и его сплавов, характеризующихся высокой отражательной способностью свариваемой поверхности, является необходимость в использовании лазерного излучения большой мощности (свыше 2 кВт) для перехода от поверхностного к объемному тепловложению [2]. Однако повышение мощности лазерного излучения влечет за собой увеличение стоимости лазерного оборудования и, как следствие, рост себестоимости 1 м погонной длины сварного шва. Одним из способов решения этой проблемы является повышение поглощающей способности свариваемых поверхностей. Для этого можно использовать лазерное излучение с более короткой длиной волны, например, диодные или Nd:YAG-лазеры вместо CO_2-лазеров [2]. Другим способом решения указанной проблемы является использование комбинированных [4] или гибридных лазерно-дуговых [7] технологий, что позволяет сочетать преимущества отдельных составляющих способа с нивелированием их недостатков [8].

Другой существенной проблемой, возникающей при лазерной сварке алюминиевых сплавов, является устранение оксидной плены — так называемая очистка. Обычно эту операцию выполняют механическим способом (например, шабрением) или химическим травлением в водно-щелочном растворе. Немецкие ученые разработали способ лазерной очистки свариваемых деталей от оксидной плены [9]. Для этого они использовали специальную фокусирующую оптику, расщепляющую лазерный пучок на два — слабый очищающий и более мощный сварочный. Возможно также применение специальных лазерных установок, предназначенных для очистки соединяемой поверхности, что приводит к дополнительным затратам.

Нами исследован способ гибридной лазерно-плазменной сварки алюминиевых сплавов с одновременной очисткой их поверхности путем использования разнополярных импульсов сварочного тока. В качестве лазерной составляющей гибридного процесса сварки использован диодный лазер модели DF 020 HQ (фирма «Рофин-Синар», Германия) мощностью до 2 кВт с длиной волны 0,808/0,940 мкм и CO_2-лазер ЛТ 104 [10] с длиной волны 10,6 мкм. Для практической реализации процесса гибридной сварки с учетом результатов ранее проведенных исследований [11] разработан и изготовлен специальный интегрированный плазмотрон, в котором лазерное излучение воздействовало на свариваемую деталь вместе с плазмой прямого действия через общее сопло. В связи с тем, что плазмотрон использовали вместе с диодным лазером, фокусирующая оптика которого имеет фиксированное фокусное расстояние 120 мм, при разработке его конструкции не удалось реализовать схему соосного воздействия лазерного пучка и дуги на сварочную ванну.

© И. В. Кривцун, В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, В. Ф. Шулым, Е. Г. Терновой, 2007

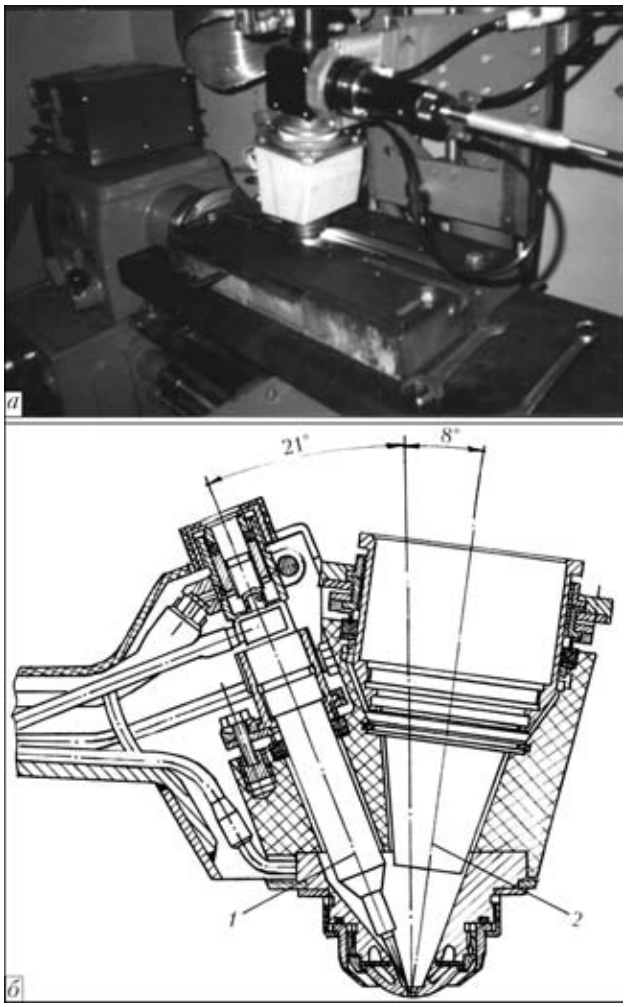


Рис. 1. Внешний вид (*а*) и поперечное сечение (*б*) интегрированного плазмотрона для гибридной лазерно-плазменной сварки: *1* — катодный узел; *2* — ось сфокусированного лазерного пучка

Была принята схема, при которой оси электрода плазмотрона и лазерного пучка располагались под минимально возможными углами к оси плазмообразующего сопла (соответственно 21 и 8°). Внешний вид и схема плазмотрона в разрезе представлены на рис. 1. Устройство представляет собой одноэлектродный плазмотрон со сменным (вместе с цангой) вольфрамовым электродом диаметром 2,5…3,5 мм, установленным в водоохлаждаемом корпусе. Электрод может перемещаться вдоль своей оси с последующей фиксацией, его движение регулируется также в поперечном направлении. Благодаря специальной форме медного сопла и наличию в нем водяного канала охлаждающую воду можно подвести непосредственно к выходному каналу диаметром 1,5…3,0 мм, создавая таким образом максимально благоприятные условия для его охлаждения. Конструкция плазмотрона позволяет вводить сфокусированный лазерный пучок в зону сварки под углом 8° к оси сопла, для чего в верхней части его корпуса предусмотрен специальный узел для подсоединения к нему фокусирующей системы диодного лазера DF 020 HQ с оптическим волокном. Предусмотрена возможность регулировки положения фокусного пятна как относительно оси лазерного пучка, так и стенок выходного канала сопла. Для предотвращения загрязнения фокусирующей оптики используется защитное стекло с принудительным обдувом его плазмообразующим газом, а для защиты изготовленного из капролона внешнего корпуса плазмотрона от возможного попадания на него лазерного излучения имеется конус из нержавеющей стали.

Для питания плазмотрона разработан и изготовлен источник питания плазменной дуги, позволяющий осуществлять сварку на прямой полярности и в режиме разнополярных импульсов тока. Использованные при его создании решения схем (высокие частота открывания и закрывания ключей, а также частота преобразования импульсов тока) позволили обеспечить необходимые динамические характеристики и широкий диапазон регулирования длительности технологических импульсов (0,1…99,0 мс). В сочетании со сварочным током до 110 (прямой) и до 60 А (обратной полярности) это позволило обеспечить широкие технологические возможности комплекса плазмотрон–источник питания.

При выполнении сварки диаметр сопел меняли в пределах 2,0…2,5 мм. Диапазон регулирования лазерной мощности составлял 0,8…2,0 кВт, а сварочного тока — 50…110 А при напряжении около 20 В. Частота импульсов сварочного тока достигала 1000 Гц. В качестве материалов свариваемых образцов использовали сплавы АМц, АМг3, АМг5м, АМг6 толщиной 0,5…3,0 мм. В ряде случаев применяли присадочную проволоку СвАМг6 диаметром 1,2 мм.

В ходе экспериментов выполняли наплавку на плоских образцах, а также сварку стыковых и нахлесточных соединений. Процесс сварки осуществляли в аргоне с помощью лазерного излучения или плазмы прямого действия, а также гибридным способом. При этом диаметр пятна сфокусированного излучения диодного лазера составлял 1,2 мм, а CO_2-лазера — 0,5 мм. Установлено, что в случае плазменного процесса для получения качественной очистки от оксидной плены на высоких скоростях (60…330 м/ч) оптимальное соотношение длительности и амплитуды импульса тока при прямой и обратной полярности составляет приблизительно 1:1. Это соотношение использовано в дальнейшем и для гибридного процесса. Поскольку такой режим не является оптимальным с позиций срока службы и стабильности работы вольфрамового катода, предприняты меры по повышению этих параметров, одной из которых является использование в качестве анода дуги водоохлаждаемого плазмоформирующего сопла.

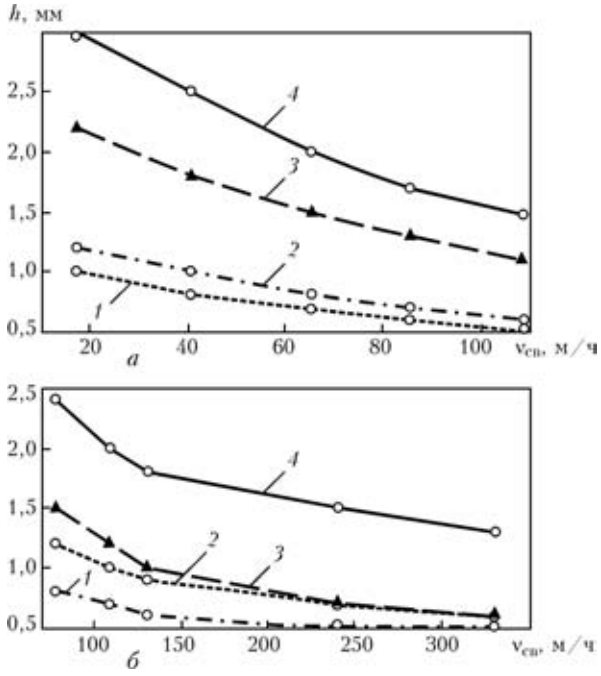


Рис. 2. Зависимости глубины проплавления h от скорости $v_{св}$ лазерно-плазменной сварки алюминиевых сплавов с использованием излучения диодного лазера (*а*) и CO_2-лазера (*б*): *1* — лазерная сварка; *2* — плазменная; *3* — лазерно-плазменная (арифметическая сумма значений h); *4* — гибридная

В результате обработки данных, полученных при сварке лазерным излучением мощностью около 2 кВт, плазмой при токе 100 А и гибридным способом при 50%-й мощности плазменной составляющей и 1,2…1,5 кВт мощности лазерной, построены зависимости, приведенные на рис. 2. При сравнении кривых *1* на рис. 2 видно, что при лазерной сварке несмотря на больший диаметр сфокусированного пятна излучения диодного лазера меньшая длина волны позволяет значительно увеличить глубину проплавления. В плазменном процессе (кривые *2* на рис. 2) для всего диапазона скоростей наблюдается монотонное уменьшение глубины проплавления. Кривые *3* на этом рисунке представляют собой арифметическую сумму значений кривых *1* и *2*. Кривые *3* и *4* свидетельствуют о наличии синергетического эффекта при одновременной сварке в общую ванну лазерной и плазменной составляющими. Причем при использовании CO_2-лазера этот эффект проявляется интенсивнее за счет меньшего диаметра сфокусированного пятна излучения (большей плотности мощности). Здесь следует отметить, что несмотря на больший диаметр пятна излучения диодного лазера (и соответственно меньшую плотность мощности по сравнению с CO_2-лазером) меньшая длина волны излучения, а значит, и больший коэффициент поглощения поверхностью алюминия обеспечивает при одинаковой скорости гибридной сварки соизмеримую в обоих случаях глубину проплавления (кривые *4* на рис. 2). Уменьшение диаметра сфокусированного пятна повышает стабильность горения плазмы на высоких скоростях сварки и «привязывает» ее к зоне действия лазерного излучения.

Для наглядной оценки различных способов сварки алюминиевого сплава АМг3 толщиной 1,5 мм в табл. 1 представлен внешний вид швов с лицевой стороны и поперечные макрошлифы сварных стыковых соединений, полученные каждым из трех способов сварки на скорости 108 м/ч с применением диодного лазера DF 020 HQ, а в табл. 2 — внешний вид наплавок с лицевой стороны и их поперечные макрошлифы, полученные этими же способами на скорости 130 м/ч с применением CO_2-лазера ЛТ 104. При этом излучение диодного лазера мощностью 1,5…2,0 кВт обеспечивало стабильное проплавление на глубину до 0,5 мм (табл. 1). Излучение CO_2-лазера при аналогичных режимах оставляло на поверхности образцов лишь прерывистые следы (табл. 2). Проплавление плазменной дугой на скорости свыше 240 м/ч также носит нестабильный и прерывистый характер несмотря на высокую частоту следования импульсов сварочного тока. При гибридном способе сварки достигнуты наилучшие технологические результаты во всем исследованном диапазоне скоростей. Полное сквозное проплавление образца соединения толщиной 1,5 мм с использованием излучения CO_2-лазера обеспечивалось при скорости сварки 130 м/ч и суммарной мощности лазера и плазмы 2 кВт (примерно по 1 кВт каждого). Это объясняется тем, что меньший диаметр фокусного пятна излучения CO_2-ла-

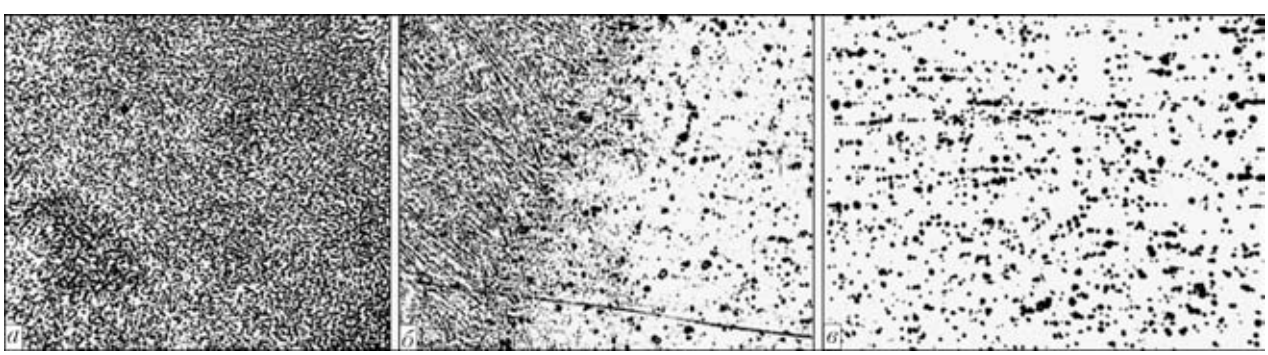
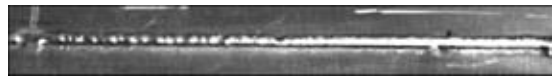
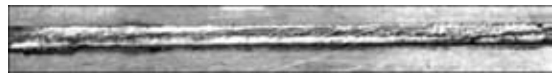


Рис. 3. Микроструктура (×150) металла сварного стыкового соединения сплава АМг3 толщиной 1,5 мм, полученного гибридным лазерно-плазменным способом: *а* — центральная часть шва; *б* — зона сплавления; *в* — основной металл

Таблица 1. Внешний вид и поперечные макрошлифы образцов стыковых и нахлесточных соединений сплава АМг3 толщиной 1,5 мм, полученных лазерной, плазменной и гибридной сваркой

Мощность лазера, Вт	Ток плазменной дуги (прямая/обратная полярность), А	Внешний вид шва с лицевой стороны	Поперечный макрошлиф
2000	—		
—	100/50		
1000	50/50		
1500	100/50		

Примечание. Скорость сварки 108 м/ч; диодный лазер DF 020 HQ; диаметр сфокусированного пятна 1, 2 мм; заглубление фокуса 1 мм; напряжение на плазменной дуге 20 В.

Таблица 2. Внешний вид и поперечные макрошлифы образцов стыковых соединений сплава АМг3 толщиной 1,5 мм, полученных лазерной, плазменной и гибридной сваркой

Мощность лазера, Вт	Ток плазменной дуги (прямая/обратная полярность), А	Внешний вид шва с лицевой стороны	Поперечный макрошлиф
1500	—		—
—	100/50		
1000	60/50		

Примечание. Скорость сварки 130 м/ч; CO_2-лазер ЛТ 104; диаметр сфокусированного пятна 0,5 мм; заглубление фокуса 1 мм; напряжение на плазменной дуге 20 В.

зера позволяет обеспечить более высокую плотность энергии, чем излучение диодного лазера. В этом случае образуется узкая зона интенсивного испарения проплавляемого металла, которая улучшает условия горения плазменной дуги, способствует ее дополнительному сжатию и соответственно получению большей глубины проплавления, стабилизации процесса и «привязке» плазмы к зоне действия лазерного излучения, что подтверждено в работе [12].

Результаты исследований химических свойств сварного соединения, полученного гибридным способом сварки, приведены в табл. 3. Испытания на временное сопротивление разрыву стыковых соединений из сплава АМг3, полученных гибридной сваркой с использованием диодного лазера, показали, что прочность металла шва равна 232...237 МПа (90…95 % прочности основного металла). На основании этих исследований установлено, что прочность сварных соединений, полученных лазерно-плазменным способом с использованием излучения диодного лазера, составляет примерно 0,9 прочности основного металла. Такой результат позволяет утверждать, что по прочностным характеристикам гибридная сварка превосходит дуговые способы сварки и является приемлемой для изготовления большинства конструкций.

Проведенные исследования микроструктур стыкового соединения сплава АМг3 (рис. 3) тол-

Таблица 3. Химический состав (мас. %) сварного соединения сплава АМг3, полученного гибридным способом сварки с использованием диодного лазера

Объект исследования	Si	Mg	Mn	Cu	Zn	Ni	Ti	Fe	Al
Основной металл	0,38	3,5	0,5	0,1	0,18	0,03	0,1	0,4	Осн.
Шов	0,40	3,2	0,3	0,1	0,12	0,03	0,1	0,4	Осн.

щиной 1,5 мм, полученного гибридным способом сварки, свидетельствуют о том, что структура металла шва имеет дендритное мелкодисперсное строение. Выделение фаз в шве — дисперсное. Линия сплавления без признаков перегрева, за исключением корневой части шва, где наблюдаются непрерывные цепочки выделений по границам зерен в зоне термического влияния, непосредственно у линии сплавления, которые при необходимости можно удалить после сварки механическим путем.

Выводы

1. Применение гибридной лазерно-плазменной сварки алюминиевых сплавов позволяет в 2…4 раза увеличить глубину проплавления по сравнению с лазерной сваркой и примерно во столько же повысить скорость сварки по сравнению с плазменной. При этом важным фактором является использование катодной очистки поверхности от оксидной плены.

2. Проявление синергетического эффекта, привязка плазменной дуги к зоне действия лазерного излучения и стабильность процесса высокоскоростной гибридной сварки в большей степени связаны со степенью фокусировки лазерного излучения, чем с длиной его волны.

3. Химический состав сварных соединений близок к составу основного металла, а их временное сопротивление разрыву составляет около 0,9 прочности основного металла, что превышает свойства аналогичных соединений, полученных дуговыми способами сварки.

4. Структуры сварных соединений алюминиевых сплавов, полученные гибридным способом, имеют более мелкую дисперсность металла шва и узкую зону сплавления по сравнению с дуговыми способами сварки, что приближает их к соединениям, полученным лазерным способом.

5. Результаты предварительных исследований технологических возможностей гибридной лазерно-плазменной сварки алюминиевых сплавов позволили сделать вывод о перспективности этого способа и необходимости проведения дальнейших более глубоких экспериментальных и исследовательских работ в области скоростной сварки тонколистовых конструкций из алюминиевых сплавов.

1. *Kimihiro Shibata, Takakuni Iwase, Hiroki Sakamoto, Minoru Kasukawa.* Welding of aluminum car body parts with twin-spot high power Nd:YAG laser // J. Light Met. Weld. — 2003. — № 4. — P. 25–34.
2. *Tsukamoto S.* Laser welding // Welding Intern. — 2003. — **17**, № 10. — P. 767–774.
3. *Katayama S.* Laser welding of aluminium alloys and dissimilar metals // Ibid. — 2004. — **18**, № 8. — P. 618–625.
4. *Volpone M., Mueller S. M.* Laser e Friction Stir Welding — Due tecnologie di giunzione emergenti. Confronto su vantaggi e limitazioni // Riv. Ital. Saldatura. — 2005. — № 5, Sept./Oct. — P. 683–691.
5. *Rathod M. J., Kutsuna M.* Joining of aluminum alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding // Welding J. — 2004. — № 1. — P. 16–26.
6. *Технологии* сварки и соединений в XXI веке // J. Jap. Welding Society. — 2001. — **70**, № 3. — P. 6–1.
7. *Ishide T., Tsubota S., Watanabe M., Ueshiro K.* Development of TIG–YAG and MIG–YAG hybrid welding // Welding Intern. — 2003. — **17**, № 10. — P. 775–780.
8. *Патон Б. Е.* Совершенствование способов сварки — один из путей повышения качества и экономичности сварных конструкций // Автомат. сварка. — 1995. — № 11. — С. 3–11.
9. *Laserstrahlschweiβen* mit prozessintegrierter Reinigung / J. von Beren, T. Seefeld, F. Vollertsen // Der Praktiker. — 2004. — № 4. — S. 118–120.
10. *Технологический* CO_2-лазер ЛТ 104 мощностью 10 кВт / В. П. Гаращук, В. Д. Шелягин, О. К. Назаренко и др. // Автомат. сварка. — 1997. — № 1. — С. 36–39.
11. *Гибридная* лазерно-микроплазменная сварка металлов малых толщин / Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, И. В. Кривцун и др. // Там же. — 2002. — № 3. — С. 5–9.
12. *Soudage* hybride arc/laser / F. Briand, K. Chouf, P. Leffbvre, O. Matile // Soudage et Techniques Connexes. — 2002. — № 9/10. — S. 9–13.

Technological capabilities of the hybrid laser-plasma method of welding aluminium alloys were investigated in comparison with plasma and laser welding. Properties of the welded joints made by the hybrid method, as well as their macro- and microstructure, were investigated. It is shown that practical application of laser-plasma welding holds promise for thin-sheet aluminium alloys using lasers with a sharp-focused radiation spot.

Поступила в редакцию 30.06.2006

УДК 621.791.75.042

НИЗКОВОДОРОДНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ СУДОРЕМОНТА, РЕМОНТА ОБЪЕКТОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА И ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА*

Академик НАН Украины **И. К. ПОХОДНЯ**, **И. Р. ЯВДОЩИН**, **А. Е. МАРЧЕНКО**, **Н. В. СКОРИНА**, кандидаты техн. наук, **В. И. КАРМАНОВ**, д-р техн. наук, **О. И. ФОЛЬБОРТ**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены принципы построения покрытия низководородных электродов нового поколения для судоремонта, ремонта объектов металлургического комплекса, трубопроводного транспорта и приведены их технические характеристики.

Ключевые слова: дуговая сварка, покрытые электроды, ремонт конструкций, система легирования, металл шва, механические свойства, сварочно-технологические свойства

В металлургии, трубопроводном транспорте, речном и морском судоходстве непрерывно возрастает количество объектов ответственного назначения, которые исчерпали свой эксплуатационный ресурс и требуют ремонта или реставрации. Для выполнения этих работ необходимы электроды, которые имели бы высокие технологические характеристики, качество и были бы доступными по цене для потребителей. Европейские фирмы для указанных целей предлагают электроды по высоким ценам, которые в основном недоступны для потребителя.

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины на протяжении 2004–2006 гг. в соответствии с программой «Ресурс» разработаны низководородные электроды, предназначенные для судоремонта (АНО-102), ремонта объектов металлургического комплекса (АНМК-44.01) и трубопроводного транспорта (АНО-38). При разработке этих электродов учитывали состав и сортамент сталей, условия эксплуатации сварных конструкций, а также особенности выполнения ремонтных работ в указанных сферах производства.

Среди задач, которые решали при разработке новых поколений низководородных электродов, ключевыми считали улучшение сварочно-технологических свойств электродов и достижение необходимых механических показателей металла сварного шва. Была модернизована газошлакообразующая часть покрытий, что позволило существенно улучшить стабильность горения сварочной дуги, формирование шва, отделение шлаковой корки, уменьшение разбрызгивания расплавленного металла, обеспечение возможности сварки переменным током.

Оптимальное содержание марганца, который обеспечивает наиболее высокие значения ударной вязкости металла шва при отрицательных температурах, для низководородных электродов общего назначения составляет 1,4…1,5 % (рис. 1). При таких концентрациях марганца доля игольчатого феррита в микроструктуре металла шва составляет 60…70 % и сохраняется такой несмотря на колебание концентрации кремния в швах в пределах 0,2…0,9 % [2]. При более низком содержании марганца доля игольчатого феррита в структуре металла шва не только снижается, но и становится зависимой от концентраций кремния в границах, регламентированных нормативной документацией (0,2…0,6 %). Именно изменения доли игольчатого феррита в металле шва, связанные с ко-

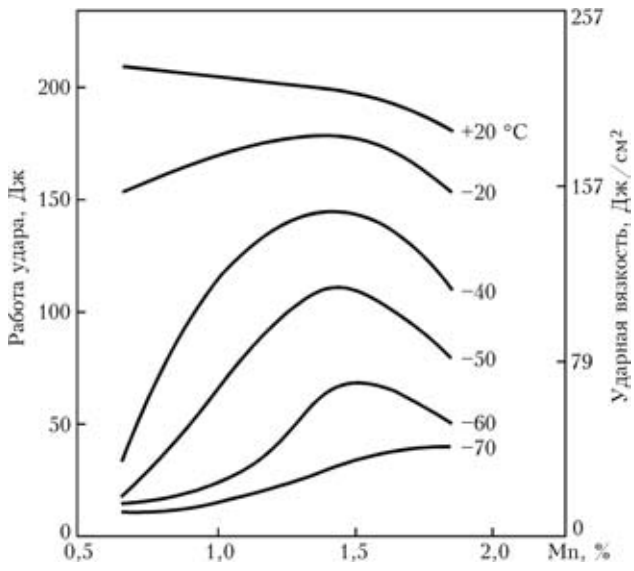


Рис. 1. Влияние содержания марганца на работу удара и ударную вязкость металла шва при разных температурах [1]

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

© И. К. Походня, И. Р. Явдощин, А. Е. Марченко, Н. В. Скорина, В. И. Карманов, О. И. Фольборт, 2007

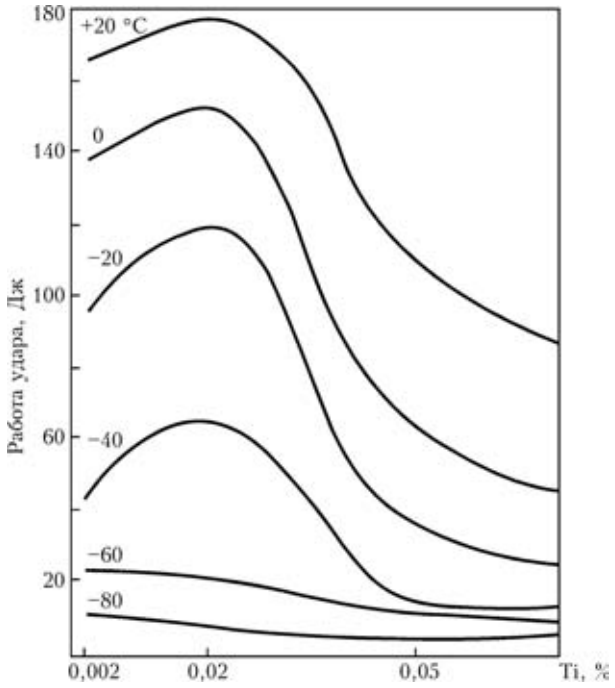


Рис. 2. Влияние содержания титана в металле шва на работу удара при разных температурах [5]

лебаниями кремния, могут стать причиной нестабильности показателей его ударной вязкости.

Оптимизация содержания титана в металле шва также оказывает влияние на возможность обеспечения его высокой ударной вязкости. На оптимальное содержание титана влияет основность флюса или шлакообразующей основы электродного покрытия, способ сварки, система легирования и др. [3]. Согласно работе [4] оптимальное содержание титана в металле шва при сварке электродами с карбонатно-флюоритным покрытием составляло около 0,1, а согласно работе [5] — 0,02 % (рис. 2). Несбалансированность системы раскисления у ряда марок электродов с основным покрытием приводит к снижению показателей ударной вязкости швов при низких температурах.

Авторами исследовано влияние содержания титана в электродном покрытии основного вида (типа УОНИ-13/55) на ударную вязкость металла шва. Содержание титана в металле шва регулировали путем изменения количества ферротитана в покрытии исследуемых электродов. При этом сохраняли постоянный уровень марганца и кремния в швах, варьировали количество ферромарганца и ферросилиция, которые вводили в покрытие. Химический состав металла швов, выполненных исследуемыми электродами, приведен в табл. 1, результаты испытаний ударной вязкости металла швов, выполненных этими электродами, — в табл. 2. Как видно из данных таблиц, наиболее высокие значения ударной вязкости металла шва при отрицательных температурах обеспечиваются при содержании в нем титана на уровне 0,02 %.

Результаты проведенных исследований учитывали при разработке составов покрытий электродов, предназначенных для выполнения ремонтных работ.

Электроды АНО-102. При разработке этих электродов оптимизировали диапазон концентраций элементов в металле шва, %: 1,2…1,4 Mn; 0,25…0,40 Si; 0,015…0,020 Ti. Коррозионную стойкость металла шва в морской воде обеспечили введением в его состав 0,6…0,8 % никеля и 0,4…0,6 % меди. Состав газошлакообразующей основы покрытия электродов АНО-102 был разработан с учетом возможности обеспечения низкого содержания диффузионно-движущегося водорода; сварке на постоянном и переменном токе; сварочно-технологических свойств электродов на уровне лучших зарубежных аналогов.

Электроды АНО-102 (Э50А согласно ГОСТ 9467–75) в основном предназначены для использования в судоремонте и судостроении вместо электродов УОНИ-13/55. Их условное обозначение в соответствии с евронормой — EN 499 — E 46 5 1Ni B12 H10.

Электроды предназначены для сварки судостроительных сталей нормальной и повышенной

Таблица 1. Химический состав наплавленного металла

Индекс электрода	Содержание ферротитана в покрытии, мас. %	Массовая доля в наплавленном металле, %					
		C	Mn	Si	Ti	[O]	[N]
Т-0	0	0,08	1,3	0,28	Следы	0,047	0,013
Т-5	5	0,10	1,0	0,23	0,02	0,044	0,013
Т-10	10	0,10	1,0	0,22	0,03	0,038	0,013
Т-15	15	0,09	1,1	0,28	0,04	0,038	0,012
Т-20	20	0,10	1,1	0,24	0,05	0,037	0,013

Таблица 2. Ударная вязкость металла швов, выполненных исследуемыми электродами, Дж/см^2

Индекс электрода	Температура, °С		
	+20	–20	–40
Т-0	217...227 / 221,7	70...134 / 112	64...75 / 68,3
Т-5	223...257 / 239	141...157 / 147,6	70...75 / 73,7
Т-10	223...232 / 228,3	102...155 / 128,6	16...61 / 31,3
Т-15	186...198 / 190	79...107 / 94,3	25...72 / 46,6
Т-20	196...215 / 208,6	57...151 / 104,3	35...87 / 64,0

Примечание. Здесь и в табл. 3 в числителе приведены минимальные и максимальные значения показателей ударной вязкости, в знаменателе — средние.

Таблица 3. Сравнение ударной вязкости металла швов, выполненных электродами АНО-102, УОНИ-13/55 и ОК 73.08 диаметром 4,0 мм

Марка электрода	Ударная вязкость KCV, Дж/см^2 при температуре, °С			
	+20	–20	–40	–60
АНО-102	186...204 / 198	168...192 / 181	94...98 / 96	72...84 / 78
УОНИ-13/55	181...192 / 187	82...104 / 96	28...74 / 52	12...32 / 24
ОК 73.08	190...224 / 212	170...196 / 185	90...102 / 96	76...88 / 81

прочности во всех пространственных положениях, за исключением вертикальных швов способом сверху вниз. Сварку можно выполнять на постоянном токе обратной полярности или на переменном токе от источников питания с напряжением нерабочего хода не ниже 65 В.

Сравнительные испытания электродов АНО-102 с электродами УОНИ-13/55 и зарубежными электродами ОК 73.08 шведской фирмы ESAB показали, что по показателям ударной вязкости металла шва электроды АНО-102 превосходят электроды УОНИ-13/55 и не уступают электродам ОК 73.08 (табл. 3).

Испытания сварочно-технологических свойств новых электродов показали, что они обеспечивают хорошее формирование металла шва при сварке в разных пространственных положениях, малое разбрызгивание, легкое отделение шлаковой корки даже при глубоком раскрытии кромок. По этим показателям электроды АНО-102 превосходят электроды УОНИ-13/55.

Показатели плавления электродов АНО-102, УОНИ-13/55 и ОК 73.08, которые определяли при сварке электродами диаметром 4,0 мм, приведены в табл. 4. Электроды АНО-102 прошли испытания на Ильичевском судоремонтном заводе, где получили хорошие отклики сварщиков. Одобрены Российским морским регистром судоходства.

Применение новых электродов АНО-102 вместо электродов УОНИ-13/55 благодаря более высокой коррозийной стойкости сварных швов и ударной вязкости металла шва позволит существенно повысить ресурс работы сварных конструкций морских и речных судов.

Таблица 4. Характеристики плавления электродов АНО-102, УОНИ-13/55 и ОК 73.08 (постоянный ток, обратная полярность)

Марка электрода	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Коэффициент разбрызгивания, %	Выход металла, %	
			годного	наплавленного
АНО-102	9,2...9,6	0,8...1,9	70,1...70,5	107,9...108,3
УОНИ-13/55	8,1...8,6	3,2...4,8	68,4...69,4	91,4...94,5
ОК 73.08	10,0...10,5	0,9...2,1	72,4...72,8	120...135

Электроды АНМК-44.01. В металлургии ремонтные работы являются неотъемлемой составляющей производства. На протяжении почти шестидесяти лет они выполняются исключительно с применением сварочных технологий. До недавнего времени ремонт объектов металлургического комплекса выполняли низководородными электродами ДБСК-55 и УОНИ-13/55. Сегодня обе марки электродов и их модификации технически устарели и уступают по ключевым техническим показателям электродам зарубежных фирм, которые появились на нашем рынке.

Новые электроды АНМК-44.01 предназначены для ремонта объектов металлургического комплекса. По механическим свойствам металла шва они отвечают типу Э50А (ГОСТ 9467–75). Их условное обозначение в соответствии с евронормой EN 499 — Е 46 4 В 52 Н10, согласно ISO 2560 — Е 515 В 130 24 (Н).

Газошлакообразующая основа покрытия относится к системе $CaCO_3$–CaF_2–SiO_2 (TiO_2). Система раскисления наплавленного металла ориентирована на доступные в Украине ферросплавы (среднеуглеродный ферромарганец марок ФМн 88 и ФМн 90, ферросилиций марки ФС-45, ферротитан марок ФТи 35 С5 или ФТи 35 С8).

Техническая характеристика электродов АНМК-44.01: коэффициент наплавки 9,5…11,5 г/(А·ч); выход наплавленного металла 120…130 %. Химический состав наплавленного металла следующий, %: ≤ 0,10 C; 1,0…1,30 Mn; 0,25…0,35 Si; ≤ 0,030 S; ≤ 0,030 P; 0,020…0,030 Ti (факультативно). Механические свойства металла шва: $\sigma_т \geq$ ≥ 440 МПа; $\sigma_в$ = 510…610 МПа; $\delta_5 \geq$ 22 %; $\varphi \geq$ ≥ 65 %; KCV_{+20} = 200…250 Дж/см^2; KCV_{-40} = = 80…100 Дж/см^2.

Отличительной особенностью покрытия новых электродов является повышенное содержание железного порошка (до 40 % в сухой смеси) и более толстое покрытие по сравнению с электродами предыдущих разработок (отношение $D_п/d_с$ = 1,8; $K_{мп}$ = 85 %), вследствие чего достигается высокая эффективность и производительность электродов ($K_{вн}$ = 135 %, $a_н$ = 9,5…11,0 г/(А·ч)). Вместе с тем электроды диаметром до 4 мм включительно сохраняют возможность сварки во всех пространственных положениях, за исключением вертикальных швов, которые сваривают способом сверху вниз.

Разработанные электроды целиком отвечают нормативным требованиям к ремонтным работам, которые выполняют на объектах металлургического комплекса, и существенно превосходят отечественные аналоги (электроды марок УОНИ-13/55, ДБСК-55) по ключевым техническим показателям, в том

Таблица 5. Сравнение технико-экономических характеристик электродов АНМК-44.01, УОНИ-13/55 и ДБСК-55

Марка электрода	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Выход металла, %		Возможность сварки переменным током	Доля активного горения дуги, %	Расход электродов на 1 кг наплавленного металла
		годного	наплавленного			
УОНИ-13-55	9	60	90	Невозможно	50	1,7
ДБСК-55	10	73	105	Допустимо	40	1,5
АНМК-44.01	9,5...11,5	70	125...130	Возможно	75	1,4

числе по производительности — на 15…30 %; выходу наплавленного металла на 20…40 %; по времени активного горения дуги в 1,5…1,9 раза. При этом расход электродов на 1 кг наплавленного металла сокращается на 10…20 % (табл. 5).

Электроды позволяют вести сварку на переменном токе в монтажных условиях, благодаря чему удается избежать магнитного дутья и образования связанных с ним дефектов сварных швов. В данное время электроды проходят опытно-промышленную проверку у потенциальных потребителей.

Электроды АНО-38. Газотранспортная система (ГТС) Украины является одной из самых больших и одновременно одной из наиболее старых в Европе [6, 7]. Одна только ГТС АО «Укргазпром» по состоянию на 2002 г. включала 34,5 тыс. км магистральных газопроводов. Всего на балансе газотранспортных предприятий Украины до этого времени находилось 47,9 тыс. км трубопроводов, которые исчерпали свой амортизационный срок, т. е. эксплуатируются дольше 33 лет.

По данным инспекторских служб АО «Укргазпром», сегодня с учетом полного физического износа требуют немедленного восстановления 1400 км газопроводов, а в перспективе ежегодная потребность в восстановлении линейной части газопроводов составляет 500 км. Фактические объемы выполнения работ по капитальному ремонту, реконструкции и техническому переоснащению магистральных газопроводов, которые наблюдаются на протяжении последних 15 лет, существенно ниже необходимых, в том числе из-за неудовлетворительного уровня технического оснащения и технологии выполнения ремонтных работ, а также отсутствия необходимых сварочных материалов.

Половина отказов ГТС обусловлена низким качеством труб и сварочных работ, т. е. вызвана дефектами, которые уже существовали в трубопроводах до начала их эксплуатации. Не выявленные приемно-сдаточными гидравлическими испытаниями со временем они достигли критического состояния, вследствие чего и стали источником разрушения.

Ремонтные сварочные работы ни в коей мере не должны ухудшить эксплуатационные характеристики отремонтированных газопроводов по сравнению с тем состоянием, которое характерно для строящихся газопроводов. Электроды АНО-38 отвечают этим требованиям. Они предназначены для односторонней сварки монтажных (неповоротных) стыков при сооружении и ремонте магистральных трубопроводов, включая сварку во всех пространственных положениях корневого, горячего прохода, заполняющих слоев и облицовочного слоя (вертикально ориентированные швы сваривают способом «на подъем»). Сварка ведется на постоянном токе обратной полярности. При необходимости возможна сварка на переменном токе.

По сравнению с электродами УОНИ-13/55 электроды АНО-38 гарантируют более высокое качество корневых проходов, включая формирование обратного валика. По сравнению с электродами АНО-ТМ/СХ, LB-52U, Fox EV 50 Pipe они имеют большую универсальность, характеризуются меньшим содержанием водорода в нап-

Таблица 6. Содержание водорода в металле, наплавленном электродами АНО-102, АНМК-44.01 и АНО-38

Марка электрода	Диаметр, мм	Сила тока, А	$[H]_{диф}$, мл/100 г	Страна и производитель
АНО-102	4	165	4,2...5,2	Украина, ИЭС
АНМК-44.01	3,0	125	5,0...5,2	» »
	4,0/6,8*	165	5,3...5,5	
	4,0/7,2*	165	5,0...5,7	
АНО-27	3,0	125	4,8...5,4	
	4,0	165	5,9...6,0	
ДБСК-55	3,0	125	6,2...7,0	Украина, «Бадм. ЛТД»
	4,0	165	7,1...8,3	
АНО-38	3,0	125	3,0...4,6	Украина, ИЭС
	4,0	165	2,8...3,2	
АНО-ТМ/СХ	3,0	165	4,4...5,7	
Z-7	4,0	95	4,2...4,8	Израиль, «ЗИКА»
ASB-255	3,0	125	3,7...4,6	Турция, «АСКАЙНАК»
	4,0	165	5,9...6,0	

* В знаменателе указан диаметр покрытия электрода.

лавленном металле и являются отечественным аналогом электрода Z-7 израильской фирмы «ЗИКА», которые импортируются в Украину.

По механическим свойствам наплавленного металла электроды АНО-38 отвечают типу Э50А (ГОСТ 9467–75). Гарантируются технологическая прочность и механические свойства швов, адекватные необходимым, на трубах из сталей, которые использовались при сооружении трубопроводов на протяжении всех предыдущих лет.

Условное обозначение электродов в соответствии с ГОСТ 9467–75: $\frac{\text{Э50А–АНО–38d–УД}}{\text{Е514–Б26}}$.

Полная техническая характеристика электродов АНО-38 следующая: коэффициент наплавки 8,5…9,0 г/(А·ч), химический состав наплавленного металла, %: ≤ 0,11 C; 0,90…1,20 Mn; 0,45…0,75 Si; ≤ 0,020 S; ≤ 0,030 P; 0,020…0,030 Ti (факультативно), механические свойства металла шва: $\sigma_т \geq 440$ МПа; $\sigma_в = 530…680$ МПа; $\delta_5 \geq 22$ %; $\varphi \geq 65$ %; $KCV_{+30} = 130…200$ Дж/см^2; $KCV_{-50} = 60…90$ Дж/см^2. В данное время электроды АНО-38 проходят проверку у потенциальных потребителей.

На электроды АНО-102, АНМК-44.01 и АНО-38 разработана нормативная документация. Технология производства этих электродов рассчитана на возможности отечественных предприятий-производителей электродов и доступное в Украине сырье. В табл. 6 приведены данные о содержании водорода в металле, наплавленном этими электродами.

Выводы

1. Разработанные низководородные электроды нового поколения для судоремонта (АНО-102), ремонта объектов металлургического комплекса (АНМК-44.01) и трубопроводного транспорта (АНО-38) по сварочно-технологическим свойствам и свойствам металла шва превосходят отечественные аналоги.

2. На электроды АНО-102, АНМК-44.01 и АНО-38 разработана нормативная документация. Электроды АНО-102 одобрены Российский регистром морского судоходства.

3. Производство новых электродов на предприятиях Украины позволит отказаться от закупок дорогих зарубежных электродов.

1. *Evans G. M.* Effect of manganese on the microstructure and properties of all-weld-metal deposits // Welding J. — 1980. — **59**, № 3. — P. 67–75.
2. *Evans G. M.* The effect of silicon on the microstructure and properties of C–Mn all-weld-metal deposits // Metal Construction. — 1986. — **18**, № 7. — P. 438–444.
3. *Abson D. J., Pargeter R. J.* Factors influencing the as-deposited strength, microstructure and toughness of manual metal arc welds suitable C–Mn steel fabrications. — S. l., [1986]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. II A-683–86).
4. *Sakaki H.* Effect of alloying elements on notch toughness of basis weld metals // J. Jap. Weld. Soc. — 1960. — **29**, № 7. — P. 539–544.
5. *Effect* of titanium on the properties of manual multipass weld / N. M. Ramini de Rissone, H. A. Rissone, J. L. Zuliani, R. Timerman. — S. l., [1985]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. II A-665–85).
6. *Беленький Д. М., Героев А. Э., Оганезов Л. Р.* Повышение качества линейной части газопроводов // Нефтегазовые технологии. — 2000. — № 4. — С. 15–18.
7. *Щербак О. В.* Техническое состояние ГТС нуждается в постоянном внимании // Сварщик. — 1998. — № 1. — С. 8.

Principles of formulation of coverings for a new generation of low-hydrogen electrodes intended for ship repair, repair of metallurgical industry facilities and pipeline transport are considered. Their specifications are given.

Поступила в редакцию 19.02.2007

ПОЛУАВТОМАТ М30 ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ СПОСОБОМ TIG

Полуавтомат М30 состоит из подающего механизма, шланга с мундштуком и источника питания электромагнита. Подающий механизм обеспечивает подачу в зону сварки присадочной проволоки диаметром 1,0...1,5 мм с заданной скоростью. Электромагнит управляет пространственным положением сварочной дуги, перемещая ее относительно оси шва. Амплитуду перемещения дуги можно изменять в реальном масштабе времени в зависимости от изменения зазора в стыке. Полуавтомат М30 можно использовать с любым стандартным источником питания постоянного тока.

Полуавтомат предназначен для механизированной сварки вольфрамовым электродом в аргоне в различных пространственных положениях, особенно в монтажных условиях, титана и сплавов на его основе, а также других немагнитных материалов. Механизированная сварка с применением полуавтомата М30 улучшает формирование швов при некачественной сборке деталей, сокращает потери присадочной проволоки, снижает требования к квалификации сварщиков.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Тел./факс: (38044) 287 13 66. E-mail: zamkov@paton.kiev.ua; ret99@ret99.kiev.ua

УДК 621.791:66.023/.025

РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ НА ДЕТАЛЯХ ЗАДВИЖЕК НЕФТЕГАЗОВОЙ АРМАТУРЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Чл.-кор. НАН Украины **М. Л. ЖАДКЕВИЧ**, **Е. Ф. ПЕРЕПЛЕТЧИКОВ**, **Л. Г. ПУЗРИН**, кандидаты техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
А. В. ШЕВЦОВ, инж. (фирма «ИФ Элтерм», г. Киев), **М. Н. ЯВОРСКИЙ**, канд. техн. наук (ГП «Укргаздобыча», г. Киев)

Работоспособность деталей запорного узла прямоточных задвижек фонтанной арматуры высокого давления обеспечивается путем нанесения на их рабочие поверхности методом плазменно-порошковой наплавки хромоникелевых сплавов, легированных углеродом, бором и кремнием. Показано, что для надежной работы запорных узлов этих задвижек слой наплавленного металла должен иметь гарантированную толщину. Установлено, что для работы при давлении до 70 МПа минимальная толщина наплавленного слоя должна составлять 1,5 мм, а с учетом возможных перешлифовок — до 2,0 мм.

Ключевые слова: плазменно-порошковая наплавка, арматура высокого давления, износ, прямоточные задвижки, детали запорного узла, концентрация напряжений, толщина наплавленного слоя

Важнейшим элементом фонтанной арматуры (ФА), которая эксплуатируется на нефтяных и газовых промыслах, являются задвижки. Они в основном обеспечивают безопасность персонала и устьевого оборудования, поскольку неконтролируемый выброс добываемого фонтанным методом горючего продукта может приводить к нарушению экологии и возникновению пожаров.

В ФА, рассчитанной на почти непрерывный проток жидкости или газа, предпочтение отдается прямоточным задвижкам [1–3]. Такие задвижки (рис. 1) имеют прочный стальной корпус *1* с двумя расположенными на одной оси патрубками, выполненными совместно с корпусом и присоединительными фланцами. Запорный узел задвижки располагается в корпусе и состоит из шибера *2*, способного перемещаться вверх и вниз между плотно прижатыми к нему седлами *3*. В седлах и нижней части шибера выполнены отверстия, размер которых соответствует каналам патрубков задвижки. В нижнем положении шибер перекрывает проток нефти или газа и прижимается к седлу полным рабочим давлением. В открытой задвижке отверстия в шибере и седлах совмещаются и продукт протекает свободно, не изменяя своей скорости и направления. Благодаря этому прямоточные задвижки обеспечивают низкое гидравлическое сопротивление с коэффициентом не более 0,2 (у клиновых задвижек и вентилей этот коэффициент 2…5 и более) [4].

В прямоточных задвижках высокого давления применяют запорные узлы с уплотнением «металл–металл», герметичность запорного узла в которых зависит от того, насколько тщательно подогнаны трущиеся поверхности шибера и седел. Для надежной работы их контактирующие поверхности притирают до чистоты с высотой неровностей не более 0,2 мкм.

Износ рабочих поверхностей шиберов и седел обусловлен рядом причин, в частности, воздействием твердых частиц породы, попадающих из добываемого продукта к трущимся поверхностям, а также содержащимися в продукте коррозионноактивными примесями такими, как CO_2 и H_2S. Кроме того, при открытии и закрытии задвижки

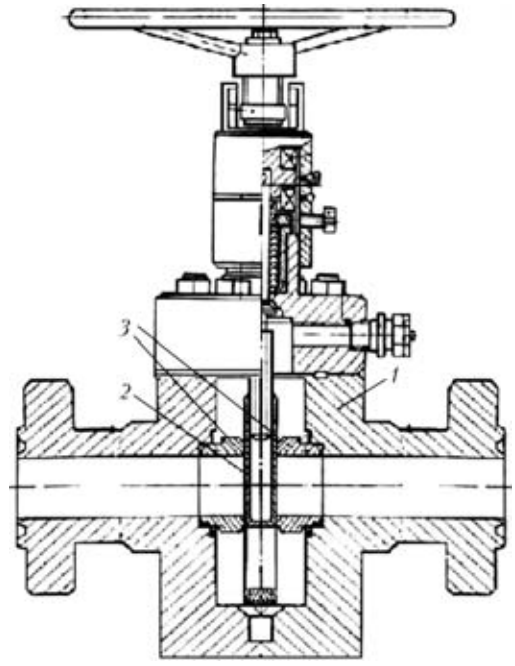


Рис. 1. Схема прямоточной задвижки фонтанной арматуры: *1* — корпус с фланцами; *2* — шибер; *3* — седла

© М. Л. Жадкевич, Е. Ф. Переплетчиков, Л. Г. Пузрин, А. В. Шевцов, М. Н. Яворский, 2007

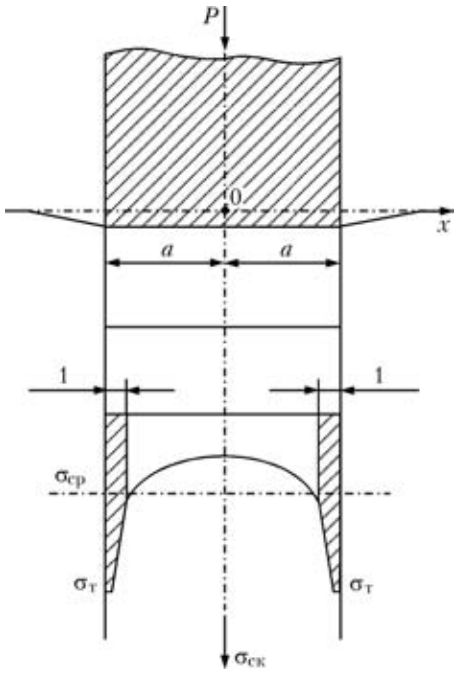


Рис. 2. Схема распределения напряжений сжатия под жестким штампом

возникает высокоскоростной турбулентный поток продукта, который вызывает эрозионный износ рабочих поверхностей.

Для задвижек ФА характерно длительное пребывание шибера в положении «открыто» или «закрыто». Как показывает опыт, при недостаточной коррозионной стойкости рабочих поверхностей шибер может «прикипать» к седлам в результате образования в отдельных местах общих продуктов коррозии, и задвижка становится неработоспособной.

Для сохранения качества обработки рабочие поверхности деталей запорного узла должны одновременно иметь высокую твердость и стойкость против коррозионного и эрозионного воздействия на них добываемого продукта. Выполнение этих требований достигается путем использования в запорных узлах задвижек композиционных деталей. Рабочие поверхности шибера и седел, изготовленных из стали, покрывают специальными сплавами с высокой твердостью и высокой стойкостью против коррозии и эрозии.

Наилучшее сочетание твердости, стойкости против задиров, коррозионной и эрозионной стойкости достигается при плазменно-порошковой наплавке поверхностей деталей запорного узла задвижек хромоникелевыми сплавами с углеродом, бором и кремнием [5, 6]. Технология плазменно-порошковой наплавки, разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона, с успехом используется при изготовлении деталей запорных узлов прямоточных задвижек ФА на давление 70 МПа [7].

Важной отличительной особенностью конструкции прямоточных задвижек ФА является то, что кромки проходных отверстий на рабочих поверхностях седел изготавливают острыми без фасок для снижения гидравлического сопротивления и уменьшения вероятности попадания между шибером и седлами твердых частиц из добываемого продукта. При закрытой задвижке напряжения, возникающие в месте контакта острой внутренней кромки седла с шибером, с некоторым приближением подобны напряжениям у острой кромки жесткого прессового штампа, прижатого к деформируемой детали (рис. 2). Удельное давление у острой кромки штампа (седла) в точке с координатой x описывается выражением [8]

$$q = P/\pi\sqrt{a^2 - x^2}, \qquad (1)$$

где P — погонная сила, действующая на штамп единичной толщины, Н/мм; a — половина ширины штампа, мм.

Согласно (1) удельное давление на краю штампа стремится к бесконечности при $x \to a$. Однако на практике значение этого давления может достигать лишь предела текучести материала детали при сжатии [8].

При наплавке слоев с высокой твердостью и соответственно с высоким пределом текучести при сжатии в зоне концентрации напряжений у острой кромки седла может возникать ситуация, при которой напряжения, достигающие основного металла шибера с заведомо более низким пределом текучести, вызовут в нем некоторую пластическую деформацию сжатия. В этом случае твердый слой покрытия может получить дополнительно деформацию изгиба и разрушиться ввиду его низкой пластичности. Этот процесс усугубляется тем, что при открытии и закрытии задвижки у острой внутренней кромки седла возникает перемещающаяся в шибере волна напряжений изгиба. Эти напряжения, возникающие у острой кромки седла, подобны напряжениям в упругом теле от силы, приложенной к его поверхности вдоль линии. Они имеют максимальное значение вблизи поверхности тела и уменьшаются в его глубинных слоях [8]. Поэтому предотвратить опасность разрушения слоя твердого покрытия можно путем увеличения его толщины до значения, при котором напряжения под покрытием станут ниже предела текучести при сжатии стальной основы шибера.

На основе этих соображений проведена приближенная оценка минимальной толщины наплавленного слоя, гарантирующего надежную работу деталей запорного узла задвижек ФА. Для расчета минимальной толщины покрытия, способного выдерживать напряжения у острой кромки седла, использовали зависимость напряжения сжатия внутри полубесконечного упругого тела на расстоянии δ от его поверхности от линейной нагрузки p_s, приходящейся на единицу длины, которая приложена к поверхности упругого тела [8]:

$$\sigma_s = 2p_s/\pi\delta, \quad (2)$$

где p_s — линейная нагрузка на шибер, Н/мм, приходящаяся на участок шириной 1 мм вдоль острой внутренней кромки седла, в пределах которой напряжения резко возрастают вплоть до предела текучести при сжатии материала покрытия; σ_s — напряжения, равные пределу текучести при сжатии стали под покрытием, МПа. Тогда δ окажется равным δ_{min}, т. е. минимальной толщине покрытия в миллиметрах, при которой напряжения в стали не превысят ее предела текучести при сжатии:

$$\delta_{min} = 2p_s/\pi\sigma_s. \quad (3)$$

Такой приблизительный расчет минимальной толщины покрытия правомочен в связи с тем, что модули упругости материала покрытия и стальной основы совпадают и составляют около $2{,}1\cdot10^5$ МПа [9]. Для приближенной оценки давления сжатия, приходящегося на крайний участок шириной 1 мм, было принято на нем среднее значение давления. На этом участке оно резко возрастает от приблизительно среднего удельного давления (частное от деления общего усилия сжатия деталей на всю площадь контактирующих поверхностей) до предела текучести при сжатии материала покрытия. Среднее удельное давление шибера на седло в задвижках с условным проходом Ду 80 составляет около 10 МПа при рабочем давлении 70 МПа. Предел текучести при сжатии хрупкого материала покрытия с высокой твердостью (*HB* 555) близок к его пределу прочности при растяжении, которое составляет примерно 1900 МПа [10, 11]. Тогда линейная нагрузка на шибер со стороны полосы шириной 1 мм вдоль острой внутренней кромки седла при изменении в ней напряжения сжатия от среднего до предела текучести при сжатии после умножения на ширину полосы, равной 1 мм, составляет

$$p_s = 110 + (1900 - 110)/2 \sim 1005 \text{ Н/мм}.$$

Пластичные стали, из которых изготавливают детали запорного узла, например, сталь 40Х, отличаются совпадающими по значению пределами текучести при растяжении и сжатии [10]. Значение предела текучести таких сталей при растяжении и соответственно сжатии определяли по значению их твердости по Бринеллю [12]:

$$\sigma_s = 0{,}367HB - 24 \text{ кгс/мм}^2. \quad (4)$$

Твердость стали 40Х в металле ЗТВ наплавки составляет *HB* 179 и в соответствии с (4) ее предел текучести равен примерно 420 МПа. Рассчитанная на основе этих данных в соответствии с (3) минимальная толщина δ_{min} хромоникелевого покрытия с углеродом, бором и кремнием на деталях запорного узла прямоточных задвижек ФА для работы при давлении до 70 МПа составляет примерно 1,5 мм.

Способность более толстых покрытий в отличие от тонких выдерживать без разрушения сосредоточенные нагрузки подтверждается измерением их твердости по методу Бринелля. Измеряли твердость наплавленных слоев толщиной 2,5 и 0,5 мм. Слой толщиной 0,5 мм получали путем механического удаления части слоя толщиной 2,5 мм. При этом влияние зоны перемешивания на свойства слоя металла наплавки толщиной 0,5 мм сводилось к минимуму.

Как показали наши исследования, при плазменно-порошковой наплавке указанными выше сплавами распределение легирующих элементов по толщине слоя равномерно и металл наплавки

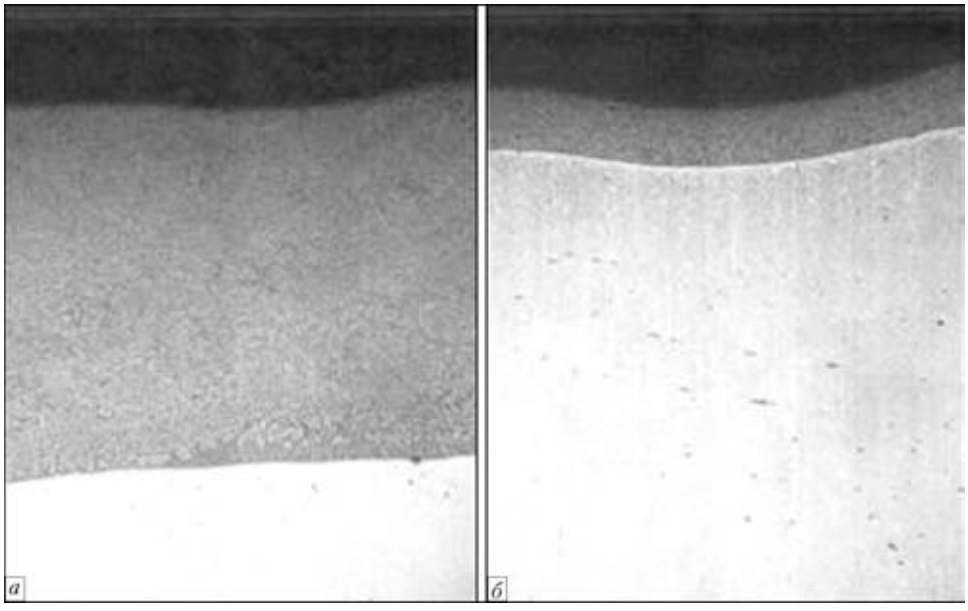


Рис. 3. Макроструктура (×30) покрытия под отпечатком при испытании твердости по Бринеллю при толщине покрытия 2,5 (*а*) и 0,5 (*б*) мм

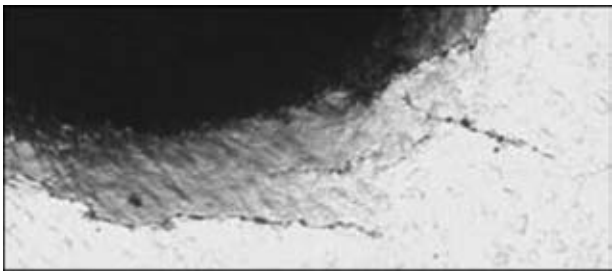


Рис. 4. Макроструктура покрытия (×30) толщиной 0,5 мм при испытании твердости по Бринеллю с трещиной у края отпе-

на расстоянии более 0,1 мм от линии сплавления имеет ту же структуру и твердость, что и по всему сечению наплавленного слоя. Поэтому измеренная по Роквеллу твердость слоев толщиной 2,5 и 0,5 мм была одинаковой и составляла *HRC* 47. При измерении твердости поверхности покрытия толщиной 2,5 мм стандартным методом Бринелля образовывались отпечатки диаметром 2,6 мм, что соответствует твердости *HB* 555, а деформации покрытия в этом случае не происходит (рис. 3, *а*). В тех же условиях при измерении твердости слоя толщиной 0,5 мм образуются отпечатки диаметром 3,45 мм. При этом тонкое покрытие испытывает прогиб (рис. 3, *б*), а вокруг отпечатков образуются кольцевые и радиальные трещины (рис. 4).

Плазменно-порошковая наплавка деталей запорных узлов задвижек ФА производится за один проход слоем толщиной около 3 мм. В готовых деталях наплавленный слой после тщательной обработки поверхности доводят до толщины 2 мм. Такая толщина твердого наплавленного слоя необходима в первую очередь для гарантированного обеспечения работы задвижки под высоким давлением без разрушения этого слоя. Кроме того, некоторый запас толщины по сравнению с расчетным обеспечивает возможность ремонта деталей запорных узлов задвижек путем перешлифовки их рабочих поверхностей.

Из приведенного выше следует, что в прямоточных задвижках ФА могут успешно применяться только покрытия достаточной толщины, имеющие высокую плотность и прочное сцепление с основным металлом. По этой причине тонкие покрытия, получаемые плазменным, вакуумным или детонационным напылением, не находят применения для деталей запорных узлов прямоточных задвижек ФА, что подтверждается многочисленными неудачными попытками использовать указанные методы на практике.

Высокая стойкость деталей запорного узла с плазменно-порошковой наплавкой рабочих поверхностей подтверждается многолетним положительным опытом эксплуатации задвижек производства фирмы «ИФ Элтерм» на газовых промыслах Украины.

Выводы

1. Плазменно-порошковая наплавка деталей запорных узлов прямоточных задвижек нефтегазовой ФА высокого давления хромоникелевыми сплавами с углеродом, бором и кремнием благодаря высокой твердости и стойкости против коррозионного и эрозионного износа рабочих поверхностей обеспечивает их высокую работоспособность и надежность.

2. Расчетом установлено, что для должной работы деталей запорных узлов задвижек ФА при давлении среды 70 МПа наплавленный слой из хромоникелевых сплавов с углеродом, бором и кремнием должен иметь толщину не менее 1,5 мм.

1. *Вайсберг Г. Л., Римчук Д. В.* Фонтанна безпека: Запитання. Відповіді. — Харків, 2002. — 474 с.
2. *Гульянц Г. М.* Противовыбросовое оборудование скважин, стойкое к сероводороду: Справ. пособие. — М.: Недра, 1991. — 348 с.
3. *Фонтанна* арматура на тиск до 70 МПа / В. І. Артемов, В. В. Канаков, Ю. В. Максимов та ін. // Нафтова і газова пром-сть. — 2001. — № 3. — С. 25–28.
4. *Гуревич Д. Ф., Шпаков О. Н.* Справочник конструктора трубопроводной арматуры. — Л.: Машиностроение, 1987. — 517 с.
5. *Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рабинович В. И.* Плазменная наплавка в энергетическом арматуростроении. — М.: НИИинфортяжмаш, 1970. — 36 с.
6. *Переплетчиков Е. Ф.* Плазменно-порошковая наплавка износо- и коррозионностойких сплавов в арматуростроении // Автомат. сварка. — 2004. — № 10. — С. 37–44.
7. *Производство* фонтанной арматуры для глубоких нефтяных и газовых скважин методами электрошлакового литья и плазменно-порошковой наплавки / В. Л. Шевцов, В. Я. Майданник, В. М. Ханенко и др. // Сварщик. — 2001. — № 4. — С. 8–9.
8. *Безухов Н. И.* Основы теории упругости, пластичности и ползучести. — М.: Высш. шк., 1968. — 420 с.
9. *Knotek O., Lugscheider E., Eschnaner H.* Hartlegirungen zum Verschleiss. — Duesseldorf: Schutz, 1975. — 285 S.
10. *Сопротивление* материалов деформированию и разрушению: Справ. пособие. Ч.1. / Под ред. В. Т. Трощенко. — Киев: Наук. думка, 1993. — 287 с.
11. *Tin Ming Wu.* Untersuchungen uber das Auftragsschweiben von gesenken fur schiedestucke aus stahl forschuhgsberichte des landes nodheih. — Westfalen, 1964. — № 1349. — 46 S.
12. *Марковец М. П.* Определение механических свойств металлов по твердости. — М.: Машиностроение, 1979. — 191 с.

Performance of parts of high-pressure stop valves of Cristmas tree is ensured by deposition on its working surfaces of nickel-chromium alloys with carbon, boron and silicon by plasma-powder surfacing. It is shown that for a reliable operation of these stop valves, the layer of deposited metal should have a guaranteed thickness. It is established that for operation at up to 70 MPa pressure, minimum thickness of the deposited layer should be equal to 1.5 mm, and allowing for the possible repeated grinding — up to 2.0 mm.

Поступила в редакцию 28.07.2006

УДК 621.791.793:658.562

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭШС

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

Описана компьютерная система сбора, обработки, отображения и хранения информации о технологических параметрах процесса ЭШС.

Ключевые слова: электрошлаковая сварка, контроль параметров, компьютерная система, автоматизация исследований

Система предназначена для сбора, отображения, записи и обработки технологических параметров сварки, а также формирования протокола процесса электрошлаковой сварки (ЭШС) и используется для автоматизации исследований этого процесса в лабораторных условиях, при этом легко адаптируется к производственным условиям.

Функциональная схема указанной системы приведена на рис. 1. Сварочные аппараты последнего поколения, например АД-381, имеют раздельные приводы *3* и независимые сварочные источники *1* для каждого электрода (рис. 1). В соответствии с этим контролируются следующие параметры режима процесса сварки: ток первого I_1 и второго I_2 электродов; напряжение на первом U_1 и втором U_2 электродах; скорость подачи первого v_1 и второго v_2 электродов; скорость перемещения тележки (скорость сварки) $v_{св}$ и ее положение $L_{тел}$.

Измеряемые параметры во время сварки отображаются в цифровом виде и в виде осциллограмм в реальном масштабе времени (рис. 2, *а*). Одновременно они записываются в бинарный файл на твердый диск компьютера. Электрические параметры процесса ЭШС, а тем более скорость подачи электродов и скорость сварки изменяются относительно медленно. Только в редких случаях, например, при изучении процесса переноса капель расплавленного металла при плавлении электро-

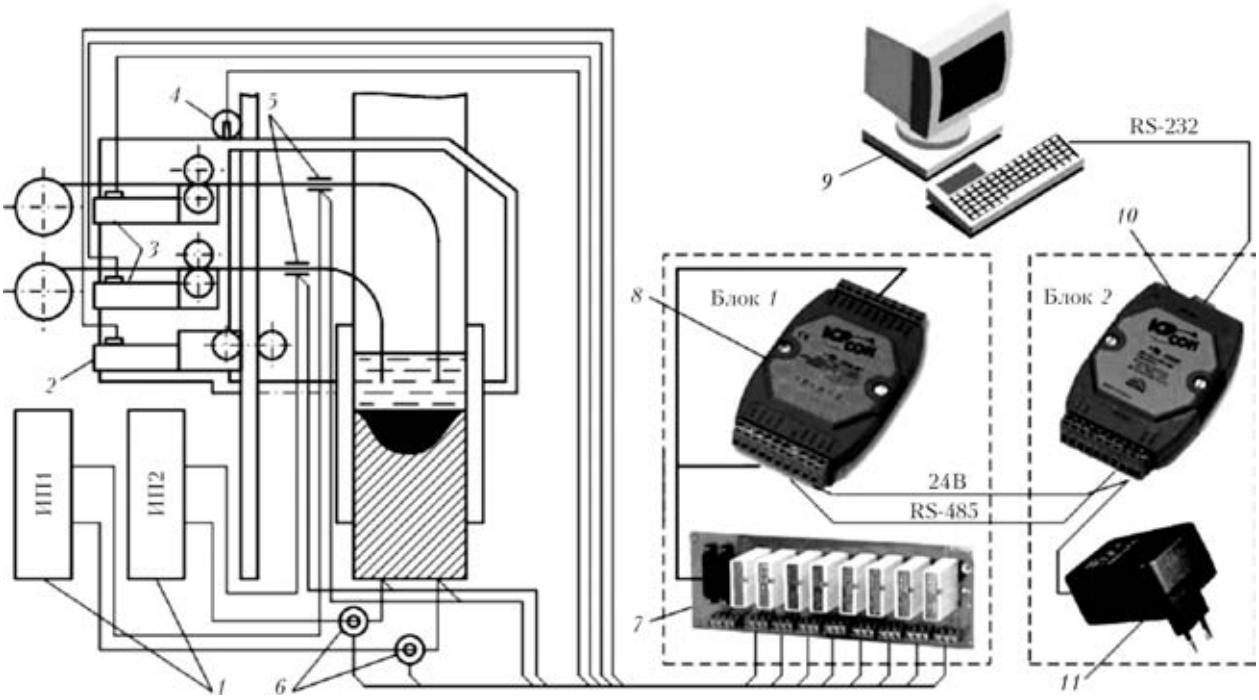


Рис. 1. Функциональная схема системы сбора информации: *1* — сварочные источники питания; *2* — двигатель тележки; *3* — двигатели (приводы) подачи электродной проволоки; *4* — датчик перемещения тележки; *5* — токоподводы; *6* — датчики сварочного тока; *7* — нормализаторы сигналов датчиков; *8* — модуль аналого-цифрового преобразователя (АЦП); *9* — компьютер; *10* — модуль преобразователя интерфейсов; *11* — блок питания

© Ю. Н. Ланкин, 2007

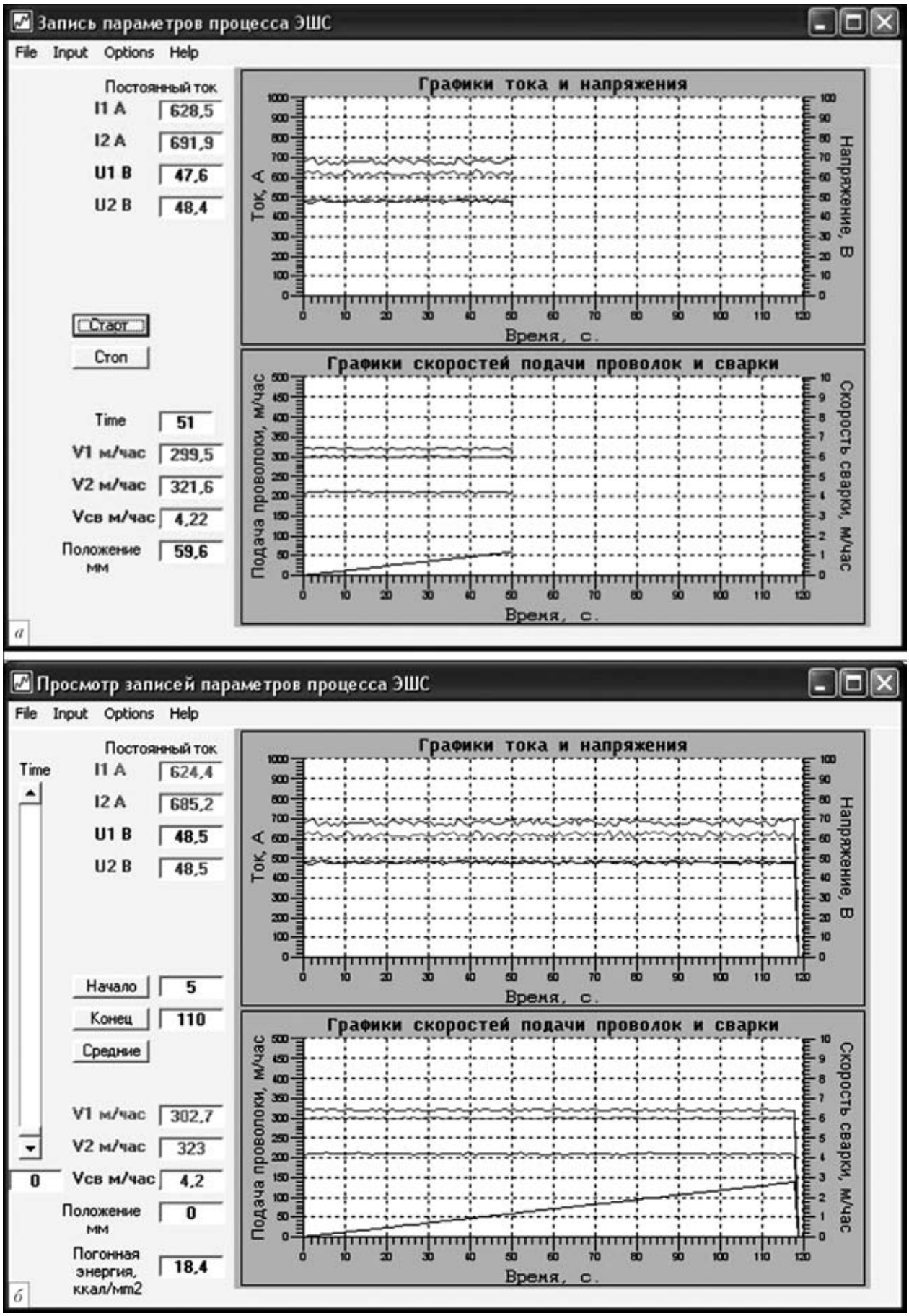


Рис. 2. Экраны управления и отображения информации в режиме записи измеряемых параметров ЭШС во время сварки (*а*) и просмотра файлов записанных параметров ЭШС (*б*)

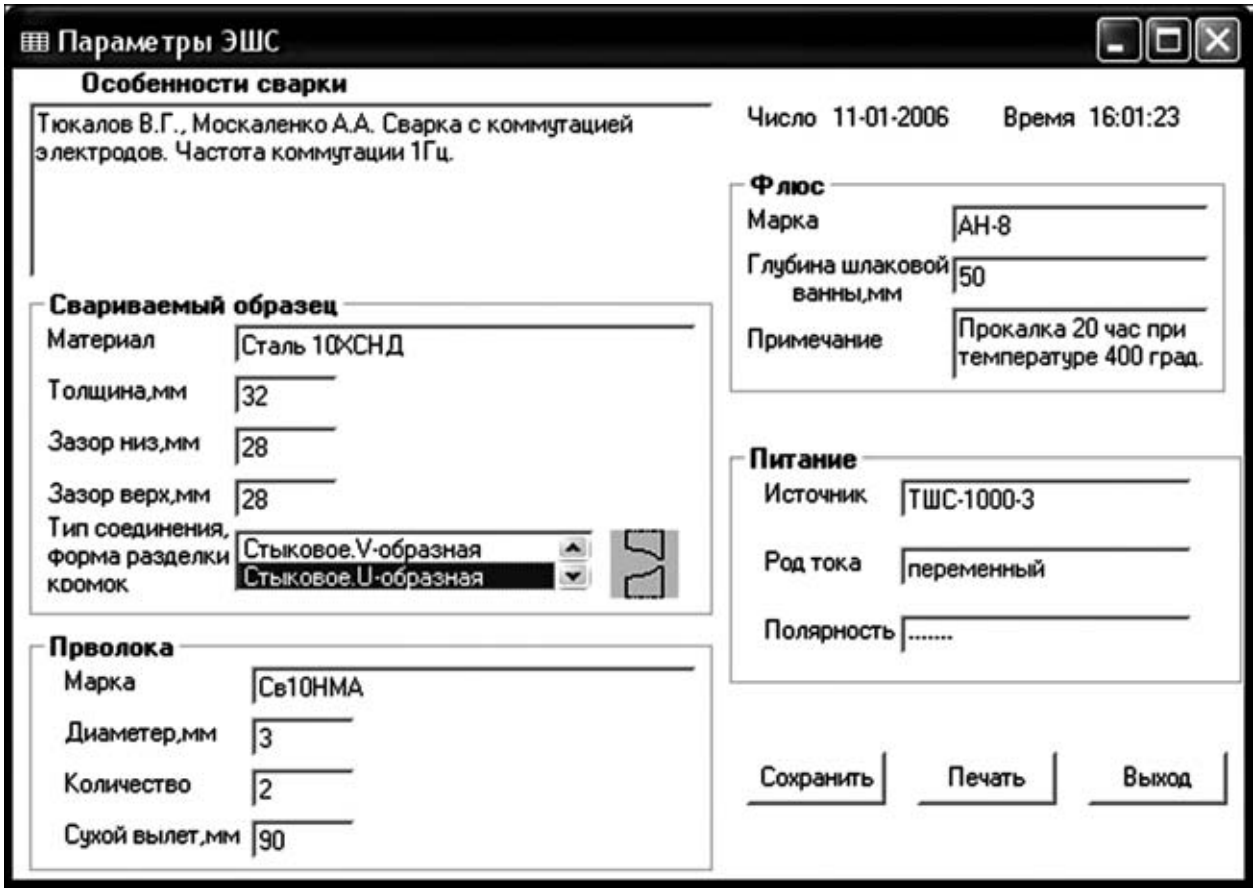


Рис. 3. Экран ввода исходных параметров сварки

дов, исследуется частотная составляющая тока (напряжения) более 10 Гц. В большинстве случаев достаточно, чтобы период измерений составлял не более 1 Гц, что и реализуется в данной системе.

В качестве преобразователя аналоговых сигналов в цифровую форму использован восьмиканальный модуль аналогового ввода I-7017 фирмы ICP DAS (Тайвань) с шестнадцатиканальным АЦП (см. рис. 1, позиция *8*). Для уменьшения электромагнитных наводок на измерительные провода этот модуль в составе блока *1* располагается вблизи датчиков сварочного тока *6* с самыми низкими значениями выходного напряжения. При сварке на постоянном токе таковым обычно является шунт для измерения тока. Это позволяет обойтись без дополнительных усилителей, установив входной диапазон модуля +/–150 мВ. Сигналы датчиков контролируемых параметров поступают на входы модуля I-7017 через нормализаторы сигналов (см. рис. 1, позиция *7*). В нашем случае это просто делители напряжения и простейшие RC-фильтры с постоянной времени, равной 1 с. Для измерения скорости вращения двигателей используются напряжения тахометрических мостиков. Положение тележки определяется с помощью потенциометрического датчика (рис. 1, позиция *4*).

Измерительный модуль I-7017 связан двумя витыми парами с модулем I-7520 (см. рис. 10, позиция *10*)— два провода питания и два провода последовательного интерфейса RS-485. Модуль I-7520 и источник питания *11* обоих модулей находятся в блоке *2*, расположенном вблизи ЭВМ *9*. Модуль I-7520 служит для преобразования промышленного последовательного интерфейса RS-485 в обычный для ЭВМ интерфейс RS-232, длина кабеля которого не должна превышать нескольких метров. В свою очередь интерфейс RS-485 обеспечивает устойчивую связь со скоростью передачи до 115,2 кбод на расстояние до 1,2 км. Этого более чем достаточно для использования системы не только в лабораторных, но и в производственных условиях. Для связи модуля АЦП 1-7017 с ЭВМ можно обойтись вообще без проводов, что иногда необходимо, например, при монтажной сварке. Для этого модуль преобразования интерфейса I-7520 заменяется радиомодемом типа SST-900EXT произ- водства той же фирмы, имеющем дальность связи до 800 м. Однако при этом стоимость системы увеличивается в 2 раза.

Для записи данных эксперимента в файл выбирается опция «New» из меню «File» (рис. 2, *а*). В открывшейся диалоговой панели в имя файла для его идентификации автоматически записывается текущее число. При желании имя файла можно изменить на любое другое вручную. Начало записи осуществляется кнопкой «Пуск».

Протокол

Число 11-01-2006 Время 16:01:23
Тюкалов В.Г., Москаленко А.А. Сварка с коммутацией электродов. Частота коммутации 1Гц

Свариваемый образец
Материал: Сталь 10ХСНД
Толщина 32 мм
Зазор низ 28 мм
Зазор верх 28 мм
Тип соединения и форма разделки кромок: Стыковое.U-образная

Проволока
Марка: Св10НМА
Диаметр 3 мм
Количество 2
Сухой вылет 90 мм

Флюс
Марка: АН-8
Глубина шлаковой ванны 50 мм
Прокалка 20 час при температуре 400 град.

Питание
Источник: ТШС-1000-3
Род тока: переменный
Полярность ——

Параметры сварки, усредненные при сварке шва с 5,8 по 128,4 мм
Начало сварки данного отрезка шва 5сек., конец - 110сек.

Ток электрода №1	624,4 А
Ток электрода №2	685,2 А
Напряжение на электроде №1	48,5 В
Напряжение на электроде №2	48,5 В
Скорость подачи 1-ой проволоки	302,7 м/час
Скорость подачи 2-ой проволоки	323 м/час
Скорость сварки	4,2 м/час
Удельная погонная энергия	18,4 ккал/см2

Рис. 4. Протокол процесса сварки

Результаты любого эксперимента, записанные в файл данных, можно просмотреть, загрузив его с помощью команды «File Open» из меню «File». На экран ЭВМ автоматически выводятся все графики (рис. 2, *б*). Используя полосу прокрутки «Time», выбирают любое измерение. При этом цифровые значения всех параметров отображаются на экране. С помощью кнопок «Начало» и «Конец» можно назначить любое выбранное измерение, как начало или конец интервала усреднения параметров процесса ЭШС. При нажатии кнопки «Средние» подсчитываются и выводятся на экран средние значения параметров ЭШС в выбранном интервале, кроме того, подсчитывается и отображается удельная погонная энергия сварки по формуле

$$W_{\text{пог}} = \frac{0{,}24(U_{1\,\text{ср}} I_{1\,\text{ср}} + U_{2\,\text{ср}} I_{2\,\text{ср}})\eta}{v_{\text{св}} S},$$

где η — коэффициент полезного действия ЭШС, зависящий от толщины S свариваемого металла*. Все эти данные автоматически записываются в файл протокола процесса сварки. Естественно, если для одного эксперимента определяются средние значения параметров процесса ЭШС на разных интервалах усреднения, то устанавливаемое автоматически имя файла протокола необходимо корректировать вручную.

Из меню «Input» вызывается окно ввода параметров ЭШС (рис. 3). В соответствующие текстовые окна с клавиатуры вводятся параметры процесса ЭШС, комментарии и примечания. Используя полосу прокрутки, в окне списка выбирается тип соединения и форма разделки. Справа от окна списка разделки появляется графическое изображение стыка с разделкой (рис. 3). С помощью опции «Сохранить» в меню «File» (рис. 2, *б*) внесенные данные записываются в файл протокола, имя которого задается автоматически и совпадает с именем файла данных, отличаясь при этом только расширением. При нажатии опции «Печать» печатается протокол (рис. 4).

В меню «Options» выбирается род тока источников питания ЭШС. Вывод графиков на принтер осуществляется выбором «Print UI» или «Print V» из меню «File» в окнах «Запись параметров ЭШС» и «Просмотр параметров ЭШС».

The computer system for acquisition, processing, display and storage of information on technical parameters of the ESW process is described.

Поступила в редакцию 03.11.2006

* *Yushchenko K. A., Lychko I. I., Sushchuk-Slyusarenko I. I.* Effective techniques of electroslag welding and prospects for their application in welding production. — Vol. 12, Pt. 2. — Kyiv: E. O. Paton Electric Welding Institute, 1999. — 108 p. — (Welding and surfacing reviews).

УДК 621.791(088.8)

ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

Устройство для наплавки изношенной поверхности деталей, имеющих форму тел вращения, отличающееся тем, что привод вращения смонтирован на станине с возможностью попеременной установки соответственно в одном из двух положений: для наплавки деталей большего и меньшего диаметров, устройство снабжено закрепленными в станине дополнительными подшипниками скольжения, расположение которых соответствует положениям привода, горизонтальная штанга выполнена съемной с возможностью переустановки в соответствующее положение привода, а расстояние между положениями оси вала привода соответствует разности радиусов наплавляемых деталей большего и меньшего диаметров. Патент РФ 2291035. И. М. Ивочкин, А. М. Потапов, Н. И. Леванов, О. И. Стеклов (ОАО «Горнопромышленная финансовая компания») [1].

Способ электродуговой сварки неподвижным плавящимся пластинчатым электродом, отличающийся тем, что воздействуют на электрическую дугу периодически изменяющимся знакопеременным поперечным магнитным полем, направленным перпендикулярно к обращенным к свариваемым металлическим изделиям поверхностям плавящегося пластинчатого электрода с частотой, соответствующей требуемой частоте возвратно-поступательного перемещения электрической дуги по фронту оплавления пластинчатого электрода, путем противофазной модуляции с упомянутой выше частотой электрического тока, протекающего через каждое металлическое изделие. Патент РФ 2291036. В. О. Бушма, Д. В. Калашников [1].

Устройство для контактно-стыковой сварки трубы с заглушкой, представляющее собой электрод в виде цангового зажима с центральным отверстием, имеющий токоподводящую поверхность и поверхность для передачи сварочного усилия, отличающееся тем, что поверхность электрода для токоподвода и поверхность для передачи сварочного усилия разделены и находятся под углом друг к другу, при этом токоподводящая поверхность расположена параллельно оси центрального отверстия. Патент РФ 2291037. А. А. Кислицкий (ОАО «Новосибирский завод химконцентратов») [1].

Способ герметизации люка-лаза бака жидкостной ампулизированной ракеты при проведении внутрибаковых работ, характеризующийся тем, что на внутренней поверхности оболочки в районе размещения люка-лаза устанавливают подкрепляющие элементы жесткости и вырезают люк-лаз заданного размера вместе с элементами жесткости, а после выполнения внутрибаковых работ на место вырезанной части элементов жесткости приваривают вкладыши, устанавливают на них крышку люка-лаза и производят ее вварку герметичным швом. Патент РФ 2291038. А. Г. Двуреченский, В. П. Корнеев (ФГУП «Государственный ракетный центр «КБ им. акад. В. П. Макеева») [1].

Активирующий флюс для электродуговой сварки, отличающийся тем, что флюс содержит дополнительно группу галогенидных солей магния, а компоненты взяты в следующем соотношении, мас. %: 20…30 гексафторалюмината лития; 20…30 диоксида титана; 10…30 оксида алюминия; 10…20 хлорида магния; 10…20 бромида магния; 10…20 йодида магния. Патент РФ 2291039. С. Г. Паршин, С. С. Паршин [1].

Устройство для вырезки отверстий, отличающееся тем, что устройство снабжено втулкой, а резак — емкостным датчиком слежения с блоком управления для регулирования высоты резака, при этом резак выполнен с возможностью поворота, а штанга выполнена Г-образной, горизонтальное звено которой закреплено во втулке, связанной с головкой, с возможностью перемещения, а на вертикальном звене которой с возможностью перемещения установлена каретка, причем емкостный датчик слежения выполнен в виде коаксиально расположенного на резаке кольца, а его блок управления размещен на кронштейне параллельно головке и связан с приводом вращения и приводом вертикального перемещения Г-образной штанги. Патент РФ 2291768. Г. М. Буласов, Ю. А. Тетенев, В. А. Панов и др. (ОАО ВНИИПГХимнефтеаппаратура) [2].

Способ контактно-стыковой сварки трубы с заглушкой, отличающийся тем, что используют заглушку, наружный участок которой состоит из частей, одну из которых, прилегающую к свариваемому в стенку трубы участку, выполняют диаметром больше диаметра указанного участка, но меньше диаметра отверстия в сварочной оснастке, при этом в процессе сварки часть наружного участка заглушки, прилегающую к свариваемому в стенку трубы участку, по крайней мере, частично вводят в отверстие сварочной оснастки с образованием кольцевого зазора между указанной частью наружного участка и торцом трубы, который заполняют наружным гратом. Патент РФ 2291769. А. А. Кислицкий (ОАО «Новосибирский завод химконцентратов») [2].

Способ изготовления металлических тонколистовых сварных конструкций, отличающийся тем, что листы предварительно равномерно нагревают по всей площади до температуры, определяемой по формуле $T = (\varepsilon_s/\alpha) \pm 10\ ^{o}C$, где T — температура нагрева; ε_s — относительная деформация металла листов, соответствующая пределу текучести; α — коэффициент линейного расширения металла листов, при этом для предотвращения сжатия листов их закрепляют на сборочном стенде или к смежным конструкциям, а после остывания листов производят сборку и сварку. Патент РФ 2291770. В. С. Михайлов, В. М. Левшаков, К. Д. Могилко (ФГУП «ЦНИИТС») [2].

Способ производства высокопрочных многослоойных металлических труб с прослойками из легкоплавких металлов, отличающийся тем, что сварку биметаллических полос между собой и с наружным и внутренним защитным слоем в готовые обечайки труб при температуре плавления легкоплавкого металла осуществляют за пять оборотов форматного барабана, а соединение обечаек в трубу осуществляют внутренней и наружной кольцевой сваркой с последующей окончательной стыковкой посредством приварки стальных кольцевых элементов с наружной поверхности обечаек и стыковой сварки стальными электродами и наплавлением на сварной шов легкоплавкого металла. Патент РФ 2291771. В. С. Юркин [2].

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

Гибкий металлорукав, отличающийся тем, что он снабжен разрезным кольцом, установленным внутри первой от стыкуемого конца впадины гофра сильфона, при этом стыкуемый прямолинейный участок гофра сильфона зажат между кольцом и торцовой поверхностью штуцера, а сильфон и штуцер соединены сварным швом, выполненным на боковой поверхности штуцера и кольца вдоль кромки зажатого участка сильфона. Патент РФ 2291772. Б. М. Долгин, А. Б. Долгин [2].

Способ плазменной сварки алюминиевых сплавов, при котором возбуждают дежурную дугу между катодом и соплом-анодом и основную дугу постоянного тока обратной полярности между деталью и соплом-анодом с образованием общего анодного пятна, а через канал сопла-анода подают плазмообразующий газ, отличающийся тем, что анодное пятно располагают на внутренней кромке канала сопла-анода путем подачи на дежурную и основную дугу токов в соотношении $I_д/I_0$ = 0,4…3,2. Патент РФ 2292256. В. В. Овчинников, В. В. Алексеев [3].

Резак машинный для резки труб, отличающийся тем, что ствол, состоящий из корпуса, головки и трех трубок, посредством которых сообщены выходы корпуса и входы головки, выполнен изогнутым с углом изгиба между осями корпуса и головки ствола не менее 120…150°, а средство для крепления резака к тележке выполнено в виде поворотного кольца с фиксатором и оси с лимбом, при этом поворотное кольцо соосно расположено на головке ствола и скреплено с головкой фиксатором, а ось лимба жестко связана с поворотным кольцом и расположена перпендикулярно оси кольца для поворотов головки в плоскости, перпендикулярной оси лимба, причем корпус лимба кинематически связан с платформой тележки. Патент РФ 2292998. А. К. Никитин, А. Г. Корниенко (ООО «СКТБ АВТОГЕНТЕХМАШ») [4].

Устройство для газоструйной резки материалов, отличающееся тем, что камера сгорания выполнена с поперечным сечением в виде вытянутого овала, а устройство имеет смесительную головку с двумя смесительными элементами, установленными на смесительной головке по длинной оси овала симметрично относительно оси камеры сгорания и выполненными каждый в виде генератора Гартмана, состоящего из корпуса с соплом для подачи одного из компонентов, стержня с каналом для подачи другого компонента, выполняющим функции форсунки, и резонатора, закрепленного соосно на конце стержня напротив сопла генератора. Патент РФ 2292999. В. К. Конищев, И. Н. Лебедев (ГП НИИмашиностроения) [4].

Установка электродуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа (GMAW-сварка), включающая быстродействующий импульсный источник электропитания с контроллером для осуществления первого процесса сварки с использованием первой формы сигнала тока или второго процесса сварки с использованием второй формы сигнала тока в промежутке между свариваемой деталью и сварочной проволокой, продвигаемой по направлению к свариваемой детали и схему для переключения между первым и вторым процессами сварки, причем эта схема содержит счетчик для подсчета сигналов в первом и втором процессах сварки и схему для переключения с осуществляемого процесса сварки на другой процесс сварки в тот момент, когда подсчитанное число сигналов осуществляемого процесса сварки достигает предварительно выбранного числа для такого процесса сварки, при этом первый процесс сварки представляет собой процесс сварки с переносом металла за счет сил поверхностного натяжения (STT-сварка) или процесс сварки при постоянном напряжении (CV-сварка) со струйным переносом. Патент РФ 2293000. К. Хсу (Линкольн Глобал, Инс, США) [4].

Способ многодуговой сварки под флюсом труб большого диаметра, отличающийся тем, что в начале сварки поочередно включают сварочные дуги на расстоянии от начала трубы, обеспечивающем идентичность начальной части шва по глубине провара, ширине и форме указанным параметрам шва в зоне сварки на установившемся режиме, а отключают сварочные дуги на расстоянии от конца трубы, обеспечивающем хорошее качество концевой части шва без образования кратерной части, при этом включают и отключают сварочные дуги при плавном регулировании их мощности и скорости подачи электродной проволоки, причем значения мощности сварочных дуг и скорости подачи электродной проволоки устанавливают производными от скорости движения трубы, а по всей длине шва удельную погонную энергию сварки поддерживают на постоянном уровне. Патент РФ 2293001. И. А. Романцов, Б. М. Самохвалов, Ю. Л. Мыльников и др. (ОАО «Челябинский трубопрокатный завод») [4].

Устройство для ручной электродуговой сварки и наплавки, отличающееся тем, что оно содержит токопроводящий с наружным электроизоляционным слоем алюминиевый стержень-удлинитель, через который сварочный электрод присоединяется к электрододержателю, и имеющий длину, равную или превосходящую глубину полости, в которой выполняется сварка. Патент РФ 2293002. И. В. Боровушкин [4].

Заглушка тепловыделяющего элемента ядерного реактора, отличающаяся тем, что диаметр концевика заглушки, по крайней мере, не меньше диаметра оболочки твела, а между вваривaемым участком и поверхностью для подвода сварочного тока расположена кольцевая проточка, торцевая поверхность которой пересекается с поверхностью вваривaемого участка, а величина ее диаметра находится между диаметральными размерами соседних с ней участков заглушки. Патент РФ 2293003. А. А. Кислицкий, М. В. Полозов, В. В. Агишев, А. М. Лузин (ОАО «Новосибирский завод химконцентратов») [4].

Способ получения композиционного материала титан–сталь, включающий составление пакета из чередующихся слоев титана и стали, размещение над ним заряда взрывчатого вещества, осуществление сварки взрывом, горячую прокатку и отжиг сваренной заготовки. Приведены отличительные признаки. Патент РФ 2293004. Ю. П. Трыков, В. Г. Шморгун, Л. М. Гуревич и др. (Волгоградский ГТУ) [4].

Установка для лазерной обработки, отличающаяся тем, что технологический лазер, лазерная головка и световой шарнир выполнены в виде единого лазерного блока, который установлен на каретке привода вертикального перемещения, установленного на каретке стационарного привода горизонтального перемещения, при этом привод углового поворота светового шарнира установлен на корпусе лазерного блока, а внутренние полости светового шарнира и лазерной головки соединены с системой подачи очищенного воздуха. Патент РФ 2293005. А. Л. Мальцев, Т. В. Веселова, В. В. Балашов, А. А. Дмитриев (ОАО «НИИШИНМАШ») [4].

Способ резки материалов, отличающийся тем, что расплавление материала производят излучением основного лазера, а удаление расплавленного материала из зоны резки производят излучением работающего в импульсно-периодическом режиме вспомогательного лазера, средняя мощность которого более чем на порядок ниже средней мощности излучения основного лазера, плотность мощности достаточна для вскипания расплавленного материала в пятне фокусировки, а диаметр луча в месте реза меньше диаметра луча основного лазера в месте реза. Патент РФ 2293006. С. В. Дробязко, Ю. М. Сенаторов [4].

УДК 621.791:061.21.4

В МЕЖДУНАРОДНОМ ИНСТИТУТЕ СВАРКИ: ГАРМОНИЗИРОВАННАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПЕРСОНАЛА СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

С 15 по 17 января 2007 г. в штаб-квартире Международного института сварки (МИС), которая находиться в Институте сварки Франции под Парижем в г. Вилепент, состоялось рабочее заседание Международного органа по аккредитации (МОА), подразделения МИС созданного в 1998 г. Основной задачей МОА является обеспечение внедрения в странах-членах МИС гармонизированной системы подготовки и аттестации специалистов сварочного производства. МОА разрабатывает руководящие документы для учебных программ и экзаменов, а также внедряет систему обеспечения качества, которая контролирует эту систему. В каждой стране за внедрение и контроль функционирования этой системы отвечает Уполномоченный национальный орган (УНО).

В настоящее время в систему вошло 33 страны: Австралия, Австрия, Англия, Бельгия, Болгария, Бразилия, Венгрия, Дания, Германия, Голландия, Индия, Иран, Испания, Италия, Канада, Китай, Норвегия, Польша, Португалия, Россия, Румыния, Словакия, Словения, Таиланд, Украина, Финляндия, Франция, Хорватия, Чехия, Швейцария, Швеция, Южная Африка и Япония. Еще несколько стран получили предварительную аккредитацию или подали заявку на присоединение к данной международной системе обучения персонала сварочного производства.

Украина представлена в МИС Институтом электросварки им. Е. О. Патона, а аккредитованным УНО является Межотраслевой учебно-аттестационный центр ИЭС им. Е. О. Патона.

В работе январского заседания МОА приняло участие более 45 делегатов, представляющих страны-члены МИС, присоединившиеся к данной международной гармонизированной системе обучения персонала сварочного производства.

К настоящему времени МОА разработал семь руководящих документов по обучению и аттестации: Международного инженера (IWE), технолога (IWT), специалиста (IWS), практика (IWP), инспектора по сварке (IWIP), Международного сварщика (IW), а также Международного проектировщика сварных конструкций (IWD).

После завершения разработки первых шести из указанных выше квалификаций стало возможным создание всеобъемлющей квалификационной схемы персонала сварочного производства, которая находится в полном соответствии с требованиями международного стандарта ISO 3834 «Требования к качеству сварки. Сварка плавлением металлических материалов» версии 2005 года (в Украине этот стандарт издан под кодом ДСТУ ISO 3834). Эта схема представлена на рисунке.

Следующей важной задачей, к которой приступает МОА, является создание единой для всех стран-членов МИС гармонизированной системы сертификации (аттестации) персонала сварочного производства от сварщика до инженера аналогичной разработанной в Европейской сварочной федерации.

Предлагается также разработать систему обязательного повышения квалификации указанных выше уровней персонала сварочного производства на основе 1-2-х недельных курсов, которые должны проводиться раз в 2…3 года.

В. Е. Пономарев, канд. техн. наук

УДК 621.791:061.21.4

5-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ КАПИЛЛЯРНОСТЬ — 2007»

С 21 по 24 марта 2007 г. в Аликанте (Испания) проходила 5-я Международная конференция по высокотемпературной капиллярности (HTC-2007), организованная университетом г. Аликанте. В работе конференции приняли участие около 120 специалистов из разных стран мира: Болгарии, Венгрии, Германии, Греции, Испании, Италии, Израиля, Китая, Кореи, Польши, России, США, Украины, Франции, Швейцарии, Японии и др. На конференции был представлен 121 доклад, на пленарных заседаниях заслушано 48 устных и обсуждено 73 стендовых доклада.

Украина на конференции была представлена сотрудниками Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича, Института электросварки им. Е. О. Патона, Института сверхтвердых материалов им. В. М. Бакуля, Института металлофизики им. Г. В. Курдюмова. Наибольшее количество докладов было подготовлено членами научного комитета конференции, от Украины было представлено 12 док-

ладов, из них 7 докладов от Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича.

На конференции обсуждались наиболее интересные и важные результаты исследований в области смачивания, адгезии и контактного взаимодействия различных материалов с высокотемпературными жидкими средами: металл–металл, металл–керамика, керамика–керамика, металл–стекло, металл–углеродные материалы, а также результаты практического применения их при получении неразъемных соединений с помощью пайки.

Доклады были представлены на трех секциях, которые работали последовательно. На первой были рассмотрены оригинальные исследования по смачиванию твердых фаз различной физико-химической природы жидкими металлами и сплавами. Вторая секция была посвящена вопросам изучения поверхностного натяжения и контактного взаимодействия на границе раздела фаз, влияния на процессы контактного взаимодействия температуры, среды, микрорельефа поверхности твердого тела, эффекта Марангони. Ряд докладов был посвящен теоретическим основам смачивания, вопросам фазовых равновесий на границах раздела, моделированию процессов, протекающих на границах зерен материалов в наноструктурном состоянии.

На третьей секции были представлены доклады по материалам и процессам, которые демонстрировали практическое значение и применение результатов поверхностных явлений при получении неразъемных соединений различными путями, в том числе с помощью пайки материалов (металлов, керамики, алмазов) в одно- и разнородном сочетании, при спекании и выращивании монокристаллов полупроводниковых материалов. В частности, Ульрихом Клотцом (Швейцарский федеральный институт исследований и испытаний материалов, г. Дюбендорф) был представлен доклад по активной пайке алмазов с металлической матрицей с помощью припоев на основе серебра и меди, содержащих такой адгезионно-активный элемент, как титан, что обеспечило хорошее смачивание паяемого материала и необходимые свойства паяным соединениям. Интересные результаты получены при изучении границы раздела между алмазом и активным припоем. Исследования выполнены с помощью высокоразрешающей аппаратуры и наглядно показывают морфологические особенности формирования паяных швов на наноразмерном уровне. Авторам удалось установить наличие тонкого (шириной 50…100 нм) интерметаллического слоя TiC на границе раздела алмаз–припой, а также показать кристаллизацию наночастиц TiC в паяном шве.

Внимание участников конференции привлек доклад проф. Н. Собчак (Институт литья, г. Краков, Польша) об экспериментальном комплексе для исследования явлений высокотемпературной капиллярности. Дискуссию вызвал доклад о влиянии эффекта Марангони на глубину проплавления при дуговой сварке неплавящимся электродом, представленный д-ром Фуджи (Университет г. Осака, Япония). О научных результатах, полученных при исследовании контактного взаимодействия твердых материалов с жидкими сплавами, формировании структуры на границе раздела соединяемых материалов, доложили украинские специалисты, что вызвало большой интерес и активное обсуждение.

Следует отметить высокий научно-технический уровень представленных материалов, презентаций и стендовых докладов в целом, а также высокий уровень организации и проведения конференции. Участники конференции отметили ее актуальность и полезность для установления контактов и обмена научным опытом между специалистами из различных уголков мира и наметили перспективы дальнейшего научного сотрудничества.

С. В. Максимова, канд. техн. наук

В. С. ПОПОВУ — 80

В мае 2007 г. исполняется 80 лет профессору, доктору технических наук, академику Академии инженерных наук Украины, заслуженному деятелю науки и техники Украины, заведующему кафедрой оборудования и технологии сварочного производства Запорожского национального технического университета Вениамину Степановичу Попову.

После окончания в 1948 г. Челябинского механико-машиностроительного института В. С. Попов работал в Орске на «Южуралмашзаводе». В 1951–1956 гг. учился в аспирантуре Центрального научно-исследовательского института технологии машиностроения (Москва) и успешно защитил кандидатскую диссертацию. С 1956 г. работает в Запорожском машиностроительном институте (ныне Запорожский национальный технический университет). В 1964 г. основал кафедру оборудования и технологии сварочного производства. Многие годы В. С. Попов руководит научными исследованиями, проводимыми на кафедре, в области трибоматериаловедения и износостойкости материалов. В 1975 г. защитил докторскую диссертацию. Им выполнены теоретические исследования по изучению механизма разрушения металлов при абразивном изнашивании и высоких удельных давлениях, повышению уровня износостойкости деталей машин и разработке наплавочных материалов. Под его руководством подготовлены и защищены одна докторская и более 30 кандидатских диссертаций. В. С. Попов — автор более 200 печатных работ, в том числе 42 авторских свидетельств, 6 монографий и учебных пособий.

В период с 1978 по 1993 гг. Вениамин Степанович Попов работал ректором института. В этот период проводил работу по организации и становлению высшего образования в Украине, дважды избирался депутатом Верховного Совета УССР. За плодотворный труд В. С. Попов награжден Орденом Дружбы народов, Почетной грамотой Верховного Совета Украины, нагрудными знаками «Петро Могила», «Відмінник освіти України» и «За бездоганну працю» I ступеня.

Коллектив Запорожского национального технического университета, Института электросварки им. Е. О. Патона, редакция и редколлегия журнала «Автоматическая сварка» сердечно поздравляют юбиляра, желают ему крепкого здоровья, благополучия и счастливых лет жизни.

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, ISBM 966-95847-8-7, 100 грн./660 руб./50$.

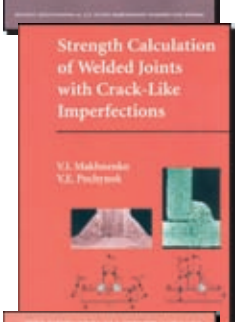
В сборнике представлены доклады Объединенной Шестнадцатой международной конференции «Компьютерные технологии в сварке и промышленности», проводимой Британским институтом сварки, и Третьей международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», проводимой Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Авторами докладов являются известные специалисты из различных стран мира. Для научных и инженерно-технических работников.

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

До збірника ввійшли статті, які підготовлені за результатами цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин», отриманими впродовж 2004-2006 рр., до реалізації якої було залучено 22 інститути НАН України. Мета програми — розробка методологічних основ прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, створення методів, технічних засобів і технологій для оцінки технічного стану та подовження термінів експлуатації техногенно та екологічно небезпечних об'єктів. Для наукових співробітників, інженерів, студентів старших курсів, зайнятих розробкою та експлуатацією конструкцій, споруд та машин.

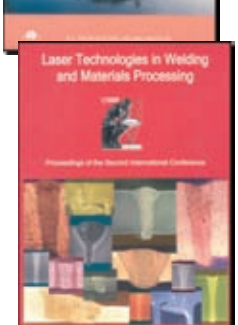
Железнодорожный транспорт: Сб. ст. — 2006. — 178 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм. — 600 грн./660 руб./38$.

В сборнике представлены статьи и рекламные материалы, опубликованные в журналах «Автоматическая сварка» и «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» за 2001-2005 гг., по проблемам железнодорожного транспорта, посвященные различным аспектам исследований, разработке и применению ряда технологий сварки и наплавки, выбору оборудования и материалов применительно к изготовлению и ремонту конструкций и узлов железнодорожного подвижного состава и путейного хозяйства.



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

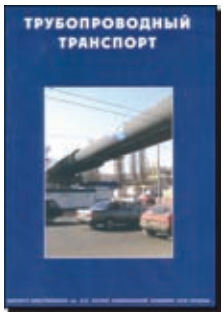
Кононенко В. Я. Технологии подводной мокрой сварки и резки (англ. яз.). — Киев: ИЭС, 2006. — 140 с., формат 140×200 мм, мягкий переплет, ISBM 966-88-72-03-7, 60 грн./660 руб./38$.



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, ISBM 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$.

Каталог содержит информацию о новых, разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, технологиях, материалах и оборудовании для сварки, резки, наплавки, пайки, нанесения защитных покрытий и других родственных процессов, предлагаемых для коммерческой реализации. Может быть полезен широкому кругу инженерно-технических работников, технологов, конструкторов, предпринимателей, занятых в машиностроении, энергетике, строительстве, судостроении, металлургии и других отраслях промышленного производства.

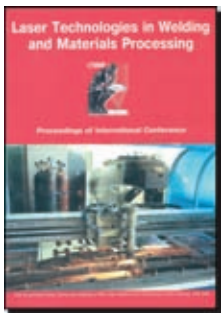


Трубопроводный транспорт: Сб. ст. — Киев: ИЭС, 2005. — 178 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 60 грн./660 руб./38$.

Представлены статьи, опубликованные в журналах «Автоматическая сварка» и «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» за 2001-2005 гг., по проблемам трубопроводного транспорта, проблемам использования новых сталей в сварных конструкциях, оценке качества трубных сталей и их сварных соединений, разработке оборудования и технологий сварки трубопроводов, вопросам повышения прочности и улучшения структуры и свойств нефте- и газопроводных труб, оценке остаточного ресурса сварных соединений конструкций, сварочным материалам, деформационному старению труб, контролю и диагностике трубопроводов и другим вопросам, касающимся проблемы обеспечения эксплуатационной надежности систем трубопроводного транспорта.

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, ISBM 966-95847-8-7, 100 грн./660 руб./50$.

В сборнике представлены доклады Второй международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», в которых отражены достижения за последние годы в области математического моделирования физических явлений, протекающих при сварке, наплавке и других родственных процессах. Авторами докладов являются известные специалисты из различных стран мира. Для научных и инженерно-технических работников, занятых в области сварки, резки, наплавки, пайки, нанесения защитных покрытий и других родственных процессов.



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. — 266с., формат 200×290 мм, мягкий переплет, ISBM 966-95847-2-8. 100 грн./660 руб./50$.

В сборнике представлены доклады, в которых отражены достижения за последние годы в области математического моделирования физических явлений, протекающих при сварке, наплавке и других родственных процессах. Рассмотрены также перспективы развития информационных технологий. Одной из характерных

особенностей представленных докладов является стремление их авторов получить не только новые научные результаты, но и создать инструмент для практического применения при поиске рациональных технологических решений. В основу таких разработок положено комплексное математическое моделирование связанных друг с другом характерных физических явлений, определяющих качество технологического процесса.

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

У книзі викладено основні вимоги до світлопроменевих установок для термічних технологій — зварювання, різання тощо. Показано, що найкраще цим вимогам відповідає устаткування з використанням лазера як джерела світла. Розглянуто властивості вимушених переходів в атомах (молекулах) і на їх основі пояснено механізм лазерної генерації електромагнітного випромінювання. Викладено теорію потужності випромінювання, генерованого лазером, з використанням балансних рівнянь заселення і розселення атомних рівнів під час генерації. Розглянуто властивості лазерних пучків, сформованих у стійкому і нестійкому резонаторах, особливості їх фокусування. Порівняно мінімальні перерізи сфокусованих лазерних пучків, сформованих у цих резонаторах; показано, за яких умов доцільно використовувати стійкі чи нестійкі резонатори. Викладено основні поняття про передачу лазерного випромінювання по світловолокну і його фокусування на оброблювану деталь. Подано основні поняття про фізичні процеси у високопотужних лазерах, які використовуються в термічних технологіях — зварюванні, різанні, термообробці, наплавці тощо (CO_2-лазер, рубіновий, неодимовий, напівпровідниковий і ексимерний лазери).

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

В книге изложена теория процессов, происходящих при индукционном нагреве металлов и в системе индуктор--нагреваемое тело, освещены вопросы, возникающие при технической реализации систем этого класса. Получила развитие теория обратных задач электромагнитного поля и индуктора в приложении к проблемам сварки и родственных технологий путем применения импедансных граничных условий, определенных через удельную мощность или температуру на поверхности нагреваемых тел. Это позволяет непосредственно проектировать технологическое оборудование, исходя из показателей технологического процесса. Изложены некоторые новые методы построения электрических схем замещения сложных многообмоточных индукционных устройств технологического назначения и расчета их параметров.

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$.

В сборнике представлены статьи, опубликованные в журналах «Advances in Electrometallurgh» и «The Paton Welding Journal», за период 2001-2005 гг. по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. Авторами статей являются известные в Украине и за рубежом ученые и специалисты в области титана и его производства. Сборник предназначен для широкого круга читателей, занимающихся проблемами производства, обработки и потребления титана.

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

15 лет на рынке сварочного оборудования Украины

предприятие
«Триада-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 ∅ 1,2 мм, Al Si 5 ∅ 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

Электромашино-строительный завод «ФИРМА СЭЛМА»
SELMA

ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОСВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

60 лет в мире сварки

ISO
TÜV CERT ISO 9001:2000

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
проволоки
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 антикоррозиционной 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

НПФ ЭЛНА

ООО "НПФ "Элна"

Порошковые проволоки для сварки, наплавки и напыления

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

Welding Alloys Group

HYUNDAI WELDING CO., LTD.

ул. Литовченко, 69, г. Киев, 03680 тел. (044) 200-80-85, 200-85-17 факс (044) 200-65-17 e-mail: info@elna.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-4И, 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-НпХ25Г14НЗТ, ППС-ЭК1, ППС-ЭК2, ППР-ЭК3, ППР-ЭК4

Флюсы плавленые – 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 обладнання

012

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

ТМ.ВЕЛТЕК

ООО "ТМ.ВЕЛТЕК"

Порошковые проволоки для наплавки по ГОСТ 26101-84

-80Х20 Р3Т,35В9Х3СФ,25Х5ФМС,18Х1Г1М и др.

Порошковые проволоки ВЕЛТЕК

-ВЕЛТЕК Н200 - Н620

Порошковые проволоки для сварки

-АН1,АН8,АН39,АНЧ-2 и др.

Порошковые проволоки ТМВ

-ТМВ3,ТМВ6,ТМВ7,ТМВ11,ТМВ14,ТМВ29 и др

Диаметрами 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

ГЕФЕСТ™

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

Производство высококачественных электродов для:

- Сварки высоколегированных сталей
  - ОЗЛ-6, ЦЛ-11, ЭА-48М/22, АНЖР-1, АНЖР-2, ЦТ-15, НИИ-48Г, ОЗЛ-8 и др.
- Сварки теплоустойчивых сталей
  - ЦУ-5, ЦЛ-39, ТМУ-21У
- Наплавки слоев со специальными свойствами
  - ЦН-12М, ЦН-6Л, 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 металлизации

Электроды наплавочные, специального назначения, для сварки чугуна и резки

Ферросплавы и лигатуры

Хром металлический

Комплексные раскислители и модификаторы

ул. Курсантская, 1
г. Днепропетровск
49051, Украина

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

производство продажа
сервисное обслуживание

малогабаритное, высокоэффективное энергосберегающее сварочное оборудование на токи 110-300 А с ограничением холостого хода до12 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) 271-2036
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

РОБОТОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ 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

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 прокалки; 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; www.drahtzug.de

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

АРКСЭЛ

Научно-технические журналы ИЭС им. Е. О. ПАТОНА http:// www.nas.gov.ua/pwj

«Автоматическая сварка», 12 номеров в год, издается с 1948 г. В журнале представлена разнообразная научно-техническая информация по сварке, наплавке, резке, пайке, нанесению защитных покрытий; производственный опыт применения современных технологий для соединения материалов и восстановления изделий; сведения о новых книгах и патентах; обзорная информация о профильных выставках и конференциях; банк производителей товаров и услуг на рынке сварочного производства Украины и России.
Тел.: (38044) 287-63-02, 529-26-23

«Техническая диагностика и неразрушающий контроль», 4 номера в год, издается с 1989 г. В журнале представлены последние достижения в области технической диагностики и неразрушающего контроля (акустическое излучение, магнитные, радиоволновые, термические, оптические, радиационные и другие методы). Широко освещаются методики оценки и прогнозирования разрушений в сварных конструкциях.
Тел.: (38044) 271-23-90, 529-26-23

«Современная электрометаллургия», 4 номера в год, издается с 1985 г. В журнале освещаются разработки в области электрошлаковой электронно-лучевой и плазменно-дуговой технологий, вакуумно-дугового переплава и индукционной плавки, а также в области внепечной обработки стали, энерго- и ресурсосберегающих металлургических технологий и др.
До 2002 г. журнал издавался под названием «Проблемы специальной электрометаллургии».
Тел.: (38044) 528-34-84, 529-26-23

«The Paton Welding Journal», 12 номеров в год. Полный перевод на английский язык журнала «Автоматическая сварка».
Тел.: (38044) 287-63-02, 529-26-23

«Advances in Electrometallurgy», 4 номера в год. Полный перевод на английский язык журнала «Современная электрометаллургия».
Тел.: (38044) 528-34-84, 529-26-23

На официальном сайте журналов **www.nas.gov.ua/pwj** приведены рефераты опубликованных статей с 2000 г.
Подписка по каталогам подписных агентств, а также через редакцию

Адрес редакций журналов: 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11
Тел./факс: (38044) 271-24-03, 529-26-23, 528-04-86
E-mail: journal@paton.kiev.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 $
Черно-белая (170×250 мм) - 80 $
Черно-белая (170×125 мм) - 50 $
Черно-белая (80×80 мм) - 15 $

- 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 прощади
- При заключении рекламных контактов на сумму, превышающую 1000 $, предусмотрена гибкая система скидок

Технические требования к рекламным материалам
- Размер журнала после обрези 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)

© Автоматическая сварка, 2007

Подписано к печати 12.04.2007. Формат 6084/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 9,14. Усл. кр.-отт. 9,99. Уч.-изд. л. 10,44 + 8 цв. вклеек.
Цена договорная.
Печать ООО «Фирма «Эссе». 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.