Международный научно-технический и производственный журнал

Автоматическая сварка

№ 9 (689)
Сентябрь 2010

Издается с 1948 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

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

ИЗДАТЕЛЬ:
Международная ассоциация «Сварка»

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

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

Свидетельство о государственной регистрации КВ 4788 от 09.01.2001

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

За содержание рекламных материалов редакция журнала ответственности не несет
Цена договорная

СОДЕРЖАНИЕ

НОВОСТИ 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Гоок С., Гуменюк А., Ламмерс М., Ретмайер М. Особенности процесса орбитальной лазерно-дуговой сварки толстостенных труб большого диаметра 5

Хорунов В. Ф., Максимова С. В., Зелинская Г. М. Исследование структуры и фазового состава сплавов на основе системы Ti–Zr–Fe 14

Гвоздецкий В. С. Аналитическое исследование регулятора тока источника питания микроплазменной сварки 20

Дерломенко В. В., Ющенко К. А., Савченко В. С., Червяков Н. О. Технологическая прочность и анализ причин ухудшения свариваемости и образования трещин 26

Коберник Н. В., Чернышов Г. Г., Михеев Р. С., Чернышова Т. А. Обработка поверхности алюмоматричных композиционных материалов концентрированными источниками энергии 31

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Лобанов Л. М., Пащин Н. А., Логинов В. П., Покляцкий А. Г., Бабуцкий А. И. Ремонт судокорпусных конструкций из алюминиевого сплава АМг6 с применением электродинамической обработки 39

Мартинович В. Н., Мартинович Н. П., Лебедев В. А., Максимов С. Ю., Пичак В. Г., Лендел И. В. Высококачественные шланг-пакеты для подводной сварки и резки 42

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

Троицкий В. А., Дядин В. П., Давыдов Е. А. Ультразвуковая диагностика эксплуатационных дефектов в конструкциях нефтегазового комплекса 45

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

По страницам журнала «Welding and Cutting» 2010, № 1 51

ХРОНИКА

10-я Юбилейная европейская конференция-выставка по неразрушающему контролю 55

Международная конференция по сварочным материалам 56

X Международная конференция-выставка «Проблемы коррозии и противокоррозионной защиты конструкционных материалов. Коррозия-2010» 59

Наши поздравления (Л. М. Лобанов, В. С. Гвоздецкий, А. Д. Размышляев) 61

ИНФОРМАЦИЯ 64

Разработано в ИЭС 25, 38, 65, 66

© НАН Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, МА «Сварка», 2010

International Scientific-Technical and Production Journal

Avtomaticheskaya Svarka

№ 9 (689)
September 2010
Published since 1948

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B. E. PATON

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

THE INTERNATIONAL
EDITORIAL COUNCIL:

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

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

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

Editors:
E. N. Kazarova, T. V. Yushtina
Electron galley:
I. R. Naumova,
I. V. Petushkov, A. I.Sulima

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

Gook S., Gumenyuk A., Lammers M., Rethmeier M. Peculiarities of the process of orbital laser-arc welding of large-diameter thick-walled pipes 5

Khorunov V. F., Maksymova S. V., Zelinskaya G. M. Investigation of structure and phase composition of alloys based on Ti-Zr-Fe system 14

Gvozdetsky V. S. Analytical study of power supply current regulator for microplasma welding 20

Derlomenko V. V., Yushchenko K. A., Savchenko V. S., Chervyakov N. O. Technological strength and analysis of causes of weldability degradation and cracking 26

Kobernik N. V., Chernyshov G. G., Mikheev R. S., Chernyshova T. A. Treatment of surfaces of aluminium-matrix composite materials with concentrated energy sources 31

INDUSTRIAL

Lobanov L. M., Pashchin N. A., Loginov V. P., Poklyatsky A. G., Babutsky A. I. Repair of ship hull structures of aluminium alloy AMG6 using electrodynamic treatment 39

Martynovich V. N., Martynovich N. P., Lebedev V. A., Maksimov S. Yu., Pichak V. G., Lendel I. V. High-quality hose packs for underwater welding and cutting 42

TECHNICAL DIAGNOSTICS AND NON-DESTRUCTIVE TESTING

Troitsky V. A., Dyadin V. P., Davydov E. A. Ultrasonic diagnostics of defects in service of oil- and-gas industry structures 45

BRIEF INFORMATION

Review of journal «Welding and Cutting», 2010, 1 51

NEWS

10 Jubilee European Conference and Exhibition on NDT 55

International Conference on Welding Consumables 56

X International Conference and Exhibition «Problems of Corrosion and Anticorrosion Protection of Structural Materials. CORROSION-2010» 59

Our Greetings (L. M. Lobanov, A. D. Gvozdetsky, V. S. Razmyshlyaev) 61

INFORMATION 64

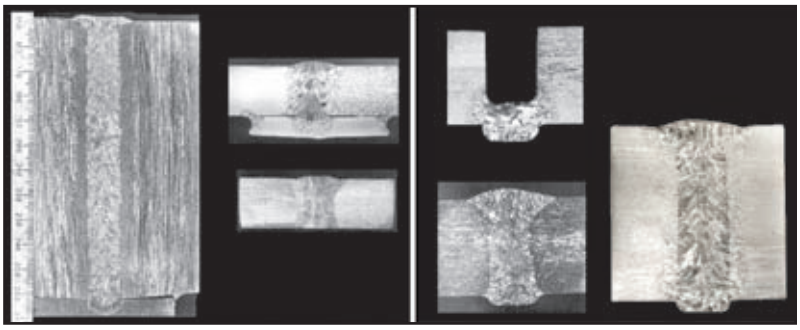
Developed at the PWJ 25, 38, 65, 66

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

© NAS of Ukraine, PWI, International Association «Welding», 2010

СВАРКА В УЗКИЙ ЗАЗОР ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ТОЛЩИНОЙ до 110 мм

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология и установка портального типа для дуговой сварки в узкий зазор титана и высокопрочных титановых сплавов толщиной до 110 мм. Технология предусматривает применение процесса сварки ТИГ с магнитным управлением дугой и подачей присадочной проволоки в узкую разделку шириной 8...12 мм. Благодаря магнитному управлению дугой достигается поочередное отклонение ее к боковым стенкам узкощелевой разделки и соответственно достижение надежного и равномерного сплавления вертикальных стенок с наплавляемым валиком, а также валиков между собой.



Электрическая дуга при сварке в узкий зазор горит в стесненных условиях, при этом, кроме вольфрамового электрода, в щелевой разделке размещены направляющая для присадочной проволоки и магнитопровод электромагнита, что затрудняет возможность оператору непосредственно контролировать процесс сварки. Для визуального наблюдения за процессом сварки и контроля состояния вольфрамового электрода и положения присадочной проволоки в разделке разработана малогабаритная видеокамера ВК-27, оснащенная насадкой прямого угла, предназначенная для телевизионного наблюдения за процессом сварки ТИГ конструкций из титана и титановых сплавов на токе до 500 А.

Основные преимущества разработанной технологии:

✧ уменьшение ширины шва и зоны термического влияния;

✧ снижение объема наплавляемого металла;

✧ повышение производительности процесса сварки;

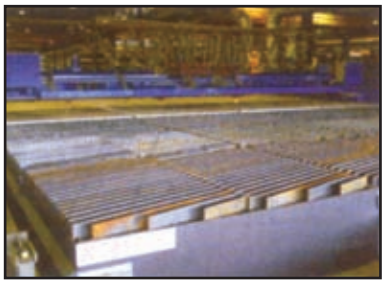
✧ уменьшение трудоемкости работ при подготовке деталей к сварке;

✧ обеспечение высокого качества сварных соединений независимо от толщины соединяемых элементов;

✧ прочность сварного соединения — на уровне не менее 0,9 от прочности основного металла.

ВЫТЯЖНЫЕ СТОЛЫ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ

При эксплуатации машин для термической резки металлов большую роль играют столы, на которые кладется металл во время резки. Термическая резка металла сопровождается выбросом большого количества продуктов сгорания, поэтому столы для резки должны быть оснащены системой



удаления или утилизации их. Для этого используют вытяжные вентилируемые столы и столы с водяной ванной.

Наиболее эффективными являются вытяжные столы фирмы «Kemper», которые представляют собой секционные наборные столы на любую требуемую рабочую зону и оснащены системой местного отвода воздуха непосредственно из зоны резания. Забор воздуха осуществляется из-под стола. Столы оборудованы системой задвижек, открывающих и закрывающих требуемую зону с помощью пневмоцилиндров во время движения портала по контуру вырезаемой детали. Столы изготовлены из толстого металла и рассчитаны на нагрузку до 2 т/м^2, что позволяет укладывать листы толщиной до 250 мм.

ДОРОГАЯ СМЕСЬ ДЕЛАЕТ СВАРКУ ДЕШЕВЛЕ

В России уже наступило время использовать технологии и продукты, позволяющие производителям экономить свои расходы. Применение смесей CORGON от Linde Gas позволяет потребителям не только решить задачу управления качеством сварочных работ, но и добиться снижения совокупных затрат на сварку. В некоторых случаях внедрение смесей CORGON (прежнее название FOGON) как нового типа защитного газа упирается в простой, но важный вопрос — выгодно ли применение сварочных смесей рядовому потребителю, если цена смеси за баллон выше, чем для традиционной углекислоты? Однозначно, да! Применение газовых смесей CORGON для полуавтоматической сварки в большинстве случаев, помимо улучшения технических аспектов сварки, позволяет также существенно снизить общие затраты на сварку.

Это не парадокс, а следствие реальных преимуществ смесей CORGON. С объективной точки зрения при выборе типа защитного газа и анализе связанных с этим расходов необходимо сравнивать совокупные затраты на сварку в целом, на изделие или погонный метр сварного шва. Поэтому следует учитывать не цену газа в баллоне, а затраты при сварке — расход защитного газа и сварочной проволоки, трудозатраты на сварку и зачистные работы после нее, а при больших объемах работ также расход электроэнергии, износ оборудования, защитных приспособлений, спецодежды и пр.

Реально для полуавтоматической сварки доля затрат на защитный газ в общем объеме расходов не превышает 5...10 %, в то время как на сварочную проволоку, например, приходится более половины всех затрат на сварку.

Известно, что применение сертифицированных сварочных смесей CORGON резко снижает (иногда вплоть до полного отсутствия) количество брызг металла при сварке и позволяет обеспечить по сравнению с чистой углекислотой более гладкий и чистый профиль сварного шва. В результате обеспечивается значительная (до 15...20 %) экономия дорогостоящей сварочной проволоки, а также можно резко сократить затраты на зачистные работы. Возможность увеличения скорости сварки и другие преимущества этих смесей обеспечивают снижение трудозатрат на сварочные работы.

Есть и другие аспекты экономии затрат на сварку, получаемые при использовании смесей CORGON. Так, при практическом отсутствии стекловидных шлаков значительно сокращаются затраты на обработку и подготовку сварных швов перед покраской или цинкованием, не требуется приобретение подогревателей на редукторы, увеличивается срок службы и сокращаются затраты на замену сварочных насадок, стекол масок, спецодежды и пр.

УДК 621.791.72:621.791.75

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОРБИТАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

С. ГООК, А. ГУМЕНЮК, М. ЛАММЕРС, М. РЕТМАЙЕР
(Федеральное ведомство по исслед. и испытаниям материалов (БАМ), г. Берлин, Германия)

Приведены результаты разработки и опробации гибридной лазерно-дуговой сварки труб большого диаметра. Обобщены основные результаты исследований, в частности, особенности формирования шва на различных участках кольцевого стыка, показатели механических свойств сварных соединений, перспективы имеющейся техники применительно к строительству магистральных трубопроводов.

Ключевые слова: гибридная лазерно-дуговая сварка, орбитальная сварка, трубопроводы высокого давления, оптоволоконные лазеры

Одной из важнейших составных частей мировой энергетической системы является сеть магистральных трубопроводов, при сооружении которых продемонстрировано преимущество ручных и механизированных способов дуговой сварки, в частности, ручной дуговой сварки покрытым электродом, механизированной сварки в защитном газе проволокой сплошного сечения или порошковой проволокой, механизированной двухдуговой тандем-сваркой. Среди недуговых процессов можно выделить способ стыковой сварки оплавлением, который несмотря на простоту принципа не нашел широкого распространения при сооружении современных нефте-, газопроводов [1]. Сварка неповоротных стыков трубопроводов является достаточно трудоемким процессом, от которого в значительной степени зависит темп прокладки магистрали в целом. Применяемые дуговые способы сварки характеризуются относительно низкой скоростью процесса и, например, при строительстве трубопровода диаметром 1229 мм с толщиной стенки 35 мм и более это ограничение представляется довольно ощутимым. Кроме того, нефтегазовая отрасль находится в поиске решений в области внедрения современных высокопрочных конструкционных материалов, что позволило бы уменьшить толщину стенки трубопровода с целью снижения его металлоемкости или увеличить рабочее давление в трубопроводе для более эффективной транспортировки продукта. Вместо стандартных сортов трубопроводной стали классов прочности X60, X70 с пределом текучести до 500 МПа по классификации Американского института нефти в эксплуатацию вводятся стали более высокого класса прочности, такие как X80 или X100, при этом возможно повышение рабочего давления в новых проектируемых трубопроводах с 7…10 до 15…20 МПа. Несмотря на то что повышение прочностных характеристик стали с точки зрения сварочной металлургии приводит к ухудшению ее свариваемости применяемая традиционная дуговая сварка способна обеспечить требуемое качество сварного соединения, а использование полностью автоматизированных технологических процессов решает проблему его воспроизводимости. На выбор тех или иных сварочных процессов при сооружении перспективных трубопроводов из высокопрочной стали первоочередное влияние будут оказывать, по всей видимости, технико-экономические факторы с учетом объемов строительства и гарантий качества строительно-монтажных работ. Данная стратегия неразрывно связана с использованием последних достижений в области сварочных технологий, среди которых наиболее привлекательными на сегодня являются высокопроизводительные комбинированные (гибридные) процессы сварки, основанные на синергетическом эффекте комплексного воздействия на сварной шов лазерного луча и электрической дуги.

Идея использования лучевой сварки для изготовления кольцевых швов трубопроводов не является новой. Так, приблизительно с 2000 г., опубликован ряд работ, в которых обсуждаются возможности использования электронного луча [2], газового CO_2-лазера [3], а также твердотельного Nd:YAG-лазера [4] для реализации процесса орбитальной сварки. Принципиальная пригодность электронно-лучевой сварки для изготовления однопроходных кольцевых швов продемонстрирована на трубах диаметром 762 мм с толщиной стенки 19 мм. Однако использование указанного способа сварки в условиях монтажа затруднено ввиду определенных технических сложностей его реализации, связанных в основном с необходимостью создания вакуума в зоне сварки и обеспечения защиты от рентгеновского излучения, ге-

© С. Гоок, А. Гуменюк, М. Ламмерс, М. Ретмайер, 2010

нерируемого при попадании электронов на деталь. При использовании лазерного луча максимальная толщина стенки трубы при сварке встык за один проход ограничивается 10 мм, что обусловлено максимальной выходной мощностью задействованных на тот момент лазерных установок (12 кВт для CO_2-лазера и 4,4 кВт для Nd:YAG-лазера). С появлением высокомощных твердотельных лазеров, таких как оптоволоконный и дисковый, в сварочном производстве стали использовать лазерное излучение мощностью до 20 кВт непрерывного действия с превосходным качеством излучения и в компактном исполнении. Используя указанные преимущества современных лазеров в сочетании с гибридным лазерно-дуговым процессом сварки впервые появилась возможность выполнения однопроходной сварки встык материалов с толщиной стенки до 20 мм [5]. Потенциал современных оптоволоконных лазеров применительно к сварке трубопроводов интенсивно изучается в ряде исследовательских центров Германии, а также в других странах. К наиболее актуальным работам в этой области, результаты которых опубликованы в специальной литературе на протяжении последних двух лет, можно отнести исследования Немецкого исследовательского и образовательного центра сварки в Галле (SLV Halle) [6]. Оптоволоконный лазер мощностью 10 кВт был использован в составе гибридного процесса для соединения сегментов труб с толщиной стенки 10 мм. Гибридную сварку V-образной разделкой кромок с высотой притупления 8 мм осуществляли лазером мощностью 6,5 кВт с максимальной скоростью сварки 0,61 м/мин. При этом облицовочный слой шва выполняли автоматической сваркой в защитном газе. В Центре по исследованию конструкционных материалов (CSM, г. Рим, Италия) кольцевые швы труб диаметром 36 мм с толщиной стенки 16 мм выполняли с применением лазерного и гибридного лазерно-дугового способа сварки в два прохода [7]. В данном случае речь идет о поворотном стыке, сварку которого выполняли в нижнем положении с вращением трубы. В качестве источника лазерного излучения использовали оптоволоконный Yb:SiO_2-лазер с выходной мощностью 10 кВт (фирма IPG), источником питания дуги служил сварочный инвертор Aristo MIG 500 (фирма ESAB), работающий на максимальном токе 500 А. Для выполнения первого прохода с V-образной разделкой кромок и притуплением 5 мм использовали только лазерную сварку с мощностью установки 10 кВт. При этом обеспечивалось заполнение разделки только половины толщины стенки трубы. Оставшиеся 8 мм заполняли при втором проходе гибридной лазерно-дуговой сварки. Скорость сварки при выполнении обоих проходов составляла 1 м/мин. В работе [8] приведены результаты полевых испытаний гибридной сварки труб диаметром 610 мм. Твердотельный Nd:YAG-лазер мощностью 4,4 кВт в сочетании с процессом автоматической дуговой сварки плавящимся электродом использовали для выполнения корневого прохода многослойного орбитального шва с U-образной разделкой кромок. При высоте притупления кромок 4 мм реализация полуорбитального процесса, начиная с нижнего положения до потолочного, возможна на скорости 1,8 м/мин.

В рамках настоящей работы авторами планировалось опробывание оптоволоконного Yb-лазера с выходной мощностью 10 кВт, применяемого для выполнения корневого прохода кольцевых стыков. Однако к моменту публикации был проведен лишь ряд экспериментов на плоских пробах с U-образной разделкой кромок с притуплением от 4 до 7 мм с целью исследования формы проплавления и подбора параметров сварки. В работе [9] обсуждается вариант использования 10 кВт дискового лазера для гибридной сварки труб диаметром 30 мм и более. Представленные результаты касаются сварки в нижнем положении плоских образцов толщиной 10,4 мм из трубной стали класса прочности X80. Заполнение V-образной разделки кромок с притуплением 6 мм и углом раскрытия 60° осуществляли в два прохода: первый — гибридной лазерно-дуговой сваркой с мощностью лазера 9 кВт на скорости 2 м/мин, второй — автоматической дуговой сваркой плавящимся электродом на скорости 1 м/мин. Авторы указанной работы упоминают также об отработке гибридного процесса на кольцевых швах.

Приведеные выше литературные данные в общих чертах дают представление о состоянии разработок в области гибридной лазерно-дуговой сварки толстостенных трубопроводов большого диаметра. На их основании можно сделать вывод, что научно обоснованные результаты, необходимые для внедрения гибридных лазерно-дуговых процессов сварки, обеспечивающих высокие характеристики надежности и качества кольцевых стыков труб, все еще отсутствуют. В обсуждаемых результатах в основном речь идет о толщине труб под сварку около 10 мм, для соединения которых применяют технологию многослойной сварки. Потенциал современных лазеров, позволяющий обеспечить более высокую глубину проплавления материала, до настоящего времени не использован в полной мере. Это объясняется отчасти тем, что мощность задействованных лазеров ограничивается 10 кВт, и однопроходная сварка труб толщиной 16 мм и более, что было бы интересно с точки зрения экономической эффективности, не возможна. Кроме того, отсутствуют количественные результаты исследования надежности сварных соединений труб, выполненных гибридной лазерно-дуговой сваркой, не изучены

в достаточной степени причины образования горячих трещин и не выработаны рекомендации по их предупреждению.

БАМ совместно с рядом фирм представителей индустрии и при поддежке федерального Министерства образования и исследований Германии проводит изучение процесса орбитальной гибридной сварки с использованием оптоволоконного лазера мощностью 20 кВт. Применение лазерных систем мощностью 15 кВт и выше при строительстве толстостенных трубопроводов большого диаметра наиболее привлекательно, поскольку при указанной мощности лазеров обеспечивается такая глубина проплавления материала, при которой возможно получение значительного экономического эффекта от внедрения этой техники. Это связано, в первую очередь, с модификацией разделки под сварку таким образом, что количество проходов, а соответственно и присадочного материала, необходимого для заполнения разделки, может быть значительно снижено. Сравнение показало, что расход сварочной проволоки при сварке стыков труб диаметром 1020 мм с толщиной стенки 20 мм может быть сокращен в 4 раза при применении гибридного лазерно-дугового процесса по сравнению с двухдуговой тандем-сваркой в защитных газах, которая на сегодня считается одним из самых производительных способов сварки трубопроводов, и более чем в 10 раз по сравнению с ручной дуговой сваркой. Более высокая по сравнению с традиционными способами сварки скорость гибридного лазерно-дугового процесса позволяет сократить время на сварку одного стыка и тем самым способствует более высокому темпу прокладки магистрали. Потребление энергии при гибридном способе сварки, несмотря на сравнительно низкий КПД оптоволоконных лазеров (около 30 %), сравнимо с тандемным дуговым процессом сварки и на порядок меньше, чем при ручной дуговой сварке. Некоторые показатели рассматриваемых способов сварки приведены в табл. 1.

На основании приведенных данных следует, что гибридная лазерно-дуговая сварка является перспективной ресурсосберегающей технологией.

Таблица 1. Сравнение способов сварки трубопроводов на примере выполнения одного стыка труб диаметром 40 мм с толщиной стенки 20 мм

Способ сварки	Расход проволоки, кг/ч	Время сварки, мин	Расход энергии, кВт
Ручная дуговая плавящимся электродом	6,40	190	30,0
Двухдуговая тандемная в защитных газах	1,90	12	2,7
Гибридная лазерно-дуговая	0,33…0,44	1,5	2,2

Однако необходимым условием успешного внедрения в производство этой технологии является ее соответствие требованиям норм качества в отношении допустимых дефектов сварных швов, а также обеспечение требуемых механико-технологических свойств сварных соединений, оговоренных соответствующими нормативными документами. Одной из целей исследований, проводимых в БАМ, является ответ на вопрос, обеспечиваются ли требования, предъявляемые к сварным соединениям трубопроводов, которые получены гибридной лазерно-дуговой сваркой.

В настоящей работе основное внимание уделено двум аспектам орбитальной сварки толстостенных труб большого диаметра. Рассматривается принципиальная возможность использования оптоволоконного лазера мощностью 20 кВт для решения подобных задач и особенности указанных способов сварки в различных положениях. При этом проанализированы механико-технологические свойства полученных сварных соединений и предложены способы влияния на их показатели.

Оборудование и материалы. Источником лазерного излучения служил волоконный лазер YLR-20000 мощностью 20 кВт (фирма IPG), а источником питания дуги — автомат для импульсно-дуговой сварки типа GLC 603 Quinto (фирма «Cloos»), обеспечивающий максимальный ток сварки 600 А. Устройство для орбитальной лазерно-дуговой сварки трубопроводов (рис. 1), с помощью которого возможна сварка кольцевых стыков диаметром от 914 до 1070 мм, сконструировано и предоставлено для сварочных испытаний фирмой «Vietz GmbH», партнером БАМ в настоящем проекте. Основными элементами устройства являются направляющее кольцо *1* и орбитальная тележка *4*, перемещение которой по ок-

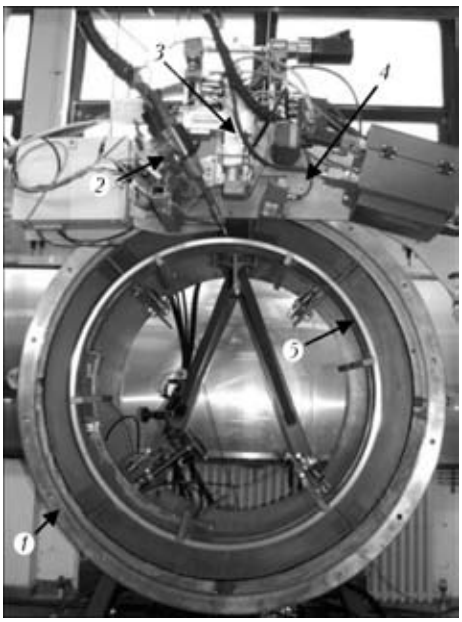


Рис. 1. Устройство для орбитальной лазерно-дуговой сварки

Таблица 2. Химический состав (мас. %) исследуемых материалов

Класс прочности стали	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	Cu	Al	Mo	V	Ti	Fe
X56	0,07	0,03	1,33	0,008	0,001	0,03	0,04	0,05	0,02	0,04	0,02	<0,01	0,02	Осн.
X65	0,09	0,36	1,57	0,011	0,001	0,03	0,05	0,04	0,02	0,04	0,01	<0,01	0,02	»

ружности кольца реализуется через зубчатое зацепление. С помощью трех дополнительных электроприводных осей осуществляется корректировка положения лазерного луча по отношению к стыку во время сварки. Работой устройства в целом управляет система числового программного управления «Siemens SINUMERIK», которая обеспечивает точность позиционирования ±0,1 мм. Гибридная сварочная головка, состоящая из оптической головки фирмы «HighYag» *3* с фокусным расстоянием 300 мм и сварочной горелки для сварки в защитных газах *2* закреплена на орбитальной тележке. Для проведения сварочных экспериментов в условиях лаборатории конструкция устройства для орбитальной сварки адаптирована под сварку трубных колец *5*, которые были фиксированы в центре направляющего кольца. Транспортировку лазерного излучения от лазера к оптике осуществляли с помощью оптического волокна с диаметром ядра 200 мкм. Диаметр лазерного луча в фокальной плоскости составлял 0,5 мм. Ряд экспериментов проводили с использованием сканирующей оптики. В этом случае диаметр фокусного пятна составлял 0,42 мм. В качестве проб под сварку использовали кольца шириной 120 мм, вырезанные из труб диаметром 914 мм с толщиной стенок 15 и 16 мм. Трубы изготовлены из сталей классов прочности X56 и X65 согласно классификации API 5L. Примерным аналогом настоящих сталей являются российские стали К52 и К56, которые соответствуют сталям L360MB и L450MB (EN 10208–2). Исследуемые материалы характеризуются низким (до 0,09 % С) содержанием углерода. Содержание серы и фосфора находится также в допустимых для лазерного сварочного процесса пределах [10]. Химический состав исследуемых материалов приведен в табл. 2.

Высокие значения предела текучести сталей классов прочности X56 и X65 в сочетании с хорошими показателями ударной вязкости достигаются за счет контролируемой прокатки листа (штрипса). Механические свойства исследуемых сталей приведены в табл. 3.

В качестве присадочного материала использовали сварочную проволоку G3Si1 по DIN EN 440 диаметром 1,2 мм. В качестве защитного газа использовали смесь газов ARCAL 21, состоящую из 92 % Ar и 8 % диоксида углерода (M21 согласно DIN EN 439). Для защиты корня шва применяли аргон (Ar 4.6). Процесс гибридной сварки реализовали впереди идущей дугой с заглублением фокуса луча Δz на 4 мм и углом наклона горелки к оси луча лазера 25°. Расстояние между точками выхода сварочной проволоки и лазерного луча на поверхности детали составляло от 3 до 4 мм. Перед сваркой два кольца прихватывали изнутри шестью, равномерно распределенными по периметру окружности скобами. Сварку осуществляли встык без разделки кромок. Максимальный зазор на некоторых участках стыка под сварку составлял 0,2 мм, а максимальное смещение кромок находилось в пределах 0,5...1,0 мм.

Полуорбитальная сварка кольцевых стыков. Сварку колец выполняли на спуск (с нижнего положения до потолочного) таким образом, чтобы кольцевой шов был сварен в два этапа с двумя замыкающими участками. Здесь, на наш взгляд, целесообразно ввести понятие полуорбитального процесса — а для обозначения отдельных пространственных положений сварки использовать изменение угла наклона касательной к окружности относительно исходного, нижнего положения. Таким образом, началу сварки соответствовала позиция угол 0 (нижнее положение), а окончанию процесса — позиция угол 180° (потолочное положение). При сварке второго полукольца координаты точек старта и окончания процесса были смещены вдоль сварного шва для обеспечения его замыкания. Для выполнения одного полуорбитального шва потребовалось пять наборов сварочных параметров *P*. Все операции, связанные с плавным изменением и контролем этих параметров, производили с помощью цифровой системы управления «Siemens SINUMERIK». Рис. 2 поясняет технику сварки полукольца, там же показаны символы прочности параметров процесса *P* для различных положений сварки.

Сварку выполняли на постоянной для всех положений мощности лазера P_L = 19 кВт и средней

Таблица 3. Механические свойства сталей классов X56 и X65 (согласно классификации API 5L)*

Класс прочности стали	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %	Работа удара при 68 Дж/см^2 (T = 20 °С)
X56	386	489	25,5	68
X65	450	530	23,5	68

* Даны минимальные значения параметров.

скорости v_s = 2 м/мин. В зависимости от пространственного положения процесса сварки осуществляли незначительную корректировку скорости в пределах ±0,2 м/мин относительно ее среднего значения. На формирование наружной поверхности шва в большей степени оказывал влияние объем сварочной ванны, образованный плавлением сварочной проволоки. Требуемую форму проплавления обеспечивали за счет адаптации скорости подачи сварочной проволоки v_d при переходе из одного положения сварки в другое. Так, для нижнего положения характерна высокая (около 14 м/мин) скорость подачи сварочной проволоки v_d. По мере продвижения к вертикальному положению 90° она плавно уменьшается до 9 м/мин. В потолочном положении качественное формирование шва возможно при таком объеме расплавленного металла, при котором не происходит его вытекания из сварочной ванны. Максимальная скорость подачи сварочной проволоки для потолочного положения была ограничена (6 м/мин). Дополнительно к адаптации скорости подачи сварочной проволоки при смене пространственных положений сварки осуществляют корректировку длины дуги L_{LB}, которую изменяют в пределах от +5 до –12 % по отношению к ее номинальному значению при заданных параметрах сварки. Так, в потолочном положении сварку выполняли короткой дугой, с коэффициентом коррекции –12 %. Силы газо- и электродинамического воздействия дуги на металл сварочной ванны в этом случае оказывали положительный поддерживающий эффект, что приводило в итоге к формированию качественного равномерного валика. На рис. 3 показаны макрошлифы и внешний вид некоторых характерных участков полуорбитальных швов.

Исходя из характера протекания процесса, можно заключить, что при корректно выставленных основных сварочных параметрах (рис. 2) формирование шва в положениях, начиная от нижнего (угол 0°) и до вертикального (угол 90°), происходит достаточно устойчиво. Сварку выполняли на повышенной скорости 2,2 м/мин, при которой не происходит провисание корня шва и обеспечивается полное его проплавление. Швы имеют благоприятную форму поперечного сечения с плавным переходом к основному металлу и стабильное формирование корня с малым количеством брызг. Однако визуальная оценка качества формирования шва показала, что для участка стыка от 50 до 80° характерно некоторое провисание лицевой стороны сварного шва. Несмотря на то что провисание незначительное, по всей видимости, потребуется наложение облицовочного слоя для создания усиления сварного шва на данном участке.

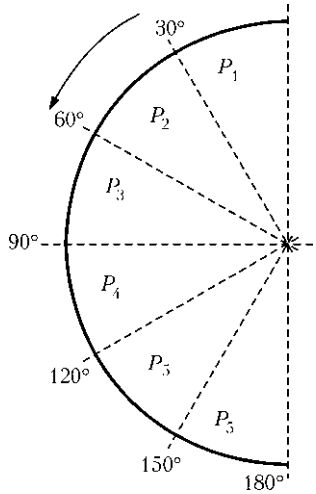


Рис. 2. Схема полуорбитальной лазерно-дуговой сварки кольцевого стыка диаметром 914 мм с толщиной стенки 16 мм: постоянные параметры: P_L = 19 кВт; Δz = –4 мм; изменяемые параметры: P_1 (v_d = 14 м/мин, L_{LB} = +5 %, v_s = 2,2 м/мин); P_2 (v_d = 12 м/мин, L_{LB} = 0 %, v_s = 2,2 м/мин); P_3 (v_d = 9 м/мин, L_{LB} = –5 %, v_s = 2,2 м/мин); P_4 (v_d = 7 м/мин, L_{LB} = –10 %, v_s = 1,9 м/мин); P_5 (v_d = 6 м/мин, L_{LB} = –12 %, v_s = 1,7 м/мин)

При переходе к позиции 90° отмечена высокая чувствительность процесса к объему сварочной ванны. Уже при незначительном превышении некоторого критического значения скорости подачи сварочной проволоки (9 м/мин при угле 90°) происходит «размазывание» металла по обеим сторонам шва, процесс протекает с повышенным брызгообразованием, на обратной стороне шва возможны наплывы металла и частичный непровар.

По мере продвижения к позиции 120° наряду с уменьшением скорости подачи сварочной проволоки до 7 м/мин снижается и погонная энергия гибридного процесса. При этом вероятность непровара корня шва увеличивается. Полное проплавление с удовлетворительным формированием корня в данной позиции достигнуто при одновременном снижении скорости сварки до 1,9 м/мин.

При сварке в потолочном положении, начиная приблизительно со 120 и до 180° качественный валик с небольшим усилением формируется при скорости процесса 1,7 м/мин. Наиболее сложной задачей на данном участке стыка оказалось получение приемлемого качества формирования корня. В данной позиции критической проблемой являлось отсутствие сплавления на обратной, обращенной к верху стороне шва. Этот дефект был вызван, с одной стороны, недостатком жидкого металла в корневой зоне шва по причине его провисания под действием силы тяжести и разбрызгивания, с другой определенную сложность представляла высокая чувствительность процесса к точности позиционирования сварочной головки относительно стыка. Так, смещение луча лазера на 0,3 мм приводило уже к одностороннему оплавлению кромок и, как следствие, к отсутствию сплавления в корневой зоне гибридного шва.

Варьирование основных сварочных параметров эффективного воздействия на настоящий дефект не оказывало (постоянные параметры: P_L = 19 кВт, Δz = –4 мм).

Обнадеживающие результаты получены при применении сканирующей оптики фирмы «HighYag», которая обеспечивает возможность линейной осцилляции лазерного луча в направлении, перпендикулярном направлению сварки с максимальной амплитудой 13 мм и частотой до 1 кГц. Сканирующую оптику применяли для стабилизации процесса при осцилляции лазерного луча, а также увеличения поперечного сечения шва, за счет чего обеспечивается лучший охват кромок и их сплавление. Хорошо воспроизводимые результаты с удовлетворительным качеством формирования корня шва в потолочном положении получены при амплитуде 0,7 мм с частотой сканирования 200 Гц. При данных настройках сканера полное проплавление обеспечивалось без адаптации других сварочных параметров. Для улучшения качества формирования корня шва использовали защитный газ аргон, который подавали с обратной стороны шва с помощью специально изготовленной ванны, накладываемой на стык и повторяющей внутренний контур свариваемых деталей. Макрошлиф и внешний вид потолочного шва выполненного с использованием сканирующей оптики и формирующего газа, показаны на рис. 4.

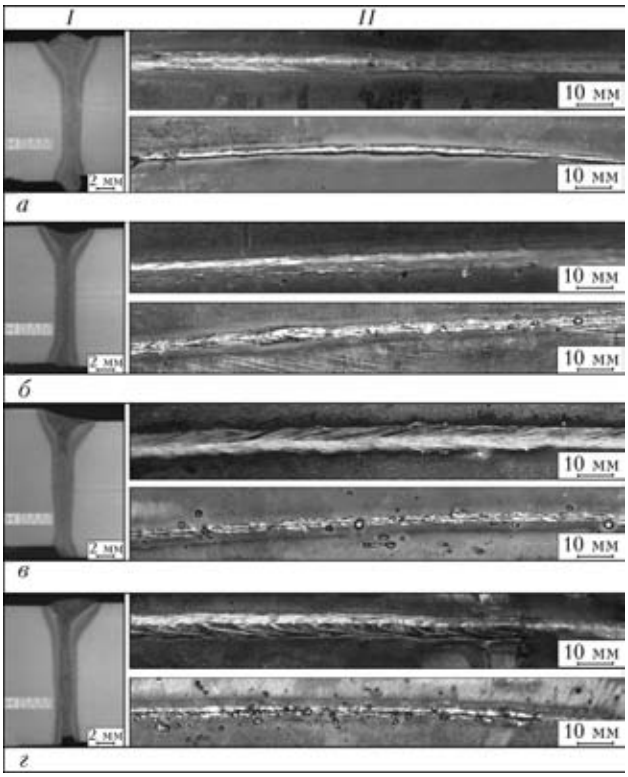


Рис. 3. Макрошлифы (*I*) и внешний вид гибридного лазерно-дугового шва (*II*), выполненного на трубе из стали класса прочности X65, имеющей внешний диаметр 914 мм и толщину стенки 16 мм: *а* — угол 0° (v_d = 14 м/мин, v_s = 2,2 м/мин, L_{LB} = +5 %, $I_д$ = 364 А, $U_д$ = 35,5 В); *б* — угол 60° (v_d = 10 м/мин, v_s = 2,2 м/мин, L_{LB} = –5 %, $I_д$ = 245 А, $U_д$ = 28,9 В); *в* — угол 120° (v_d = 7 м/мин, v_s = 1,9 м/мин, L_{LB} = –10 %, $I_д$ = 180 А, $U_д$ = 22,0 В); *г* — угол 180° (v_d = 6 м/мин, v_s = 1,8 м/мин, L_{LB} = –12 %, $I_д$ = 174 А, $U_д$ = 21,5 В)

Возможности сканирующей оптики были исследованы нами, в том числе при определении максимального зазора в стыке, при котором обеспечивается надежное сплавление кромок [11]. В результате проведения серии сварочных экспериментов на плоских образцах из стали класса прочности X65 толщиной 16 мм установлено, что стабильный процесс без дефектов сплавления реализуется при максимальном зазоре 0,7 мм, при сварке с использованием обычной оптики зазор составляет примерно 0,3 мм. Максимально допустимое смещение кромок составляет около 2 мм. Приведенные допуски относятся только к нижнему положению сварки, для установления значений допусков в других пространственных положениях сварки требуется проведение ряда экспериментов.

С целью оценки возможности исправления дефектов сварного шва, выполненного способом гибридной сварки, был протестирован ряд ремонтных швов. Испытания проводили как в нижнем положении сварки, так и в вертикальном на участке от 60 до 70°. Участки кольцевого стыка с дефектами типа несплавление корня проваривали гибридной сваркой поверх имеющегося дефектного шва с применением формирующего газа. Для всех выполненных ремонтных швов было харак-

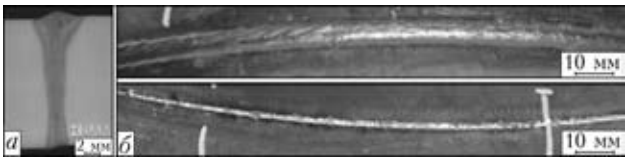


Рис. 4. Макрошлиф (*а*) и внешний вид (*б*) потолочного гибридного лазерно-дугового шва, выполненного с использованием сканирующей оптики и формирующего газа: P_L = = 19 кВт; v_d = 6 м/мин; v_s = 1,8 м/мин; L_{LB} = –12 %; $I_д$ = 174 А; $U_д$ = 21,5 В

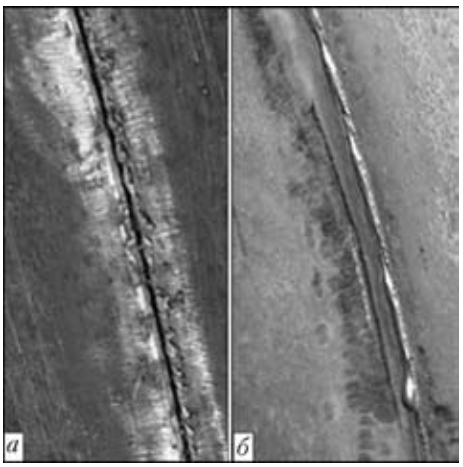


Рис. 5. Дефект корня шва (*а*) и ремонтный шов (*б*)

Рис. 6. Образец, выполненный полуорбитальной гибридной сваркой

терно формирование корня удовлетворительного качества. Один из примеров такого шва, выполненного в вертикальном положении, показан на рис. 5. Проведенные испытания показали потенциальную возможность исправления дефектных участков швов при повторном проходе. Систематические исследования в этом направлении, в том числе в потолочном положении, к моменту написания статьи проведены не были.

Накопленные в результате исследовательской работы знания и опыт позволили нам изготовить серию образцов (рис. 6), которые были представлены на международной отраслевой выставке-ярмарке «Schweiβen & Schneiden 2010», г. Эссен, Германия.

Внутренние дефекты и механические свойства сварных соединений. Для оценки качества и механических свойств изготовленных швов были привлечены методы как разрушающего, так и неразрушающего контроля. Металлографические и рентгенографические исследования сварных соединений из стали класса прочности Х65 показали наличие протяженных кристаллизационных трещин, расположенных по центральной линии шва параллельно свариваемым кромкам,

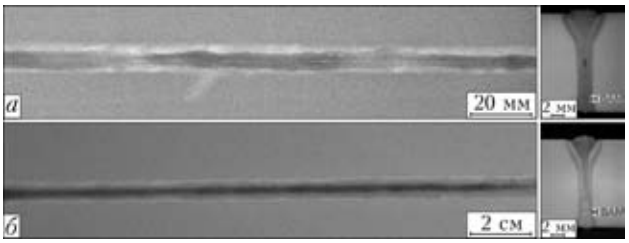


Рис. 7. Рентгенографические снимки и макрошлифы гибридных сварных швов, выполненных на сталях класса прочности Х65 (*а*) и Х56 (*б*)

по глубине залегающих примерно в середине толщины стенки трубы (рис. 7, *а*). В сварных соединениях из стали класса прочности Х56 указанные дефекты обнаружены не были (рис. 7, *б*).

Исследуемые стали отличаются схожими химическими составами (см. табл. 2). Гибридную сварку колец из сталей обоих классов прочности производили на одинаковых режимах. В числе возможных причин повышенной чувствительности стали класса прочности Х65 к образованию кристаллизационных (горячих) трещин следует отметить влияние зональной ликвации, а также свойства структуры металла труб, обусловленных режимами термомеханической прокатки. Структура стали класса прочности Х65 в отличие от Х56 характеризуется наличием перлитной полосчатости (рис. 8), что приводит к высокой анизотропии механических свойств проката. Вопрос о влиянии ее структуры на образование горячих трещин при лазерной и лазерно-дуговой сварке исследуется нами в настоящее время.

На кольцевых пробах из стали класса прочности Х65 с содержанием углерода 0,09 мас. % проведены измерения микротвердости металла шва и околошовной зоны в соответствии с DIN EN 1043–2. Определено, что максимальные значения микротвердости не отвечали требованиям указанного нормативного документа, в связи с чем принято решение об использовании предварительного подогрева для обеспечения требуемых значений микротвердости. Сварочные испытания с подогревом проведены на сегментах колец в нижнем положении. Нагрев деталей перед сваркой

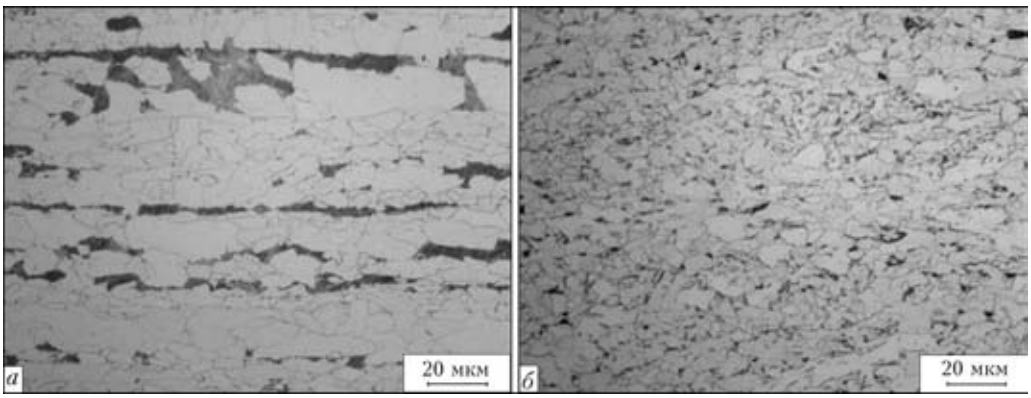


Рис. 8. Микроструктуры основного металла: *а* — сталь класса прочности Х65; *б* — Х56

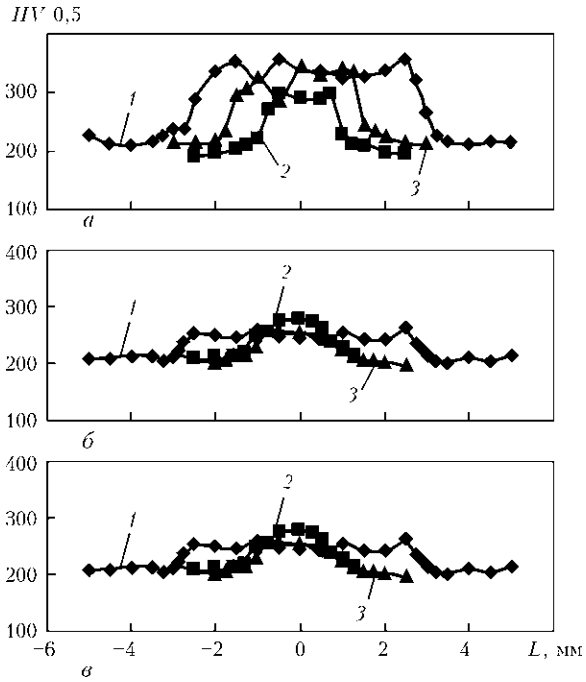


Рис. 9. Распределение микротвердости поперек сварного соединения, выполненного без подогрева (*а*), с подогревом до 200 (*б*) и 300 °С (*в*): *1–3* — соответственно верхняя, центральная и нижняя (корневая) зоны шва; *L* — расстояние от центра шва

осуществляли с помощью нагревателей сопротивления до температуры от 150 до 350 °С с шагом 50 °С. Термоэлементы типа К (никельхром–никель), зафиксированные на обратной стороне пробы на расстоянии 0,7 мм от стыка, использовали для контроля температуры подогрева, а также для измерения температурного цикла сварки. Результаты измерения микротвердости металла шва и околошовной зоны при сварке с подогревом и без подогрева приведены на рис. 9.

Установлено, что с повышением температуры подогрева процесс сварки реализуют с меньшей мощностью лазерного излучения, чем та, которая необходима при сварке «холодных» проб. Мощность лазера при температуре предварительного подогрева 350 °С может быть снижена до 17 кВт. Измеренное в зоне термического влияния время охлаждения $t_{8/5}$ (в интервале температур от 800 до 500 °С) составляет около 1 с при сварке без подогрева. С подогревом до 350 °С время $t_{8/5}$ увеличивается до 16 с. Максимальная микротвердость металла шва при этом находится на уровне основного металла (*HV* 220). Достигнутые с применением предварительного подогрева значения микротвердости соответствуют требованиям действующих норм в области производства труб из материалов, не предназначенных для работы в кислой среде, например DNV-OS-F101.

При использовании нагревателей сопротивления при подогреве полной окружности стыка необходимо учитывать, что это довольно длительная технологическая операция, которая может негативно сказаться на темпе прокладки трубопровода. В качестве альтернативы нами рассматривается локальный подогрев кромок стыка, например с помощью индуктора, перемещаемого вместе со сварочной головкой. В зависимости от конфигурации и расположения индуктора дополнительное тепловложение в материал возможно как непосредственно перед сваркой, так и после нее. При этом мощность индуктора должна обеспечивать прогрев свариваемого материала на всю толщину при заданной скорости процесса сварки.

На примере труб диаметром 914 мм с толщиной стенки 16 мм успешно продемонстрирована сварка кольцевого стыка в два полуорбитальных прохода на спуск со средней скоростью 2 м/мин при мощности лазера 19 кВт. Потолочное положение сварки (участок от 150 до 180°) является наиболее сложным с точки зрения обеспечения качественного формирования корня.

Адаптация скорости подачи сварочной проволоки, скорости сварки, а также применение формирующего газа заметно улучшают качество корня в потолочном положении сварки. Сканирующая оптика зарекомендовала себя как эффективный инструмент, позволяющий расширить допуски на зазоры в стыке, а также компенсировать незначительные ошибки позиционирования сварочной головки относительно стыка. Установленный для свариваемой толщины 16 мм зазор, при котором еще возможен стабильный процесс без дефектов сплавления, составляет 0,7 мм, при обычной сварке он составляет 0,3 мм. С применением предварительного подогрева достигнуто увеличение времени охлаждения $t_{8/5}$ с 1 до 16 с, что способствовало значительному снижению микротвердости в зоне термического влияния.

Настоящие исследования проводятся в рамках проекта MNPQ FK19/07 при финансовой поддержке федерального Министерства образования и исследований Германии. Авторы выражают благодарность производственным партнерам, фирмам «Vietz GmbH» и «HighYag» за плодотворное сотрудничество и предоставление оборудования для проведения экспериментов.

1. *Widgery D. J.* Mechanised welding of pipelines // Svetsaren — the ESAB welding and cutting journal. — 2005. — № 1. — P. 23–26.
2. *Study* on all position electron beam welding of large diameter pipeline joints (Rep. 1, 2) / S. Koga et al. // Welding Intern. — 2001. — № 15. — P. 28–33, 92–99.
3. *Laser* orbital welding applied to offshore pipe line construction / Y. Gainand et al. // Pipeline Techn. Elsevier Science. — 2000. — II. — P. 327–343.
4. *Development* of an all-position YAG laser butt welding process with addition of filler wire / S. Fujinaga et al. // Welding J. — 2005. — № 19. — P. 441–446.
5. *Laser-hybrid* welding of thick plates up to 32 mm using a 20 kW fibre laser / M. Rethmeier et al. // Trans. Jap. Weld. Res. Instit. — 2009. — **27,** № 2. — P. 74–79.

6. *Influence* of tolerances to weld formation and quality of laser-GMA-hybrid girth welded pipe joints / J. Neubert et al. — IV-1003–09.
7. *Circumferential* welding of gas pipeline pipes using hybrid technology with fibre-delivered LASER beam / M. Fersini et al. // Welding Intern. — 2009. — **23**, № 6. — P. 450–459.
8. *Hybrid* laser/GAS metal arc welding of high strength steel gas transmission pipelines / D. Harris Ian et al. // Proc. of IPC2008 7th Intern. pipeline conf., Sept. 29– Oct. 3, 2008, Calgary, Alberta, Canada. — IPC2008-64129.
9. *Development* of a hybrid laser arc welding system for pipeline construction / D. Begg et al. // Ibid. — IPC2008-64599.
10. *Guidelines* for approval of CO_2-laser welding in ship hull construction classification societies unified, 1996.
11. *High* power fibre laser welding for pipeline applications / A. Gumenyuk et al. // Proc. of LAMP2009 5th congress on laser advanced materials processing, July 2009, Kobe.

The results of development and testing of hybrid laser arc welding of large diameter pipes were given. The main results of carried out research work were generalized, in particular, peculiarities of weld formation in different regions of circumferential joints were discussed, mechanical properties of performed welds given and perspectives of existing technique applicable to construction of main pipelines evaluated.

Поступила в редакцию 05.05.2010

ПОРОШКОВЫЕ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ И УПРОЧНЯЮЩЕЙ НАПЛАВКИ МОЛОТКОВ РОТОРНЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ

В ряду дробильно-помольного оборудования заметное место занимают роторные дробилки. Они относятся к оборудованию ударного действия, с помощью которого процесс измельчения материала осуществляется под воздействием механического удара. Такие нагрузки могут возникнуть при взаимном столкновении частиц измельчаемого материала, их столкновении с неподвижной поверхностью (корпуса, решетки и др.), столкновении материала и движущихся рабочих органов машины.

Внешний вид восстановленного молотка

Дробилки указанного типа просты по конструкции, компактны, имеют небольшую массу, высокие производительность и степень измельчения (i = = 15…20, а иногда и до 50). К дробилкам ударного действия относятся роторная и молотковая дробилки. Основным различием между ними является способ крепления рабочего органа. В роторных дробилках закреплены жестко или практически жестко, а в молотковых — ротор состоит из насаженных на вал отдельных дисков и отделенных друг от друга дистанционными шайбами. Через расположенные по окружности отверстия в дисках проходят оси насаженных шарнирно молотков, которые при вращении вала измельчают материал. Гибкая подвеска молотков на роторе позволяет пропускать твердые, инородные предметы без вреда для дробильных элементов.

Дробилки применяются для измельчения малоабразивных материалов средней прочности и мягких материалов, а также на угольных электростанциях, предприятиях добывающей и металлургической промышленности для дробления угля, руды, известняков, мела, гипса, минералов и солей.

В зависимости от размера кусков дробимого материала и требуемой степени его измельчения применяют молотки различной формы и массы (от 3,5 до 180 кг), которые изготавливают литыми из низколегированных сталей, стали Гадфильда или стальными кованными. Как правило, для обеспечения непрерывной работы для одной дробилки имеется несколько комплектов молотков, которые восстанавливаются по мере износа и замены.

Как показал опрос значительного количества предприятий, имеющих в своем арсенале подобные дробилки, в настоящее время их восстановительный ремонт выполняется дуговой наплавкой с использованием электродов Т-590 и Т-620.

Для выполнения упрочняющей и ремонтной наплавки молотков ООО «ТМ ВЕЛТЕК» разработаны, опробованы на ряде предприятий и предлагаются для широкого применения самозащитные порошковые проволоки.

Для ремонта молотков из низколегированных сталей рекомендуется применение проволоки ВЕЛТЕК Н290 (послой) + проволока ВЕЛТЕК Н625 (упрочняющий слой), а молотков из стали Гадфильда — проволоки ВЕЛТЕК Н216 + ВЕЛТЕК Н625.

Проволоки изготавливаются диаметром 2,0 мм. Восстановление геометрии изделий выполняется ниточными швами по шаблону. Принудительное формирование наплавляемого металла не требуется.

В. Н. Упырь, инж.

УДК 621.791.3.04

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Ti–Zr–Fe

Чл.-кор. НАН Украины **В. Ф. ХОРУНОВ**, **С. В. МАКСИМОВА**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Г. М. ЗЕЛИНСКАЯ, канд. физ.-мат. наук (Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины)

Исследованы температурные интервалы плавления сплавов системы Ti–Zr–Fe, построена поверхность ликвидуса тройной системы в плоском и объемном изображении. Установлена эвтектическая впадина, на которой располагаются сплавы, перспективные с точки зрения разработки припоев. Исследована микроструктура и морфологические особенности сплавов при разных скоростях охлаждения. На основе полученных результатов разработаны припои для пайки алюминидов титана.

Ключевые слова: пайка, припой, эвтектика, структура, температура ликвидуса, адгезионно-активные сплавы, скорость охлаждения, фазовый состав

Перспективной базовой системой при создании адгезионно-активных припоев для пайки титановых сплавов, в том числе алюминидов титана, является система Ti–Zr, в которой образуется непрерывный ряд твердых растворов. Легирование данной системы другими элементами, например, марганцем, железом, хромом, позволяет несколько снизить температуру плавления благодаря образованию низкотемпературных эвтектик.

При легировании титана железом со стороны титана наблюдается образование эвтектики при температуре 1085 °С [1], по другим источникам температура эвтектики составляет 1100 °С. Растворимость железа в β-титане составляет 22 % ат. В системе Zr–Fe, содержащей около 24 ат. % железа, тоже существует низкотемпературная эвтектика при температуре 928 °С между β-Zr и Zr_2Fe. Благодаря приемлемому температурному интервалу плавления и хорошей смачивающей способности сплавы системы Ti–Zr–Fe представляют интерес в качестве основы при разработке припоев для пайки титановых сплавов, в том числе интерметаллидных. К сожалению, фазовые равновесия в тройных системах Ti–Zr–Me, перспективных в качестве основы для создания припоев, исследованы недостаточно.

Целью данной работы является исследование адгезионно-активных сплавов на базе системы Ti–Zr–Fe, изучение температурного интервала плавления и особенностей структурообразования при разных скоростях охлаждения.

Для построения поверхности ликвидуса сплавов системы Ti–Zr–Fe составили план эксперимента, в соответствии с которым выплавили 36 опытных сплавов системы Ti–Zr–Fe, которые обозначены точками на диаграмме (рис. 1). Содержание элементов в сплавах варьировалось в следующих пределах, ат. %: 8,25…71,75 Zr; 6,0…79,75 Fe; 4,0…76,75 Ti. На рис. 1 приведены также двойные диаграммы в соответствии с [2].

Температуры плавления определяли с помощью дифференциального термического анализа на приборе ВДТА-8М3 в тиглях из BeO при скорости нагрева 40 °С/мин. С помощью симплекс-решетчатого метода планирования эксперимента [3–5], который используют для построения поверхностей ликвидуса тройных систем, ограниченных двумя двойными системами эвтектического типа и системой с непрерывным рядом твердых растворов, литературных и экспериментальных данных (температурного интервала плавления), построена поверхность ликвидуса трехкомпонентной системы Ti–Zr–Fe* (рис. 2).

На объемной поверхности ликвидуса наблюдается эвтектическая впадина, где существуют эвтектики с минимальной температурой плавления, приемлемой для их использования в качестве припоев. Типичным представителем таких эвтектических сплавов является Ti–19Zr–20Fe с температурным интервалом плавления 940…960 °С, структура которого состоит из первичных дендритов твердого раствора и эвтектики (рис. 3, *а*).

Легирование сплава Ti–19Zr–20Fe алюминием (до 11 %) и увеличение количества циркония на 8,5 % влияет на морфологические особенности структуры (рис. 3, *б*; 4). Установлено, что в виде дендритов кристаллизуется первичная фаза, обогащенная цирконием и содержащая 21,5 % Fe и 15,26 Al (рис. 4, табл. 1, спектр 1). Она является основной фазой, между дендритами которой наблюдается небольшое количество фазы Ti–22,5Zr–7,65Al–5,1Fe. В виде единичных белых точечных включений выделяется высокодисперсная фаза (рис. 4, табл. 1, спектр 3) с повышенным содер-

*Методика расчета разработана М. О. Каратеевым и В. В. Вороновым.

© В. Ф. Хорунов, С. В. Максимова, Г. М. Зелинская, 2010

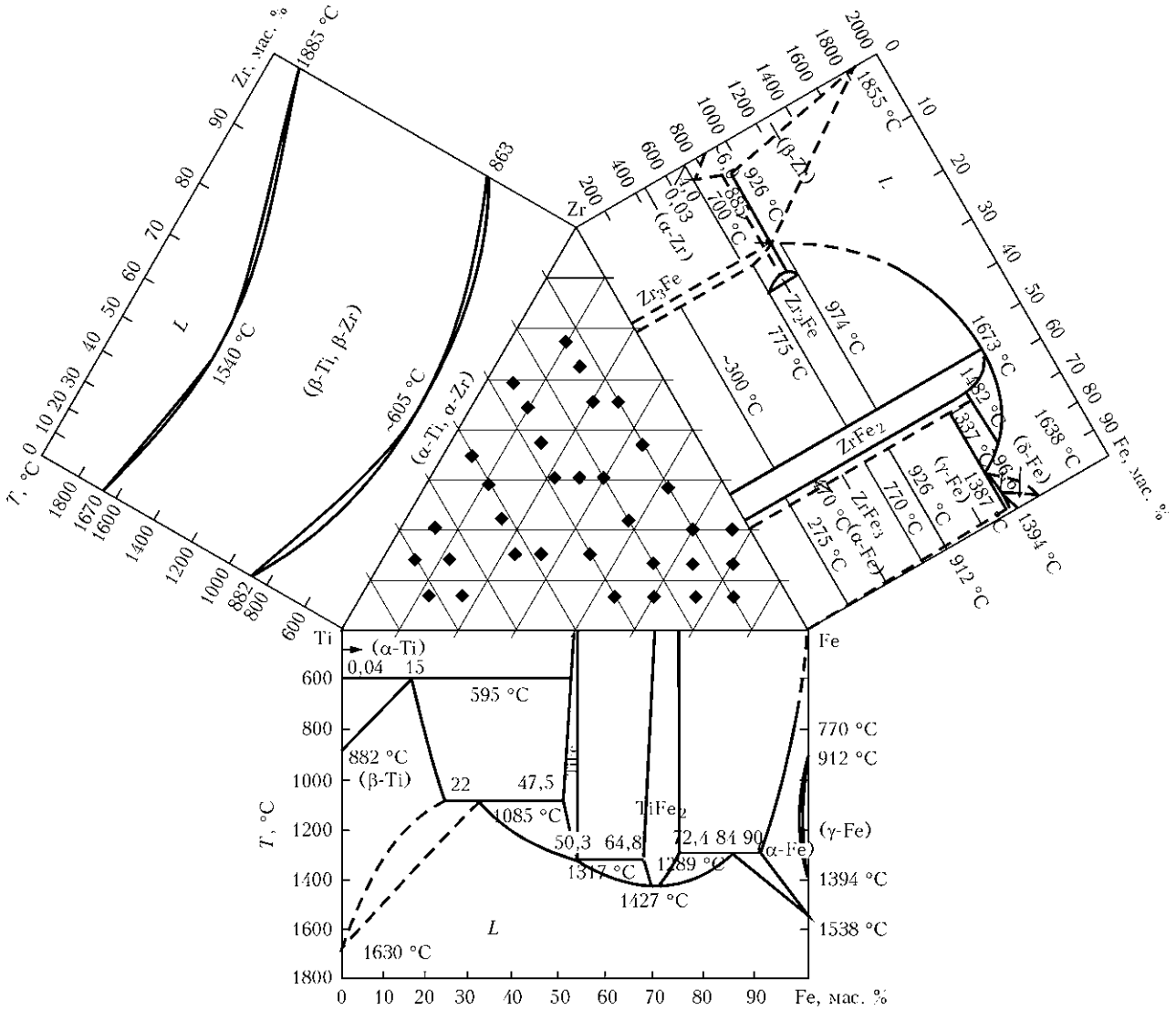


Рис. 1. Положение экспериментальных сплавов системы Ti–Zr–Fe с примыкающими двойными диаграммами

жанием циркония (35,32 %). Данный сплав отличается от предыдущих составов хрупкостью.

Известно, что на структурообразование сплавов, в том числе эвтектических, большое влияние оказывает скорость охлаждения [6].

Сплавы, исследованные выше, выплавляли в лабораторной электродуговой печи на медной водоохлаждаемой подине.

Для получения более однородной и высокодисперсной структуры исследуемых сплавов применяли метод диспергирования сплава из жидкого состояния (с помощью электронно-лучевого нагрева). Суть метода заключается в следующем. Расплав металла из промежуточной емкости сливается на вращающийся барабан-кристаллизатор, где он намораживается до наращивания гарнисажа необходимой толщины [7, 8]. Затем барабану-кристаллизатору с гарнисажем сообщается высокая скорость вращения (порядка 2000 об/мин) и поверхность гарнисажа оплавляется концентрированным электронным лучом. Под воздействием центробежных сил жидкий металл срывается с поверхности гарнисажа по касательной к фокальному пятну концентрированного электронного луча в виде потока жидких дисперсных капель. Поток жидких капель расплава, имеющих малый диаметр (порядка 1 мм) и высокую скорость (порядка 10 м/с), направляют на формообразующую поверхность (кристаллизатор). Там под воздействием напорного давления капли растекаются в тонкий слой (порядка 0,1 мм) и затвердевают без образования жидкой ванны. Некоторые из них кристаллизуются в виде сферических порошинок диаметром 1…3 мм, некоторые в виде капель неправильной формы.

Таблица 1. Химический состав расчетного сплава Ti–27,5Zr–17,7Fe–11,4Al, ат. %

Номер спектра	Al	Ti	Fe	Zr
1	15,26	33,51	21,5	29,73
2	7,65	64,76	5,10	22,50
3	9,39	43,57	11,72	35,32

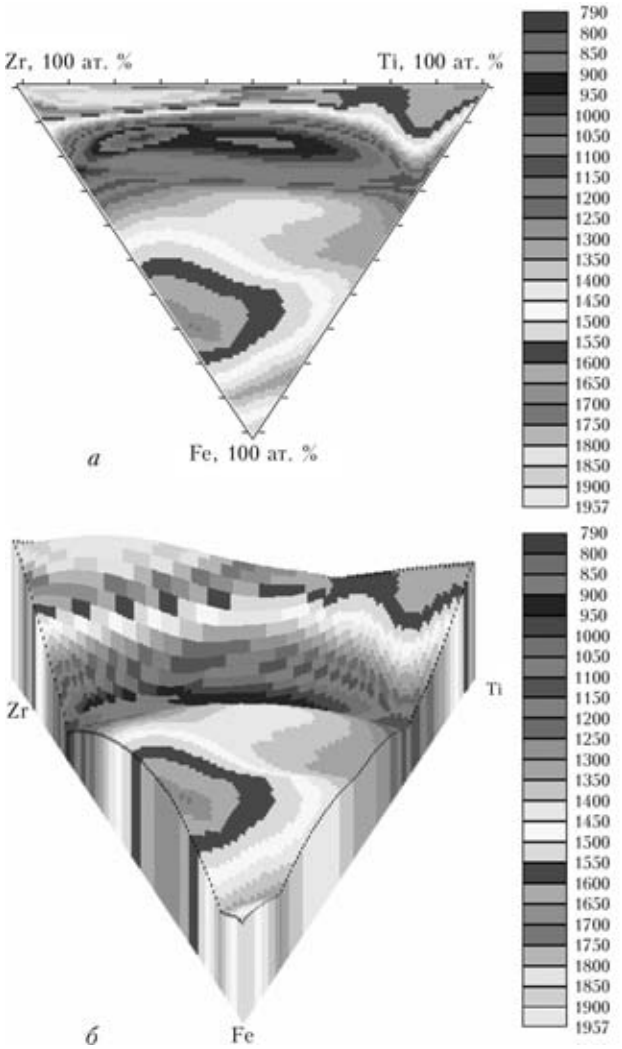


Рис. 2. Плоское (*а*) и объемное (*б*) изображение поверхности ликвидуса сплавов системы Ti–Zr–Fe

Структура сплава Ti–19Zr–20Fe, полученного с помощью электронно-лучевого переплава, состоит из первичных кристаллов 73,8Ti–15,3Zr–10,9Fe округлой формы довольно крупного размера (рис. 5, *а*) и эвтектики, ведущей фазой которой является соединение $(TiZr)_2Fe$ с высокой атомарной долей железа (31,23 %) (рис. 6, табл. 2, спектр 1). Второй составляющей эвтектики является фаза, химический состав которой близок к

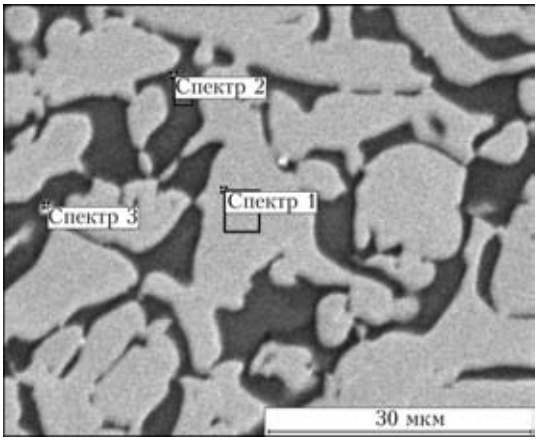


Рис. 4. Микроструктура и участки определения химического состава структурных составляющих расчетного сплава Ti–27,5Zr–17,7Fe–11,4Al

Таблица 2. Химический состав эвтектики, ат. %

Номер спектра	Ti	Fe	Zr
1	43,97	31,23	24,81
2	67,93	15,62	16,45

составу первичных кристаллов (рис. 6, табл. 2, спектр 2). С увеличением скорости охлаждения возрастает дисперсность структурных составляющих (рис. 5, *б–е*). Скорость охлаждения определяли расчетным путем при моделировании тепловых процессов быстрого затвердевания диспергированных расплавов [8, 9].

Так, структура сплава при скорости охлаждения, равной 10^2 °С/с, отличается от предыдущей не только размером первичных дендритов, но и морфологическими особенностями эвтектики, обусловленными градиентом температур [6]. Чем меньше диаметр сферических порошинок, тем больше скорость охлаждения, меньше размер структурных составляющих эвтектики и выше ее дисперсность (рис. 5, *г*, *д*).

При дальнейшем увеличении скорости охлаждения до $6 \cdot 10^4$ °С/с, даже при кристаллизации капель в виде тонкой полосы, размер структурных составляющих сплава продолжает уменьшаться (рис. 5, *е*).

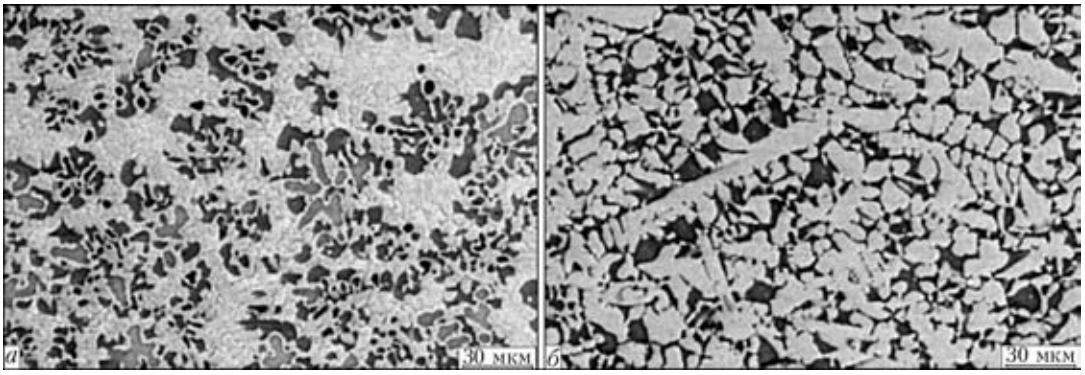


Рис. 3. Микроструктуры сплавов Ti–19Zr–20Fe (*а*) и Ti–27,5Zr–17,7Fe–11,4Al (*б*) в состоянии после литья

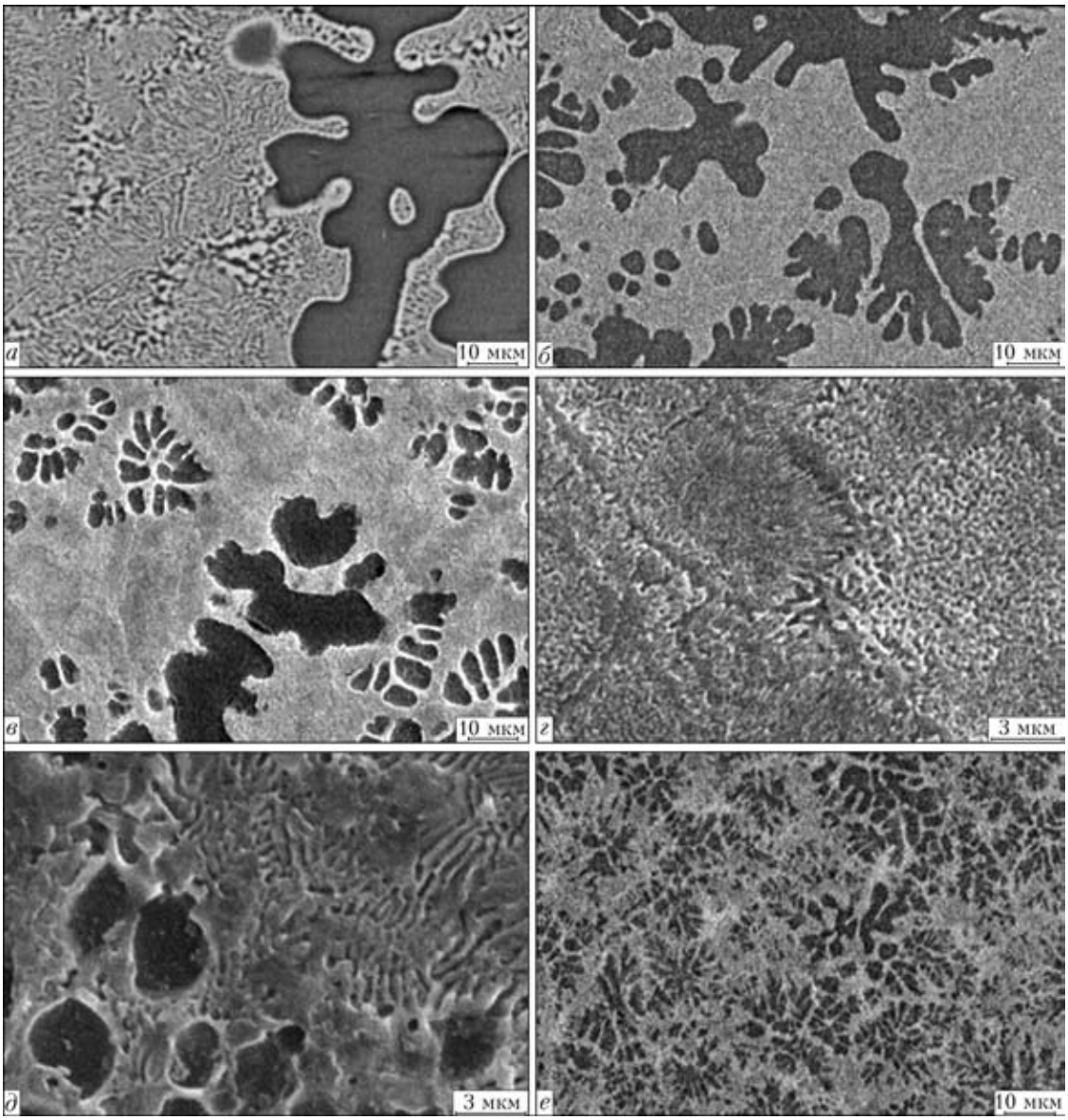


Рис. 5. Микроструктуры сплава Ti–19Zr–20Fe, полученные с разной скоростью охлаждения: *а* — $v_{охл}$ = 2…5; *б–д* — $2 \cdot 10^2$; *е* — $6 \cdot 10^4$, °С/с

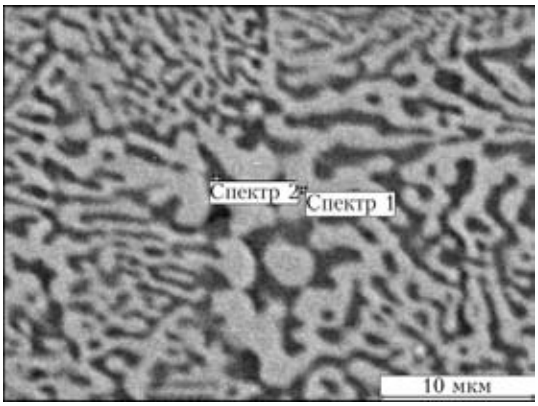


Рис. 6. Микроструктура и исследуемые участки эвтектики

Применение сверхбыстрой закалки в атмосфере высокочистого гелия позволило получить однородную гомогенную структуру и равномерное распределение химических составляющих припоя Ti–19Zr–20Fe по ширине ленты (рис. 7, *а–г*). Скорость охлаждения расплава (т. е. скорость в момент затвердевания — формирования ленты) оценивается как $(2…5) \cdot 10^5$ °С/с. Ленту можно использовать в виде закладных элементов при пайке, что очень важно, но она не имеет достаточной пластичности. Даже если в момент кристаллизации она была в аморфном состоянии, то резкое снижение скорости охлаждения до $(2…5) \cdot 10^3$ °С/с после ее съема с диска может привести к частичной кристаллизации и на выходе она находится в аморфно-кристаллическом состоянии.

Результаты рентгеноструктурного анализа хорошо согласуются с металлографическими исследованиями (рис. 8, 9, *а*). На рентгенограмме быстрозакаленной ленты Ti–19Zr–20Fe (дифрактометр «ДРОН-3», излучение K_α) на фоне диффузного гало обнаружены фазы раствора β-TiZr и

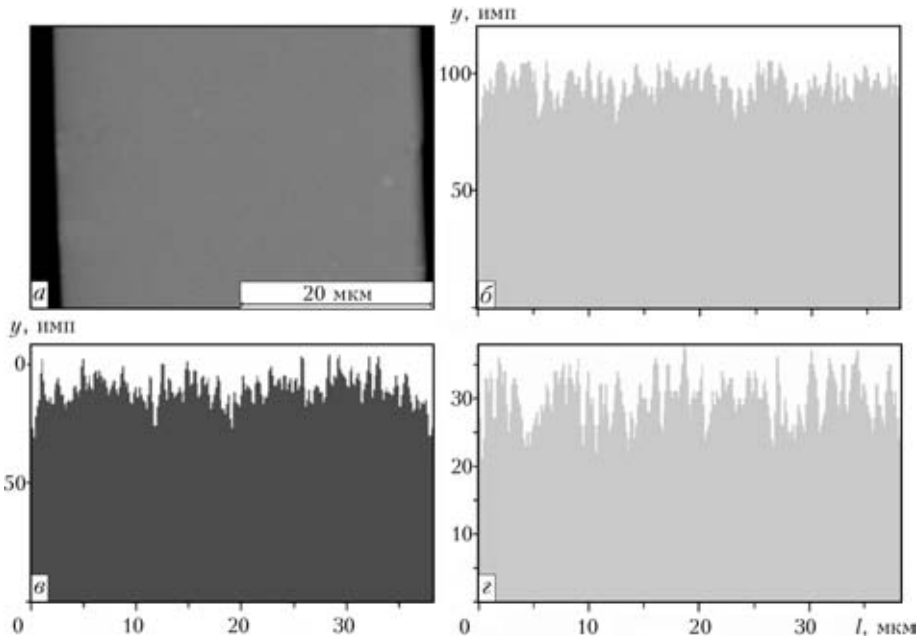


Рис. 7. Микроструктура быстрозакаленной ленты Ti–19Zr–20Fe (в отраженных электронах) (*а*) и качественное распределение титана (*б*), циркония (*в*), железа (*г*) по ширине ленты вдоль линии сканирования

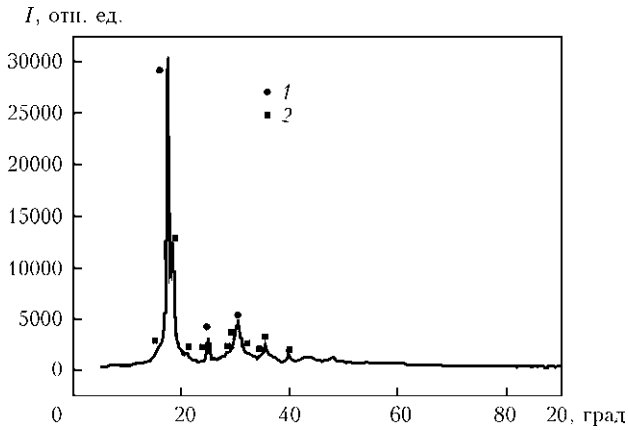


Рис. 8. Рентгенограмма аморфно-кристаллической ленты Ti–19Zr–20Fe: *1* — раствор β-TiZr; *2* — $Fe(TiZr)_3$

$Fe(TiZr)_3$ (рис. 8). Известно, что на структуру сплавов, кроме скорости охлаждения, оказывают влияние условия выплавки, в частности, время выдержки жидкой ванны, ее температура в момент затвердевания (формирования ленты). При получении быстрозакаленных лент в других условиях возможно образование иных структурных составляющих.

Необходимо отметить, что параметр высоты структурного фактора $i(s)$, связанный с плотностью упаковки атомов, является очень чувствительной характеристикой, позволяющей судить о наличии в аморфной ленте доли кристаллической фазы, что связано с рядом технологических факторов при получении аморфных лент из расплава [10]. Высота структурного фактора (рис. 10) является подтверждением аморфно-кристаллического состояния сплава Ti–19Zr–20Fe.

Как видим, для ленты сплава Ti–27,5Zr–17,7Fe–11,4Al (рис. 11) наблюдается типичная дифракционная картина в виде диффузных максимумов с четко выраженным эффектом с раздвоенным вторым максимумом, что всегда характерно для аморфных материалов [11]. Быстрозакаленная лента сплава Ti–27,5Zr–17,7Fe–11,4Al оказалась аморфной (рис. 9, *б*; 11).

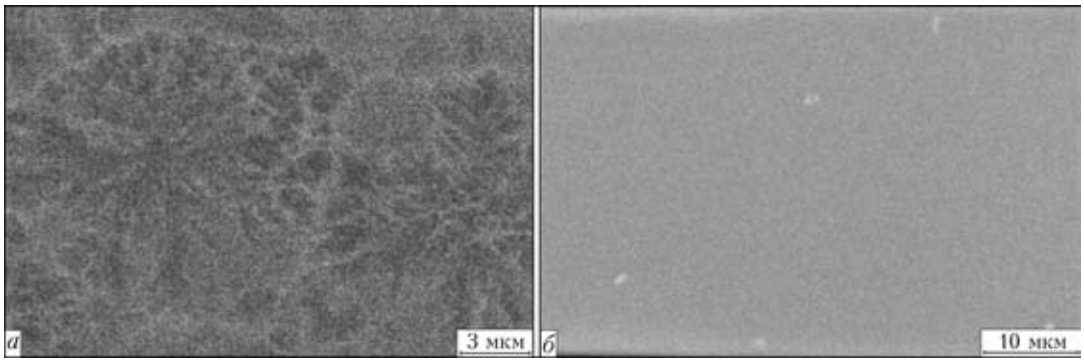


Рис. 9. Микроструктуры быстрозакаленной ленты Ti–19Zr–20Fe (*а*) и Ti–27,5Zr–17,7Fe–11,4Al (*б*)

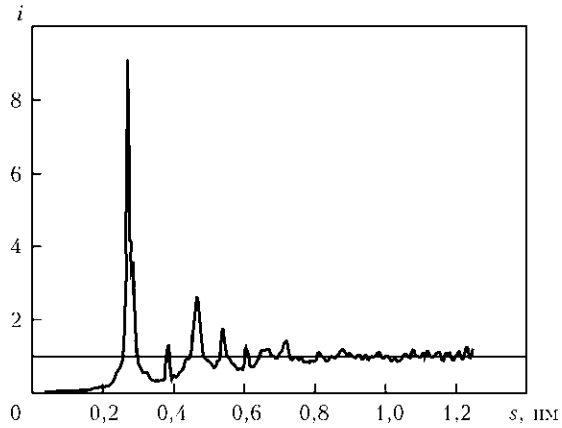


Рис. 10. Структурный фактор аморфно-кристаллической ленты Ti–19Zr–20Fe

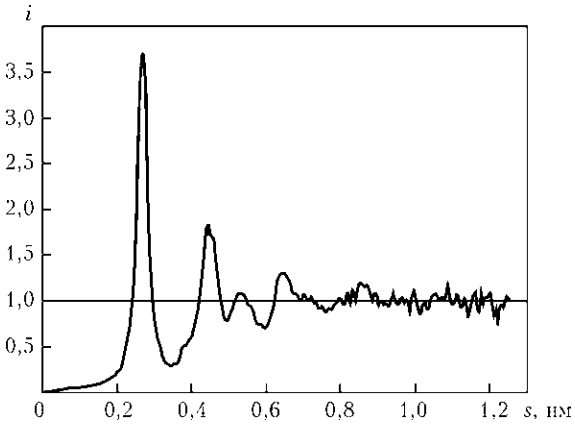


Рис. 11. Структурный фактор аморфной ленты Ti–27,5Zr–17,7Fe–11,4Al

Выводы

1. Исследованы сплавы на базе системы Ti–Zr–Fe в широком интервале концентраций. Построенная поверхность ликвидуса тройной системы позволила установить положение эвтектической впадины, на которой располагаются сплавы с низкой температурой плавления.

2. На основе полученных результатов разработан припой Ti–19Zr–20Fe с минимальной температурой солидуса. Определено, что при увеличении скорости охлаждения до 10^2 °С/с структура сплава состоит из первичных кристаллов твердого раствора 73,8Ti–15,3Zr–10,9Fe и эвтектики.

3. С повышением скорости охлаждения сплава Ti–19Zr–20Fe (до 10^2 °С/с) при его диспергировании с помощью электронно-лучевого оплавления размер структурных составляющих уменьшается примерно в 3…4 раза.

4. Применение метода сверхбыстрой закалки ($v_{охл}$ = (2…5)·10^5 °С) обеспечило получение гомогенной ленты сплава Ti–19Zr–20Fe в аморфно-кристаллическом состоянии. С помощью рентгеноструктурного фазового анализа установлено наличие твердого раствора β-TiZr и фазы Fe $(TiZr)_3$.

1. *Диаграммы* состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3-х т. / Под ред. Н. П. Лякишева. — М.: Машиностроение, 1997. — Т.2. — 1024 с.
2. *Massalski T. B.* Binary alloy phase diagrams. — 2nd ed. — Ohio: ASM Internat., Materials Park, 1990.
3. *Ганиев И. Н., Железняк Л. В.* Построение поверхности ликвидуса системы Al–Si–Ge методом симплексного планирования эксперимента // Металлы. — 1983. — № 4. — С. 184–187.
4. *Зедгенидзе И. Г.* Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. — М.: Наука, 1976. — 390 с.
5. *Scheffe H.* Experiments with mixtures // J. Roy. Stat. Soc. — 1958. — **20**, № 2. — P. 334.
6. *Элиот Р.* Управление эвтектическим затвердеванием. — М.: Металлургия, 1987. — 352 с.
7. *Жук Г. В., Тригуб Н. П.* Новый метод диспергирования расплава в электронно-лучевых установках и оборудование для его реализации // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — № 4. — С. 18–20.
8. *Электронно-лучевая* плавка / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.
9. *Жук Г. В., Козлитин Д. А., Пап П. А.* Моделирование тепловых процессов быстрого затвердевания при литье диспергированных расплавов // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1993. — № 3. — С. 44–49.
10. *Немошкаленко В. В., Романова А. В., Ильинский Ф. Г.* Аморфные металлические сплавы. — Киев: Наук. думка, 1987. — 245 с.
11. *Гольдер Ю. Г.* Металлические стекла // Технология легких сплавов. — 1978. — № 6. — С. 74–93.

Melting temperature ranges of alloys of the Ti–Zr–Fe system were investigated, and liquidus surface of the ternary system in 2D and 3D graphic presentation was plotted. The eutectic pit containing the promising alloys for development of brazing filler metals was determined. Microstructure and morphological peculiarities of the alloys at different cooling rates were investigated. Filler metals for brazing titanium aluminides were developed on the basis of the investigation results.

Поступила в редакцию 09.03.2010

УДК 621.791.4

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА ТОКА ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ

В. С. ГВОЗДЕЦКИЙ, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Определена область устойчивой работы конвертера по напряжению на дуге. Установлена зависимость коэффициента усиления тока конвертера от его КПД, напряжения блока питания и падения напряжения на дуге. Найдена аналитическая зависимость тока дуги от падения напряжения на ней, напряжения блока питания и частоты коммутации. Показана необходимость использования ферритового сердечника в дросселе, индуктивность которого уменьшается с увеличением тока. Обоснована необходимость буферного конденсатора.

Ключевые слова: микроплазменная сварка, плазмотрон, плазма, факел плазмы, падение напряжения на дуге, транзисторный модуль, снаббер, индуктивность, дроссель, буферный конденсатор, частота коммутации

Исследования по микроплазменной сварке в Институте электросварки им Е. О. Патона начались во второй половине 1960 годов. Работы велись параллельно как по фундаментальным исследованиям малоамперной дуги, так и по прикладным вопросам разработки технологий и оборудования. Особенности каждого способа сварки требовали разработки не только новых технологий и схем питания дуги, но и новых специализированных источников питания, учитывающих эти особенности.

Широкомасштабное внедрение микроплазменной сварки во всех отраслях промышленности пришлось на 1970–1985 годы. Было изготовлено и передано в промышленность более 15 тыс. ед. оборудования и автоматов для сварки тонких металлов, в том числе алюминия и его сплавов. Оборудование и технологии продавали зарубежным фирмам Швеции, Японии, Франции и других стран.

В настоящее время спрос на микроплазменную сварку существенно сократился. Одной из основных причин является устаревшее оборудование. Оно габаритное, энерго- и материалозатратное, трудно поддается ремонту из-за устаревших комплектующих. Его нельзя применить для высокоскоростных процессов сварки тонколистовых конструкций из алюминия и его сплавов.

Поэтому разработка малогабаритного высокодинамичного оборудования на основе серийных инверторных блоков питания и конвертеров является актуальной и перспективной задачей.

Современная промышленность выпускает малогабаритные инверторные блоки питания с высокой энергоемкостью (около 536 Вт/кг) в большом ассортименте и количестве, а также мощные полевые и биполярные транзисторы по доступным ценам. Все это создает предпосылки для разработки нового поколения оборудования для микроплазменной сварки с высокими динамическими свойствами с аналоговым или цифровым управлением режимами сварки.

Целью данной работы является всесторонний анализ работы конвертера понижающего типа применительно к разработке источника питания для микроплазменной сварки, а также выявление новых возможностей для создания перспективных технологий, отвечающих современным требованиям, что позволит увеличить спрос на простой, надежный и эффективный способ сварки металлов малых толщин.

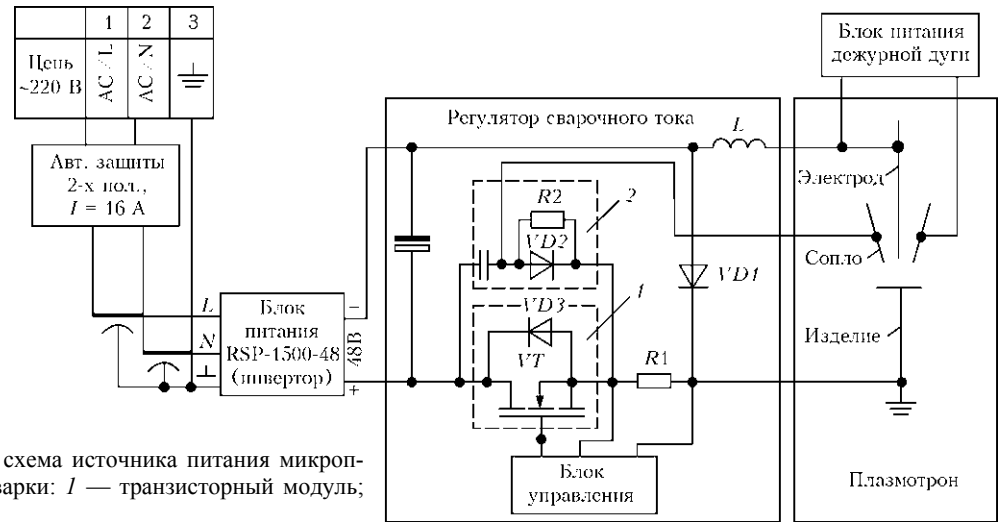
Такой источник состоит из инвертора RSP-1500-48 и чоппера. Его схема изображена на рисунке и аналогична схемам, описанным в работах [1, 2], с тем отличием, что энергия, накопленная в конденсаторе снаббера, при открытии транзистора сбрасывается не на *R2*, а в дугу через электрод или сопло плазмотрона.

В работе [3] выполнен анализ преобразователя понижающего типа в линейном приближении в установившемся режиме (не при первом включении), работающего на омически емкостную нагрузку для электронной аппаратуры. Отличительной особенностью рассматриваемого материала является то, что преобразователь работает на дуговую нагрузку (нелинейный элемент электрической цепи) в широком диапазоне регулировки тока дуги, например, 5…50 А при различных падениях напряжения на дуге, зависящих от канала сопла плазмотрона, длины дуги, рода и расходов защитных газов, в диапазоне частот, безопасных для слухового восприятия.

Детальное и целостное описание работы схемы источника питания нелишнее для технологов-сварщиков, использующих микроплазму в технологических процессах обработки различных материалов.

Инструментом для микроплазменной сварки является плазмотрон. Для подготовки его к работе

© В. С. Гвоздецкий, 2010



Структурная схема источника питания микроплазменной сварки: *1* — транзисторный модуль; *2* — снаббер

необходимо подать плазмообразующий газ (аргон), зажечь дежурную дугу и установить так, чтобы факел плазмы, исходящий из канала плазмотрона, касался анода — изделия. Режим короткого замыкания и возбуждения дуги с короткого замыкания в данной работе не рассматривается.

При включенном блоке питания и подаче управляющего напряжения на затвор открывается транзистор, напряжение источника питания $U_п$ поступает на разрядный промежуток «электрод–изделие», что приводит к возникновению дуги прямой полярности. Благодаря самоиндукции ток дуги нарастает постепенно. Когда он достигает заданного блоком управления значения I_m, транзистор выключается. Падение напряжения на индуктивности изменяет полярность, диод *VD1* открывается и дуга начинает питаться от индуктивности. Энергия, запасенная в ней во время открытого состояния транзистора, сбрасывается на дугу в течение времени τ_0 закрытого состояния транзистора. Если τ_0 велико, то энергия с индуктивности сбрасывается полностью. В этом случае конвертер выдает отдельные импульсы тока с экспоненциальной формой заднего фронта. По мере уменьшения τ_0 импульсы сближаются и наступает момент, когда пауза между ними исчезает. Дальнейшее уменьшение τ_0 приводит к тому, что последующий импульс накладывается на задний фронт предыдущего, образуя тем самым нижний уровень тока I_0. При этом индуктивность отдает только часть энергии. Верхний уровень тока I_m задает блок управления. Чем меньше τ_0, тем выше уровень I_0, т. е. $I_0 = f(\tau_0)$. Разница между I_m и I_0 определяет амплитуду пульсаций тока дуги. С одной стороны, амплитуда пульсаций должна быть небольшой, так как при этом уменьшается сила звукового излучения дуги, с другой, уменьшение амплитуды пульсаций сужает диапазон регулировки тока и существенно увеличивает частоту коммутации конвертера.

При больших значениях тока I_m увеличивается вероятность двойного дугообразования в плазмотроне, а при больших пульсациях тока дуги ухудшается качество защиты металла шва. Синхронно с пульсациями тока развиваются колебания в столбе дуги. Столб дуги то расширяется при нарастании тока, то сужается при его спаде. Эти колебания передаются в зону защитного газа, что приводит к подсосу воздуха. Это же явление имеет место и при импульсной сварке с нулевой составляющей тока между импульсами. При ограниченной мощности блока питания амплитуду тока $I_m > I_п$ (номинальное значение тока источника питания) может обеспечить буферный электролитический конденсатор, подключенный на входе конвертера. Большая его емкость позволяет формировать импульсы тока большой амплитуды, значительно превышающей нагрузочный ток блока питания $I_п$. В течение времени τ_1 открытого состояния транзистора дуга питается фактически от конденсатора. После закрытия транзистора блок питания дозаряжает конденсатор до напряжения $U_п$ и восстанавливает потери энергии конденсатора. Поэтому максимальную амплитуду тока $I_m >> I_п$ ограничивает не ток блока питания, а тип транзистора. Например, транзистор GA200SA60U пропускает ток 100 А, а транзистор SKM180A позволяет развивать ток до 180 А.

Рассмотрим работу конвертера понижающего типа на постоянном токе при определенных допущениях. Падение напряжения на дуге (при $I_д \geq 5$ А) [4] и значение индуктивности не зависят от тока дуги. Пренебрегаем всеми электрическими потерями на активных и пассивных элементах чоппера. Эти потери требуют дополнительных затрат энергии блока питания. Они подробно описаны в работе [2]. Принятые допущения никак не влияют на анализ работы регулятора тока сварки, они только упрощают математический анализ. В ходе исследований все эти потери учитываются в виде КПД преобразователя.

Известно, что для получения тока I_m блок питания должен затратить энергию не только на питание дуги, но и на накопление энергии в индуктивности. Когда транзистор закрывается, эта энергия возвращается в цепь и питает дугу при отключенном блоке питания. Сколько энергии в ней накопилось, столько же она отдает дуге.

При включении транзистора ток не сразу достигает своего номинального значения, как при балластном реостате, а нарастает постепенно. Явление самоиндукции заключается в появлении дополнительной ЭДС, пропорциональной скорости изменения тока, но имеющей обратный знак. Поэтому закон Ома применительно к дуговой сварке можно записать в следующем виде:

$$U_п - U_д - LdI/dt = IR \text{ или } dI/dt + (R/L)I = (U_п - U_д)/L, \quad (1)$$

где $U_д$ — падение напряжения на дуге; L — индуктивность дросселя; R — омическое сопротивление силовой цепи; I — сила тока; t — текущее время.

Рассмотрим закономерность нарастания тока при включении транзистора. Под действием напряжения блока питания $U_п$, приложенного к разрядному промежутку «электрод–изделие», возбуждается основная дуга и ток начинает нарастать.

Разделяя переменные в уравнениях (1) и проведя интегрирование, находим

$$-RdI/(U_п - U_д - IR) = (R/L)dt;$$
$$U_п - U_д - IR = A\exp(-Rt/L). \quad (2)$$

Постоянная интегрирования A определяется из начальных условий: при $t = 0$ $I = I_0 > 0$. Очевидно, что $A = U_п - U_д - I_0R$. Пропуская промежуточные выкладки, находим

$$I = (U_п - U_д)(1 - \exp(-Rt/L))/R + I_0\exp(-Rt/L). \quad (3)$$

Для упрощения анализа воспользуемся разложением в ряд Тейлора и ограничимся линейным членом ряда. В этом случае выражение (3) принимает вид

$$I = I_0 + (U_п - U_д - I_0R)t/L. \quad (4)$$

Видно, что ток I нарастает линейно (как и в работе [3]). При достижении значения I_m блок управления выключает транзистор. Длительность времени открытого состояния транзистора, в течение которого ток I нарастает от I_0 до I_m, вычисляется по формуле

$$\tau_1 = (I_m - I_0)L/(U_п - U_д - I_0R). \quad (5)$$

Заметим, что ток I является не только током дуги, током блока питания, но и током накопления энергии в индуктивности L. При выключенном транзисторе блок питания отсоединяется ($U_п$ = = 0) и дуга питается от индуктивности L через сбрасывающий диод *VD1*, минуя шунт *R1*. Ток I начинает спадать от значения I_m до I_0. Из уравнения (2), опуская математические выкладки, находим

$$I = I_m - (U_д + I_mR_0)\tau/L, \quad (6)$$

здесь $R_0 = R - R_1$.

Видно, что ток линейно спадает во времени. При $\tau = \tau_0$ уравнение (6) принимает вид

$$I_0 = I_m - (U_д + I_mR_0)\tau_0/L. \quad (7)$$

Длительность закрытого состояния транзистора равна

$$\tau_0 = (I_m - I_0)L/(U_д + I_mR_0) \approx (I_m - I_0)L/U_д. \quad (8)$$

Обозначим отношение τ_1 к τ_0 через β. С учетом выражений (5) и (7), пренебрегая членами I_0R и I_mR_0 в силу их малости по сравнению с $U_п$ и $U_д$, β принимает вид

$$\beta \approx U_д/(U_п - U_д). \quad (9)$$

Форма импульса тока дуги близка к равнобедренному треугольнику, если $2U_д$ незначительно меньше $U_п$. Параметр β составляет около 0,85 при $U_д$ = 22 В и $U_п$ = 48 В. Если $U_п >> 2U_д$, то τ_1 сокращается, уменьшается β, увеличивается частота коммутации в 1,47 раза при $U_п$ = 60 В по сравнению с $U_п$ = 48 В. Уменьшается также и период одного цикла $T = (\tau_1 + \tau_0)$. Заменяя τ_1 через β, имеем

$$T = \tau_0(1 + \beta). \quad (10)$$

Используя выражения (4)–(8), легко определить средние значения тока дуги $I_д$ и тока блока питания $I_п$ за один цикл (период T). Опуская математические выкладки, они принимают вид

$$I_д = (I_m + I_0)/2, \; I_п = (I_m + I_0)U_д/(2U_п). \quad (11)$$

Анализируя выражение (11), приходим к выводу, что $I_д > I_п$ и он тем больше, чем меньше падение напряжения на дуге и выше напряжение $U_п$ блока питания.

В реальном преобразователе блок питания расходует энергию не только на накопление и питание дуги, но и на электрические потери в чоппере. Они тем меньше, чем качественнее и рациональнее выполнен монтаж.

Отношение мощности, выделяемой на дуге, к мощности, потребляемой от блока питания, есть КПД конвертера, т. е.

$$(U_дI_д)/(U_пI_п) = \eta, \text{ или } I_д/I_п = \eta U_п/U_д. \quad (12)$$

Если подключить амперметры на входе и выходе конвертера, то они будут показывать разные значения. Амперметр в цепи дуги покажет боль-

ший ток, чем амперметр в цепи блока питания. Отношение этих токов есть коэффициент усиления тока. Измеренный коэффициент усиления тока равнялся 1,64, а вычисленный КПД конвертера $\eta = 0{,}75$ (при $U_д = 22$ и $U_п = 48$ В). В работе [2] он составляет 0,75…0,81. Это расхождение объясняется, возможно, тем, что коэффициент усиления тока дуги измеряли на макете, а не на реальном конвертере.

Остановимся еще на одной важной характеристике преобразователя — отношении тока I_0 к I_m. Они задаются и регулируются блоком управления.

Обозначим это отношение через α. Из (8) находим

$$1 - \alpha = (U_д/L)(\tau_0/I_m). \quad (13)$$

Легко видеть, что параметр α не зависит от тока I_m, если линейно связать параметр τ_0 с током I_m соотношением $\tau_0 = \gamma I_m$ (γ — коэффициент пропорциональности, $сА^{-1}$). Тогда (13) принимает вид

$$\alpha = 1 - (\gamma U_д/L) \quad (14)$$

и отношение I_0 к I_m перестает зависеть от I_m во всем диапазоне его регулировки. Это означает, что при регулировке тока I_m необходимо также регулировать параметр τ_0, связанный с ним линейным соотношением. Разработка такого блока управления — задача будущих исследований.

В аналоговых схемах управления регулируется только ток I_m, а параметр τ_0 имеет фиксированное значение. Если схема управления по параметру τ_0 настроена так, что при токе дуги, например, $I_д = 20$ А параметр $\alpha = \alpha_0$, то при регулировке тока $I_д > 20$ А параметр α увеличивается, т. е. $\alpha > \alpha_0$. Разница между токами $I_m - I_0$ уменьшается $(1 - \alpha) < (1 - \alpha_0)$. Это только улучшает процесс микроплазменной сварки и качество шва. При токах дуги $I_д < 20$ А параметр α начинает уменьшаться ($\alpha < \alpha_0$) и разница $I_m - I_0$ увеличивается. По мере уменьшения тока $I_д$ ток I_0 быстро стремится к нулю. Это обусловлено тем, что энергия, накапливаемая в индуктивности, уменьшается квадратично с уменьшением тока I_m. Она, задолго до повторного открытия транзистора, полностью сбрасывается в дугу и ток $I_0 = 0$. Дуга горит в виде отдельных импульсов тока, даже с паузами между ними. Процесс сварки с нарушением непрерывности тока дуги затрудняет формирование шва, а иногда делает невозможным его получение. В этом и заключается главный недостаток схемы управления с фиксированным значением τ_0. Итак, обоснована необходимость модернизации существующей схемы управления конвертером в составе источника питания для микроплазменной сварки.

Интересно, что даже при такой схеме управления существует значение α_1, которое не зависит от тока I_m, т. е. сохраняет постоянное значение во всем диапазоне регулировки тока дуги. Этот случай наступает тогда, когда разность токов $I_m - I_0$, умноженная на некоторое число δ, равна току дуги, т. е. когда $I_д = \delta(1 - \alpha_1)I_m$. Приравнивая правую часть этого уравнения к правой части уравнения (11) и сокращая I_m, имеем

$$(1 + \alpha_1)/2 = \delta(1 - \alpha_1) \text{ или } \delta = (1 + \alpha_1)/(2(1 - \alpha_1)). \quad (15)$$

Использовав выражения (7)–(9) и (15), ток дуги принимает вид

$$I_д = \delta U_д(U_п - U_д)/(U_п LF), \quad (16)$$

где F — частота коммутации.

Дифференцируя $I_д$ по $U_д$ и приравнивая производную нулю, находим, что ток $I_д$ достигает максимального значения I_{max}

$$I_{max} = \delta U_п/(4LF) \text{ при } U_д = 0{,}5U_п. \quad (17)$$

В то же время I_{max} определяется, исходя из максимальной мощности, передаваемой блоком питания дуги, т. е.

$$I_{max} = \eta W_п/U_д = 2\eta W_п/U_п \text{ при } U_д = 0{,}5U_п, \quad (18)$$

где $W_п$ — мощность блока питания.

Приравнивая правые части (17) и (18), находим

$$\delta = 8\eta W_п LF/U_п^2. \quad (19)$$

Подставляя значения параметров η, $U_п$, $W_п$ в (19) и проведя вычисления, находим $\delta = 1{,}171875$ (при $LF = 2\cdot10^{-5}$ Гн$\cdot1{,}5\cdot10^4$ Гц $= 0{,}3$). Подставляя это значение δ в (15), вычисляем $\alpha_1 = 0{,}4$.

Из (11) вычисляем $I_д = 0{,}7I_m$. Такое же значение тока дуги $I_д$ имеем из разности $\delta(I_m - I_0)$, т. е. имеем тождество, а выражение (16) принимает вид

$$I_д = 1{,}167U_д(U_п - U_д)/(U_п LF) \text{ при } \alpha_1 = 0{,}4. \quad (20)$$

Устойчивая работа регулятора тока со сбросом энергии дросселя на дугу через диод *VD1* возможна только при $U_д < 0{,}5U_п$. При приближении $U_д$ к $0{,}5U_п$ ЭДС самоиндукции уменьшается и когда она становится меньше $U_д$, дроссель перестает сбрасывать энергию на дугу. При открытии транзистора ЭДС суммируется с $U_п$ и скорость нарастания тока увеличивается приблизительно в 2 раза. Во столько же раз увеличивается ЭДС самоиндукции. При некоторых обстоятельствах процесс становится неуправляемым, что опасно для транзистора. Таким образом, длину дуги можно изменять только в зоне $U_п < 0{,}5U_п$.

Уравнение (20) интересно, так как позволяет рассчитать диапазон регулировки тока $I_д$, но и диапазон частот, безопасный для слухового восприятия. Если произведение $I_дL$ задать постоянным, то частота F перестает зависеть от тока $I_д$, т. е. дроссель преобразователя необходимо изготавливать с ферритовым сердечником, индуктивность которого уменьшается с увеличением тока $I_д$.

Рассчитать такой дроссель непросто не только потому, что магнитная восприимчивость феррита меняется с температурой нагрева, но и потому, что она сложно зависит от напряженности магнитного поля. В таком случае можно воспользоваться экспериментальной графической зависимостью $L = f(I_д)$. Эту зависимость легко можно получить, если дроссель нагружать током от аккумулятора (например, автомобильного) и регулировать ток реостатом, а индуктивность измерять, например, приборами «Измеритель иммитанса Е7-15» или UT603.

Хотя в математическом анализе функции графически не задают, но часто используют их графические представления, легкая обозримость и наглядность графика делают его незаменимым вспомогательным средством исследования функций. Отметим, что индуктивность дросселя с ферритовым сердечником с увеличением тока $I_д$ в пределе стремится к постоянному значению, когда намагниченность феррита достигает насыщения. Если при токе $I_д$ = 50 А индуктивность достигла постоянного значения, например, L = 20 мкГн, а при токе $I_д$ = 5 А она составляет 200 мкГн ($I_д L = 10^{-3}$), то преобразователь тока будет работать при постоянной частоте 13,9 кГц во всем диапазоне регулировки тока $I_д$ = 5…50 А (при $U_п$ = 48 В, $U_д$ = 22 В и α_1 = 0,4). Исходя из того, что F — величина постоянная, уравнение (20) можно представить в виде

$$I_дLF = 1{,}167U_д(U_п - U_д)/U_п < 13{,}9. \qquad (21)$$

Правая часть этого уравнения для микроплазменной сварки есть величина постоянная при неизменной длине дуги $U_д$ = const. При микроплазменной сварке $U_д$ < 22 В в зависимости от выбора рода защитного газа, длины дуги [4], а также диаметра канала сопла плазмотрона. Поэтому для этого способа сварки блок питания RSP-1500-48 с напряжением 48 В вполне приемлем, тем более, что верхний предел регулировки $U_п$ достигает 56 В.

Экспериментально изготовить дроссель на феррите не представляет затруднений. Чем меньше индуктивность, тем меньше его массогабаритные параметры, материальные и трудовые затраты на изготовление. Если даже индуктивность будет незначительно отличаться от $I_дL = 10^{-3}$, то частота при регулировке тока дуги немного «плавает». Главное, чтобы она не выходила из зоны, безопасной для слухового восприятия.

Рассмотрим работу буферного конденсатора. Предположим, что конденсатор, заряженный до напряжения $U_п$, отключаем от блока питания и через конвертер нагружаем на дугу. Она горит до тех пор, пока конденсатор не разрядится до напряжения $U_с = 2U_д$.

Количество энергии $\Delta W_с$, израсходованной конденсатором на питание дуги, записывается как

$$\Delta W_с = \eta C(U_п^2 - 4U_д^2)/2, \qquad (22)$$

где C — емкость конденсатора; η — КПД преобразователя.

Дуга за период T потребляет энергию $I_дU_дT$. Разделив ΔW_c на энергию, потребленную дугой, находим количество циклов N

$$N = \eta C(U_п^2 - 4U_д^2)F/(2U_дI_д). \qquad (23)$$

Подставляя указанные выше значения параметров ($U_п$, $U_д$, F, η) и проведя вычисления для $C = 5{,}6\cdot10^{-3}$ Ф, имеем N = (8,4; 5,6; 4,2; 2,8) при токах $I_д$ = (50; 75; 100; 150) А соответственно. Эти вычисления показывают, что электролитический конденсатор в составе конвертера понижающего типа крайне необходим при маломощных инверторных блоках питания. Ток дуги может в 1,5…2 раза превышать нагрузочный ток блока питания.

Один блок питания RSP-1500-48, даже при заниженном КПД преобразователя η = 0,75, передает дуге 1125 Вт мощности. Для микроплазменной сварки при $U_д$ = 22 В ток дуги составляет 51 А, а при $U_д$ = 18 В ток $I_д$ = 62,5 А. Коэффициент усиления тока равен соответственно 1,64 и 2. При этом ток, потребляемый от блока питания, равен 31 А, что составляет 97 % максимального тока нагрузки. При подключении инвертора по схеме, изображенной на рисунке, с проходными конденсаторами он стабильно работал на дуговой эквивалент с балластным реостатом в течение 45 мин даже с перегрузкой по мощности на 13 %.

Таким образом, первым ограничителем тока дуги является мощность блока питания. Ток дуги можно увеличить в 2 раза, если параллельно включить два таких блока. Разработчик предусматривает параллельную работу блоков на общую нагрузку. Однако не каждый транзистор может коммутировать большие токи дуги. Здесь вступает в силу второе ограничение для тока дуги — максимальный ток коллектора I_c, т. е.

$$I_c \geq I_m = 1{,}4286\, I_д \text{ или } I_д \leq 0{,}7I_c. \qquad (24)$$

При использовании в преобразователе транзистора GA200SA60 источник питания ограничен сверху током $I_п$ = 70 А, а на транзисторе SKM180A

— током дуги $I_д$ = 126 А. Поэтому для источника питания с одним блоком RSP-1500-48 рекомендуется транзистор GA200SA60, а для работы двух блоков параллельно — транзистор SKM180A.

Выводы

1. Установлена область устойчивой работы преобразователя, которая определяется падением напряжения на дуге $U_д < 0{,}5U_п$.

2. Аналитически показано, что конвертер с индуктивным накопителем является усилителем тока. Коэффициент усиления прямо пропорционален произведению $\eta U_п$ и обратно пропорционален падению напряжения на дуге.

3. Индуктивность дросселя с ферритовым сердечником уменьшается с увеличением тока и стремится к постоянному значению, когда намагниченность сердечника достигает насыщения. Такой дроссель обеспечивает плавную регулировку тока дуги и поддерживает частоту в выбранном диапазоне, если $LI_д \approx$ const.

4. Определена зависимость тока дуги от падения напряжения на ней, напряжения блока питания, индуктивности дросселя и частоты, позволяющая вычислять диапазон регулировки тока дуги с приемлемой амплитудой пульсаций в интервале частот, безопасном для слухового восприятия.

5. Показано, что на базе серийных инверторных блоков питания и конвертера понижающего типа можно разработать современный малогабаритный энергоемкий высокодинамичный источник питания микроплазменной сварки для падений напряжения на дуге $U_д < 0{,}5U_п$.

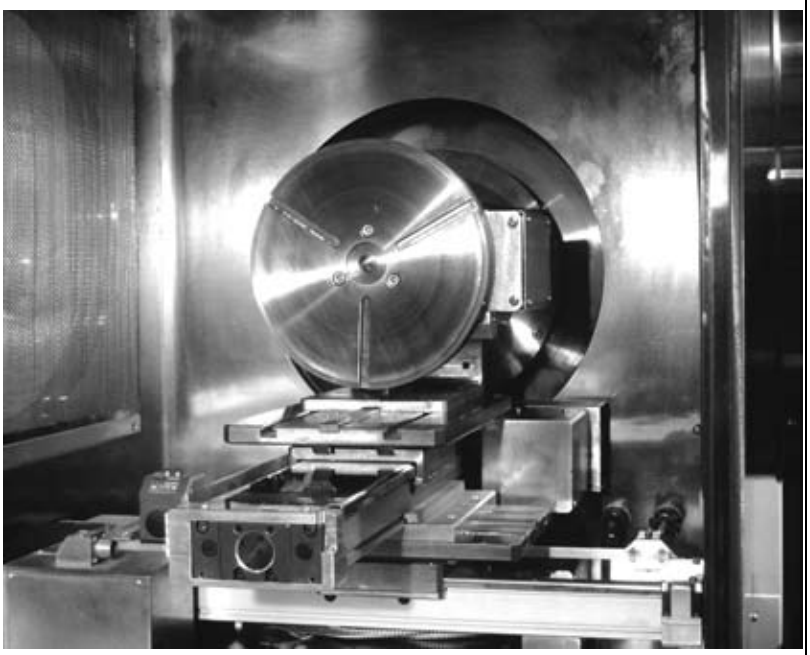
1. *Коротынский А. Е., Махлин Н. М., Богдановский В. А.* К расчету электронных регуляторов сварочного тока для многопостовых сварочных систем // Автомат. сварка. — 2002. — № 12. — С. 19–27.
2. *Кункин Д. Д.* Система управления процессом сварки ТИГ сталей малой толщины // Там же. — 2008. — № 12. — С. 17–19.
3. *Пилинский В. В.* Источник вторичного электропитания с бестрансформаторным выходом для электронной аппаратуры. — Киев: Изд. КПИ, 1985. — 120 с.
4. *Микроплазменная* сварка / Под ред. академика Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1979. — 245 с.

An area of stable operation of a converter in arc voltage range was determined. The dependence of coefficient of converter current amplification on its efficiency, voltage of power supply unit and arc-drop voltage was established. An analytical dependence of arc current on arc voltage drop, voltage of power supply unit and switching frequency was found. The necessity of application of ferrite core in a throttle, inductance of which reduces with current increase, was shown. The necessity of a buffer capacitor was proved.

Поступила в редакцию 16.12.2009

РАЗРАБОТАНО В ИЭС

Малогабаритные установки для ЭЛС в приборостроении



Десять установок СВ-112/103 с внутренними размерами вакуумной камеры 640.640.640 мм введены в промышленную эксплуатацию для ЭЛС небольших изделий. Время вакуумирования до $5{\cdot}10^{-4}$ мм рт. ст. составляет меньше 5 мин.

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ
тел./факс: (38044) 525-43-19
E-mail: office@technobeam.com.ua

УДК 621.791.052:539.4

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И АНАЛИЗ ПРИЧИН УХУДШЕНИЯ СВАРИВАЕМОСТИ И ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН

В. В. ДЕРЛОМЕНКО, инж., академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО**, **В. С. САВЧЕНКО**, д-р техн. наук, **Н. О. ЧЕРВЯКОВ**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены критерии оценки склонности к образованию горячих и холодных трещин в различных методах определения технологической прочности. С использованием метода Varestraint Test оценена зависимость склонности материала к трещинообразованию от его деградации. Показано, что во всех случаях причинами образования трещин является деградация материала при определенных температурных условиях и напряженно-деформационном состоянии.

Ключевые слова: свариваемость, деградация, термическое напряжение, горячие трещины, холодные трещины, технологическая прочность, методы испытаний, температурный интервал хрупкости

Неоднородное температурное циклическое воздействие «нагрев↔охлаждение» приводит к возникновению термических напряжений в сварном соединении. Наличие такого состояния, наряду с возможными структурными изменениями в материале, локальными деформационными процессами, остаточными напряжениями, инициирует значительное ухудшение свойств материала соединения, т. е. происходит его деградация. Различные технологии сварки могут вызывать различную деградацию [1], уровень которой согласно данным работ [2, 3] может служить критерием оценки свариваемости. Очевидно, что достижение материалом соединения уровня деградации выше допустимого приводит к необратимым изменениям свойств материала — появлению трещин и разрушению соединения, либо к проявлению недопустимых служебных характеристик.

За последние годы разными исследователями разработаны методы испытаний на технологическую прочность, которые позволяют оценить склонность к образованию холодных и горячих трещин отдельных участков или сопротивляемость к образованию трещин всего сварного соединения [4–12]. Эти методы создают предельное напряженно-деформированное состояние в шве и зоне соединения, при котором проявляются эффекты деградации металла. Технологическая прочность учитывает лишь материал и технологию, т. е. рассматривает только возможность образования соединения без учета фактора соответствия полученных свойств заданным условиям эксплуатации. Учет последнего фактора является необходимым при оценке свариваемости [1], однако в данной статье он не рассматривается.

Рассмотрим некоторые методы оценки технологической прочности в процессе кристаллизации (горячие трещины), а также их критерии.

Технологические пробы разработаны с целью моделирования условий выполнения реальных сварных конструкций, в частности, многослойных швов при сварке и наплавке и кольцевых при сварке или вварке труб. Отсутствие дефектов типа трещин на технологических пробах свидетельствовало о хорошей свариваемости металла, что давало возможность переходить к сварке реальных изделий и мотивировать правильность выбранных технологий сварки и сварочных материалов.

Качественные технологические пробы оценки склонности к образованию горячих трещин следующие: проба «круглый вварыш» [4], критерий — наличие/отсутствие макро- или микротрещин; проба с кольцевым многослойным швом для аустенитных сталей BWRA (Британской исследовательской ассоциации по сварке) [5], критерий — наличие/отсутствие трещин в многопроходном шве и металле ЗТВ; проба Килгрена–Лаци [5] — наличие/отсутствие трещин в многопроходном шве; Н-образная проба [5] — наличие/отсутствие макро- или микротрещины в третьем контрольном шве; тавровая проба [6] — наличие/отсутствие трещины в контрольном шве.

«Полуколичественные» [4] технологические пробы оценки склонности к образованию горячих трещин следующие: проба Каутца [5] — склонность к образованию горячих трещин считается умеренной, если общая длина трещин в четвертом контрольном шве не превышает 25 мм; проба Хаксли [5] — в зависимости от конкретного случая критерием может служить средняя длина трещины в шве или отношение средней длины трещины к длине секции; крестовидная тонколистовая проба [5] — отношение длины швов с трещинами к общей длине швов; проба Браун–Бовери [5] —

© В. В. Дерломенко, К. А. Ющенко, В. С. Савченко, Н. О. Червяков, 2010

количество и протяженность трещин в сварных швах; Segmented-Groove circular restraint specimen [7] — отношение суммарной длины трещины к длине шва; проба со шлицами Теккен [5], Houldcroft cracking test, Circular patch specimen и U. S. Navy circular-patch specimen [7] — процентное отношение длины трещины к длине всего шва.

С помощью качественных и полуколичественных технологических проб исследуются сплавы и сварочные материалы, оптимизируются условия и технологические режимы сварки. Критериями оценки являются наличие и отсутствие горячих трещин и их количество, абсолютная или относительная длина трещин. Данный вид проб характеризует свойства сплавов с точки зрения технологической прочности и не позволяет выделить составляющие: прочность и пластичность в зоне трещин, форму и температурные границы провала пластичности (ТИХ1, ТИХ2), т. е. фиксируется сам факт наличия трещин в исследуемом металле при заданных технологических параметрах, при этом не рассматриваются температурные и деформационные условия возникновения трещин.

Количественные технологические пробы оценки склонности к образованию горячих трещин следующие: проба Боленрата [5] — регулируя расстояние между зажимами, регулируют деформацию шва, при которой возникают трещины; составная листовая проба МВТУ [5], критерий — минимальная ширина пластины, при которой не образуется трещина; проба МВТУ для трубных образцов [5] — длина участка от края трубы до вставки, при которой отсутствуют трещины; проба ИМЕТ для тонколистового материала [5] — максимальная длина шва до надреза, при которой отсутствуют трещины; проба ЛТП МВТУ [4] — ширина пластины, при которой нет трещин; проба Лихайского университета [7] — максимальная глубина прорезей, при которой нет трещин; проба с ключевидной прорезью Морской исследовательской лаборатории США [7] — расстояние от отверстия до сварочной ванны в момент появления трещины или длина трещины. В свою очередь количественные технологические пробы используют в качестве критерия оценки склонности к образованию горячих трещин конструктивные параметры соединения, обусловливающие его жесткость, которые являются сравнительным критерием, пропорциональным темпу деформации шва [4].

Методы количественного определения сопротивляемости металла образованию горячих трещин с принудительным деформированием сварного соединения: проба ЛТП-1-6 [8], методы Ота и Фредрикса, ИМЕТ-2, Бланше и Мюрекс [5] — критическая скорость деформации $V_{кр}$, приводящая к образованию трещины; МВТУ [5] — критическая угловая скорость деформации ω, приводящая к образованию трещины; PVR [9], Varestraint, Transvarestraint [10], Strain-to-fracture [11] — критическая деформация $\varepsilon_{кр}$, приводящая к образованию трещины.

Исходя из приведенных критериев можно предположить, что в технологических пробах, как и в количественных методах определения сопротивления металла образованию горячих трещин с принудительным деформированием, главными условиями образования трещин является достижение критического значения $\varepsilon_{кр}$ в определенном температурном интервале в участке образования трещины, что, по мнению авторов [2, 3], связано с деградацией металла.

По такой же схеме рассмотрим методы оценки сопротивляемости сталей образованию холодных трещин при сварке: крестовая проба [4] — наличие/отсутствие трещин; Теккен [4] — критическая скорость охлаждения, при которой появляется трещина; проба с круговой наплавкой, Кренфильд и ЦНИИТМаш [4] — критическое количество усадочных валиков, вызывающих трещину; проба Лихайского университета [4] — максимальная глубина прорезей, при которой нет трещин; пробы ВМЭИ, ЦНИИТС и «круглый вварыш» [4] — критический геометрический размер образца, обусловливающий его жесткость; пробы ЛТП МВТУ и ИМЕТ 4 [12] — соотношение критического значения напряжения ко времени до разрушения в водородсодержащей среде; TRC [12] — критическое значение напряжения, ниже которого отсутствует трещина при перпендикулярной или вдоль шва нагрузке; инкубационный период зарождения трещины.

Как видно из приведенных некоторых методов оценки сопротивляемости сталей образованию холодных трещин, при сварке критерии оценки могут быть аналогичными критериям оценки горячих трещин:

качественный (наличие/отсутствие трещин (да/нет));

полуколичественный (относительная длина трещин, критическая скорость охлаждения, критическая начальная температура, критическое количество усадочных валиков шва);

количественный (критический геометрический размер образца, обусловливающий его жесткость; минимальное напряжение, при котором образуются трещины; комплекс условий сварки, при которых не образуется трещина; критическая скорость и значение деформации, при котором образуется трещина).

Как правило, испытания на холодные трещины относятся к методам оценки замедленного разрушения. Это означает, что благодаря воздействию напряжения внешней среды и длительному процессу диффузии водорода в зоны с повышенным напряжением, время до образования трещин

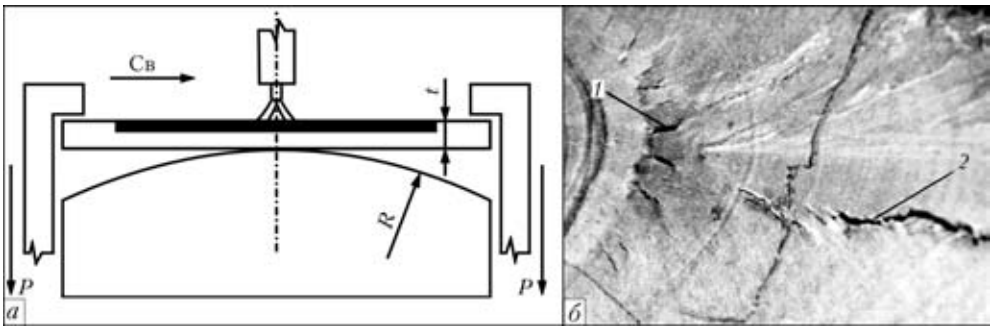


Рис. 1. Схема динамической деформации при использовании метода Varestraint Test (*а*) и характерные трещины при сварке сплавов с высоким содержанием Ni (*б*): *1* — температурный интервал хрупкости (ТИХ1); *2* — температурный интервал провала пластичности (ТИХ2)

может составлять от нескольких минут до нескольких суток или более. Главной причиной образования трещин, инициированных водородом, предположительно является достижение предельной локальной концентрации водорода вследствие наличия деформаций и напряжений критического уровня в участках сварного соединения при данной температуре, т. е. в условиях локальной деградации металла, обусловливающей его охрупчивание.

Рассмотрим деградационные процессы подробнее на примере высоколегированных сталей и жаропрочных никелевых сплавов с точки зрения их технологической прочности при дуговой сварке плавлением, исходя из критерия образования горячих трещин в сварном соединении.

На рис. 1 приведена схема метода Varestraint Test и области возникновения трещин при регулируемом изгибе сварного соединения в процессе сварки.

Процедура проведения опыта предусматривает проплавление пластины без присадки вольфрамовым электродом. Начальная часть шва выполняется без деформации. В момент нахождения сварочной ванны над верхней точкой оправки включается пневмопривод, перемещающий прижимы вниз. При этом процесс сварки не прекращается, а продолжается еще некоторое время. В результате металл жидкой ванны и всех зон как в шве, так и в металле ЗТВ подвергается заданной деформации, инициируя образование горячих трещин. Деформацию ε наружных слоев образца при изгибе рассчитывают по формуле $\varepsilon = \frac{t}{2R}100\ \%$, где t — толщина свариваемой пластины; R — радиус оправки, на которой выполняется гибка [13].

Трещины, образующиеся при высоких температурах (рис. 2), близких к температуре затвердевания, обусловливают так называемый высокотемпературный интервал хрупкости ТИХ1 (BTR). Он располагается от температуры ликвидуса T_L до несколько ниже температуры солидуса (примерно на 100…150 °С). Низкотемпературный интервал хрупкости ТИХ2 (DTR) находится в температурном интервале $(0{,}4\ldots0{,}7)T_L$. Критическое значение деформации $\varepsilon_{кр}$, выше которой возникают трещины, для разных хромоникелевых сталей составляет примерно 0,1…1,5 %. В иностранной литературе данные интервалы хрупкости называются Brittle Temperature Range (BTR) и Ductility dip Temperature Range (DTR) соответственно [13].

Экспериментальные данные по оценке температурно-деформационных условий возникновения трещин для ряда сварных соединений нержавеющих сталей и для жаропрочного никелевого сплава с поли- и монокристаллической структурой приведены на рис. 3, 4. Так, сталь типа AISI 304 (аналог отечественной стали 12Х18Н9) не-

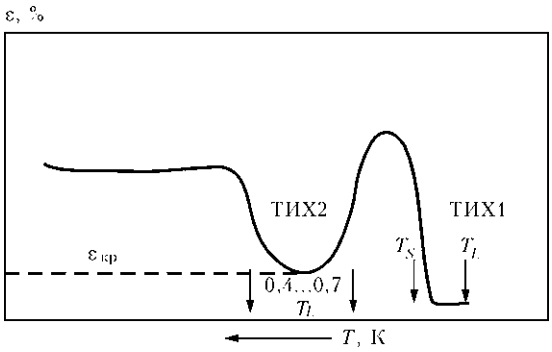


Рис. 2. Высокотемпературная пластичность металла с областями, содержащими характерные типы горячих трещин

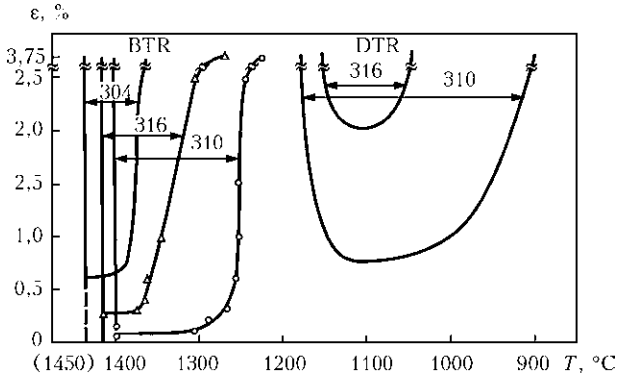


Рис. 3. Температурные интервалы хрупкости сварных швов аустенитных нержавеющих сталей типа 304, 310, 316 и определенные по методу Varestraint Test [4]

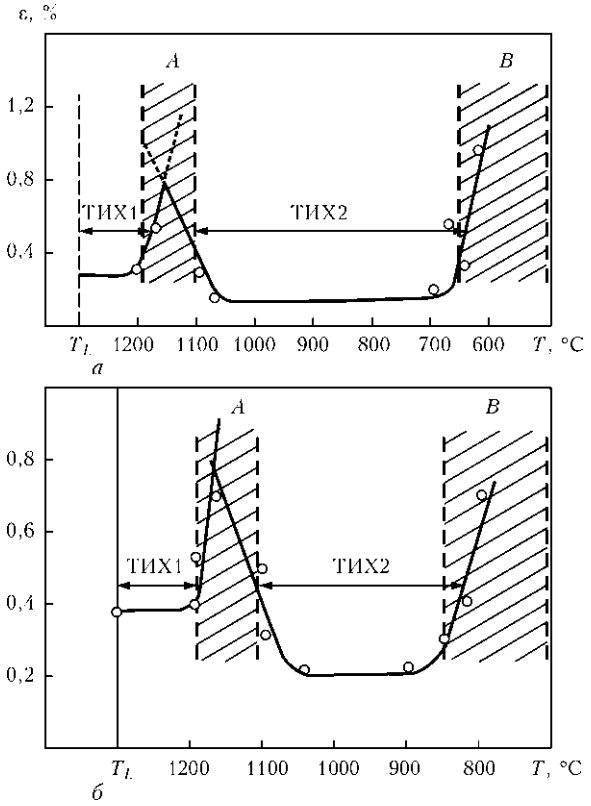


Рис. 4. Температурные интервалы хрупкости сварных швов поликристаллического сплава с $\gamma' = 50$ % (*а*) и монокристаллического сплава с $\gamma' = 60$ % (*б*)

чувствительна к образованию трещин (рис. 3); сталь AISI 316 (аналог стали 10Х17Н13М2) имеет умеренную чувствительность; сталь AISI 310 (аналог стали 20Х23Н18) проявляет повышенную склонность к образованию трещин [13, 14]. В свою очередь поли- и монокристаллические никелевые сплавы с содержанием $\gamma' = 50$ и 60 % соответственно отличаются весьма низкой устойчивостью против трещин.

Следует обратить внимание на два принципиальных момента в проявлении чувствительности к образованию трещин.

Во-первых, предельный уровень деформации $\varepsilon_{кр}$, выше которого при определенных температурах в швах и металле ЗТВ возникают макротрещины. В нашем случае данная характеристика является одним из критериев свариваемости — по оценке склонности к образованию трещин. Значения $\varepsilon_{кр}$ в интервалах хрупкости ТИХ1 и ТИХ2 показаны в таблице.

Чем ниже значение $\varepsilon_{кр}$, тем больше склонность материала к горячим трещинам, или меньше запас сопротивляемости трещинообразованию.

Во-вторых, характер изменения кривой зависимости $\varepsilon_{кр} = f(T)$. Как правило, температурная кривая пластичности имеет номинальные значения в зонах между ТИХ2 и ТИХ1, а также от конца ТИХ2 до комнатной температуры (рис. 4, *а*, *б*). Зоны номинальной пластичности заштрихованы и обозначены *A* и *B*. Отметим, что в обоих температурных интервалах хрупкости ТИХ1 и ТИХ2, при которых сопротивляемость шва образованию горячих трещин значительно снижается, происходит изменение комплекса механических свойств в сторону их ухудшения, т. е. наступает деградация металла. Об этом свидетельствует ход кривой $\varepsilon = f(T)$, углы ее наклона и ширина зоны провала пластичности. Технология сварки в этих условиях может ускорить деградацию металла по абсолютным значениям критериальных свойств, характеризующих свариваемость стали или сплава данного химического состава, метода производства. Таким образом, от влияния технологии сварки на соответствующую деградацию физических свойств металла — склонность к образованию трещин, зависит численный показатель свариваемости и его абсолютное значение. В данном случае — это изменение деформационной способности по отношению к исходному или стабилизированному состоянию данного материала.

Возможное объяснение причин образования трещин можно сделать, исходя из сравнительного анализа напряженно-деформированного состояния в сварных соединениях, склонного к трещинам высоконикелевого сплава типа ЖС-26 и аустенитной нержавеющей стали 03Х20Н16АГ6, стойкой против трещин. При этом исходили из оценки свариваемости по степени деградации. С использованием экспериментальных данных и расчетных методов определяли текущие значения значений продольных напряжений и пластических деформаций в зависимости от температуры

Характеристики температурных интервалов хрупкости и критических напряжений для образования трещин при испытаниях по методу Trans Varestraint Test

Сталь или марка сплава	Высокотемпературный интервал хрупкости ТИХ1, °С	Низкотемпературный интервал хрупкости ТИХ2, °С	$\varepsilon_{кр}$, %	
			ТИХ1	ТИХ2
304	1450…1420	—	0,75	—
316	1415…1375	1150…1050	0,25	2,00
310	1400…1300	1175…1000	0,10	0,75
На основе Ni, $\gamma' = 50$ %, поликристалл	TL-1190	1110…670	0,28	0,15
На основе Ni, $\gamma' = 60$ %, монокристалл	TL-1190	1105…790	0,38	0,20

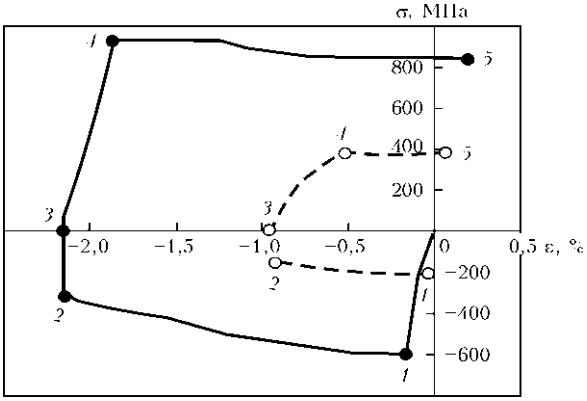


Рис. 5. Расчетное развитие напряжений и деформаций при сварке никелевого сплава и аустенитной стали: точки *0–2* — нагрев, *2–5* — охлаждение; сплошная кривая — никелевый сплав ЖС-26; штриховая — сталь Х20Н16АГ6

в точке на расстоянии 0,5 мм от линии сплавления как на ветви нагрева до T_{max}, так и охлаждения до 20 °С. Из представленных на рис. 5 данных расчетов следует, что в никелевом сплаве уровень растягивающих продольных напряжений достигает около 920 МПа, что соответствует пределу текучести в температурном интервале провала пластичности, а значение пластической деформации около 1,75 %, что почти на порядок выше $\varepsilon'_{кр} \approx 0{,}15$ %. Таким образом, созданы условия для интенсивной деградации металла, что и сказалось на появлении трещин в зоне ТИХ2. В аустенитной стали уровень напряжений (рис. 5) также близок к пределу текучести и составил около 390 МПа, а пластической деформации около 0,5 % при $\varepsilon'_{кр}$ примерно 4 %. Поскольку деградация металла не достигает уровня, вызывающего трещины, сталь относится к хорошосвариваемой [15].

Таким образом, подтверждается, что технологическая прочность, а соответственно и свариваемость коррелируют и оцениваются степенью деградации материала. В данном случае деформацией ε, при достижении которой критического значения возникают трещины в сварном соединении при определенных температурах, характерных для сварочного цикла.

Выводы

1. Приведенные методы определения технологической прочности имеют различные критерии, исследуют широкий спектр соединяемых материалов и технологий сварки. Общепринятой оценкой технологической прочности (свариваемости) является ухудшение трещиностойкости, склонности к замедленному разрушению и охрупчиванию металла до образования несплошностей (микро- и макротрещин), что указывает на протекание процессов негативного изменения свойств материала.

2. Всякое ухудшение свойств, протекающее во времени при определенных условиях термосилового и дополнительного воздействия на металл, характерных для сварки, способствует достижению металлом предельного состояния, которое ведет к образованию несплошностей межкристаллитного или транскристаллитного характера к деградации.

3. Деградацию свойств материала соединения следует рассматривать как универсальный критерий оценки технологической прочности и соответственно свариваемости.

1. *Ющенко К. А., Дерломенко В. В.* Анализ современных представлений о свариваемости // Автомат. сварка. — 2005. — № 1. — С. 9–13.
2. *Ющенко К. А., Дерломенко В. В.* Критерии свариваемости материалов // Там же. — 2006. — № 1. — С. 31–34.
3. *Ющенко К. А., Дерломенко В. В.* Зварюваність та зміни фізико-механічних властивостей зварних з'єднань // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2006. — №2. — С. 89–93.
4. *Сварка* в машиностроении: Справочник. В 4 т. / Редкол.: Г. А. Николаев и др. — Т.3 / Под ред. Винокурова. — М.: Машиностроение, 1979. — 567 с.
5. *Горячие* трещины при сварке жаропрочных сплавов / М. Х. Шоршоров, А. А. Ерохин, Т. А. Чернышова и др. — М.: Машиностроение, 1973. — 224 с.
6. *Сварка* и свариваемые материалы: В 3-х т. Т. 1. Свариваемость материалов: Справ. изд. / Под ред. Э. Л. Макарова. — М.: Металургия, 1991. — 528 с.
7. *Stout R. D., Dorville W. D.* Weldability of steels. — New-York: Welding research council, 1978. — 392 p.
8. *Гривняк И.* Свариваемость сталей / Под ред. Э. Л. Макарова. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.
9. *Wilken K.* Investigation to compare hot cracking tests externally loaded specimen. — [1998]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IX-1923–98).
10. *Savage W. F., Zuntic C. D.* The Varestraint Test // Welding J. — 1965. — **44**, № 10. — P. 433–442.
11. *Nissley N. E., Lippold J. C.* Development of the strain-to-fracture test for evaluating ductility-dip cracking in austenitic alloys // Ibid. — 2003. — **82**, № 12. — 355s-364s.
12. *Шоршоров М. Х., Чернышова Т. А., Красовский А. И.* Испытания металлов на свариваемость. — М.: Металлургия, 1972. — 240 с.
13. *Kamoi K., Machora Y., Ohmosy Y.* Effect of stacking fault precipitation on hot deformation of austentic stainless steel // Transaction ISIY. — 1986. — **26**, № 2. — P. 159–166
14. *К возможному* механизму образования трещин в стабильно аустенитных швах вследствие сегрегации кислорода / К. А. Ющенко, В. С. Савченко, Н. О. Червяков, А. В. Звягинцева // Автомат. сварка. — 2010. — № 5. — С. 10–16.
15. *Investigation* of structure and crack formation in welded joints of single crystal Ni-base alloys / V. S. Savchenko, K. A. Yushchenko, A. V. Zvjagintseva et al. // Welding in the World. — 2007. — **51**, № 11/12. — P. 76–81.

The criteria for evaluation of a tendency to hot and cold cracks formation in different methods for determination of technological strength were considered. Dependency of material tendency to crack formation on its degradation was evaluated using Varestraint-Test. It is shown that in all cases the reason for cracks formation is degradation of material properties under specified temperature conditions and stress-strain state.

Поступила в редакцию 15.10.2009

УДК 621.791.72

ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ*

Н. В. КОБЕРНИК, канд. техн. наук, **Г. Г. ЧЕРНЫШОВ**, д-р техн. наук (МГТУ им Н. Э. Баумана, РФ),
Р. С. МИХЕЕВ, инж., **Т. А. ЧЕРНЫШОВА**, д-р техн. наук (Ин-т металлургии им. А. А. Байкова РАН, РФ)

Исследована возможность модифицирования поверхностных слоев антифрикционного алюминиевого сплава АК9 и алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных частицами карбида кремния SiC и оксида алюминия Al_2O_3, при оплавлении поверхности дуговым разрядом в магнитном поле, а также импульсным лазерным излучением. Показано, что при оплавлении наблюдается значительное диспергирование исходной структуры поверхностного слоя. Образцы после обработки отличаются механическими и триботехническими характеристиками, превосходящими исходный материал.

Ключевые слова: дуговое оплавление, импульсное лазерное излучение, армированные композиционные материалы, магнитное поле, модифицирование поверхности

В настоящее время внимание конструкторов привлекают алюмоматричные композиционные материалы (КМ), армированные тугоплавкими частицами керамики. Указанные КМ характеризуются высокими износостойкостью и трибологическими свойствами, что делает их перспективными для использования в трибосопряжениях [1, 2]. Весьма важным направлением дальнейших работ является создание из этих КМ износостойких антифрикционных покрытий на деталях, работающих в экстремальных условиях. В работах [3–8] показана возможность получения износостойких покрытий из таких материалов аргонодуговой наплавкой с применением присадочных прутков, причем наплавленные покрытия, характеризуются эксплуатационными свойствами, близкими к свойствам литых КМ того же состава. Существует дополнительная возможность улучшить эксплуатационные свойства поверхностного слоя исходных КМ и наплавленных покрытий путем модифицирования их структуры, поскольку изменение размеров элементов структуры заметно отражается на износостойкости деталей [9].

В работах [10, 11] предлагается использовать для модифицирования поверхностного слоя КМ микроплазменные разряды, а также электронно-лучевое и лазерное излучение. Однако такие способы обработки поверхности КМ не всегда оправданы с экономической точки зрения из-за низкой скорости обработки, а также необходимости применения сложного и дорогостоящего оборудования. Кроме того, микроплазменная обработка в вакуумных камерах связана с ограничениями в размере изделий, а при лазерной обработке необходимо также учитывать отражающие свойства обрабатываемого материала. Более экономичным и гибким способом обработки поверхности КМ является дуговое оплавление с воздействием на дугу и расплавленную ванну магнитного поля, что позволяет получать высококачественные плотные и однородные по составу поверхностные слои [12].

В настоящей работе представлены результаты исследований возможностей дугового оплавления в магнитном поле, а также оплавления импульсным лазерным излучением для модифицирования поверхностных слоев литых образцов из алюминиевого сплава АК9 и алюмоматричных КМ, упрочненных частицами карбида кремния SiC и оксида алюминия Al_2O_3.

При модифицировании поверхностных слоев алюмоматричных КМ, армированных частицами карбида кремния, путем оплавления возможна деградация армирующей фазы за счет перегрева расплава КМ [13]. Это проявляется в образовании значительного содержания продуктов межфазных реакций Al_4C_3 и Al_4SiC_4, что приводит к потере формы вследствие коррозионного разрушения в присутствии водяных паров, снижению прочности и жесткости КМ. В работах [3, 14] показано, что процессы деградации армирующей фазы можно подавить при рациональном выборе режимов обработки, техники выполнения наплавки и использовании в качестве матрицы сплавов системы Al–Si с 11…13 мас. % Si. Поэтому при проведении исследований использовали КМ с матричными сплавами АК12М2МгН и АК12 и режимы, рекомендованные в работах [3–6, 14].

Эксперименты по модифицированию структуры поверхностного слоя оплавлением проводили

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 08-0800476-а.

© Н. В. Коберник, Г. Г. Чернышов, Р. С. Михеев, Т. А. Чернышова, 2010

на литых пластинах из алюминиевого сплава АК9 следующего состава (ГОСТ 1583–93), мас. %: 9…11 Si; ≤ 1 Cu; 0,2…0,4 Mg; 0,2…0,5 Mn; ≤ 0,3 Ni; ≤ 0,5 Zn; ≤ 1,3 Fe; Al — основа и дисперсно-упрочненных алюмоматричных КМ.

Дисперсно-упрочненные КМ получали механическим замешиванием армирующего наполнителя в матричный расплав. Матрицей КМ служили алюминиевые сплавы (ГОСТ 1583–93) АК12М2МгН, мас. %: 11…13 Si; 1,5…3 Cu; 0,3…0,6 Mn; 0,85…1,35 Mg; < 0,5 Zn; 0,05…1,2 Ti; 0,3…1,3 Ni; < 0,8 Fe; < 0,2 Cr; < 0,1 Sn; АК12: 10…13 Si; < 0,6 Cu; < 0,5 Mn; < 0,1 Mg; < 0,3 Zn; < 0,7 Fe; < 0,1 Ni; < 0,1 Ti; Al — основа). Наполнителями были частицы карбида кремния SiC и оксида алюминия Al_2O_3. Средний диаметр частиц SiC составлял 14 и 28 мкм, а Al_2O_3 — 40 мкм. Перед замешиванием порошки выдерживали в печи для сушки, выжигания случайных органических загрязнений и окисления свободного кремния. Замешивание порошков в расплав осуществляли дисковой мешалкой. Пластины из КМ получали разливкой композиционного расплава в кокиль.

Оплавление дуговым разрядом в магнитном поле поверхностного слоя литых образцов осуществляли дугой, горящей в аргоне между вольфрамовым электродом и изделием на постоянном токе прямой полярности в центре четырехполюсной магнитной системы [12]. Ток дуги составлял $I_д$ = 100 А, скорость оплавления — $v_{опл}$ = 14 м/ч; магнитная индукция — B = 0,048…0,120 Тл.

Оплавление импульсным лазерным излучением выполняли на установке «КВАНТ-15» с мощностью импульса $W_и$ = 815, 1500 и 2250 Вт и степенью расфокусировки (или расстояние от фокуса луча до поверхности образца) Δf = 1, 3 и 5 мм, что обспечивает при фокусном расстоянии объектива 0,5 мм диаметр пятна нагрева $d_п$ = 0,3, 0,9 и 1,5 мм. Время импульса $t_и$ устанавливали 4 мс, а частоту следования импульсов — $F_и$ = 1 Гц. Скорость оплавления подбирали для обеспечения коэффициента перекрытия точек $K_п = S/d_п$ = 0,5, где S — шаг при наложении единичных пятен, в качестве защитного газа использовали аргон.

Структуру модифицированных поверхностей исследовали на оптическом микроскопе «Leica DMILM» с использованием программы для анализа изображений «Qwin», а также на растровых электронных микроскопах «Leo 430i» и «FEI Quanta 3D FEG», оснащенных приставками для микрорентгеноспектрального анализа (МРСА).

Механические свойства определяли измерением микротвердости по глубине наплавленного металла на приборе «Wilson Wolpert 432SVD» при нагрузке 0,5 Н, а также измерением твердости по Бринеллю на универсальном приборе «Wilson Wolpert 930 N» путем вдавливания шарика диаметром 2,5 мм при нагрузке 620 Н.

Для оценки эффективности модифицирования проводили испытания на сухое трение скольжения исходных образцов в литом состоянии и после оплавления дугой в магнитном поле. Трение осуществляли на установке МТУ-01 (ТУ 4271-001-29034600–2004) по следующей схеме: вращающаяся втулка (контртело из стали 40Х с твердостью более *HRC* 45) по шайбе (образцы из КМ с модифицированной поверхностью) при нагрузке 18…60 Н и скорости скольжения 0,39 м/с. В процессе испытания регистрировали момент трения и изменение массы путем взвешивания каждого образца до и после испытания с точностью ($\pm 0{,}5\cdot 10^{-3}$) г. Первый этап трибонагружения длительностью 15 мин при нагрузке 18 Н и скорости скольжения 0,39 м/с считали приработочным.

Поведение образцов в процессе сухого трения скольжения оценивали по объемной интенсивности изнашивания I_V, коэффициенту трения $f_{тр}$, коэффициенту изнашивания K и коэффициенту стабильности $\alpha_{ст}$. Значения этих параметров определяли по формулам [15, 16]

$$I_V = \frac{\Delta m}{\rho L}; \quad (1)$$

$$f_{тр} = \frac{M}{R_{ср} F_н}; \quad (2)$$

$$K = \frac{I_V H}{F_н}; \quad (3)$$

$$\alpha_{ст} = \frac{f_{ср}}{f_{max}}, \quad (4)$$

где ρ — плотность металла образца, г/мм^3; L — путь трения, м; M — момент трения, Н·м; $R_{ср}$ — средний радиус контртела, мм; $F_н$ — приложенная нагрузка, Н; H — твердость металла образца, МПа; $f_{ср}$, f_{max} — средний и максимальный коэффициенты трения.

Коэффициент стабильности $\alpha_{ст}$ представляет собой безразмерную величину и характеризует устойчивость процесса сухого трения скольжения. Коэффициент изнашивания K, также являющийся безразмерной величиной, отражает вероятность отделения частиц износа при трении.

Структура и механические свойства поверхностных слоев, оплавленных дуговым разрядом в магнитном поле. Микроструктуры образцов из сплава АК9 и дисперсно-наполненных КМ АК12+10 % $Al_2O_{3(40)}$ и АК12М2МгН+12 % $SiC_{(14)}$ в исходном состоянии показаны соответственно на рис. 1, *а* и рис. 2, *а*, *г*. Из рисунков видно, что литая структура сплава АК9 состоит из крупных ячеисто-дендритных кристаллов α-Al толщиной λ = 30…50 мкм и междендритных эвтектических прослоек. Согласно МРСА эти прослой-

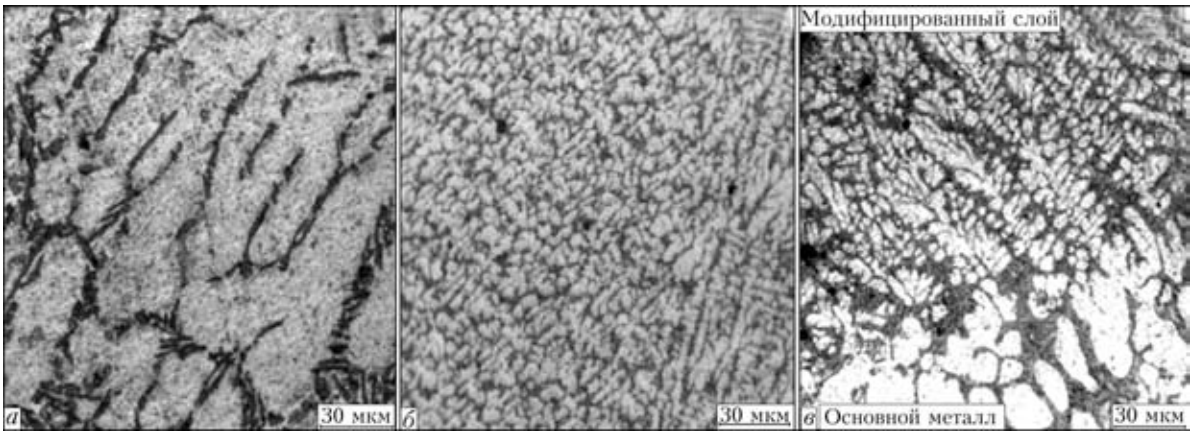


Рис. 1. Микроструктуры сплава КМ АК9 в исходном (литом) состоянии (*а*) и верхней части модифицированного слоя (*б*) и линии сплавления (*в*) после обработки дугой в магнитном поле (b = 0,048 Тл)

Таблица 1. Геометрические размеры швов, выполненные на образцах из различных материалов и при разных значениях магнитной индукции

Материал образца	*B*, мм	*h*, мм	*B*, мм	*h*, мм
	b = 0,048 Тл		b = 0,12 Тл	
АК9	7,00	1,20	8,50	0,50
АК12+10 % $Al_2O_{3(40)}$	6,73	1,27	9,27	1,67
АК12М2МгН+12 % $SiC_{(14)}$	6,60	2,00	8,07	2,40

ки, кроме α-Al и эвтектического кремния, содержат алюминиды никеля, железа и меди. Толщина λ кристаллов α-Al исходной (литой) структуры КМ составляет 13…15 мкм (АК12+10 % $Al_2O_{3(40)}$) и 20…25 мкм (АК12М2МгН+12 % $SiC_{(14)}$), что несколько меньше, чем у алюминиевого сплава АК9. Это является следствием влияния армирующих частиц Al_2O_3 и SiC, ограничивающих объемы расплавов, в которых проходит ликвация.

Образцы, полученные после дугового оплавления в магнитном поле, характеризуются достаточно гладкой поверхностью. Влияние магнитной индукции на форму поверхностных слоев, полученных дуговым оплавлением с воздействием на дугу магнитным полем, исследовали на макрошлифах поперечных сечений оплавленных образцов. Измерения геометрических размеров швов показали, что для всех материалов при увеличении магнитной индукции характерен рост ширины *B* и зоны оплавления (табл. 1), поскольку достигается большая степень расфокусирования дуги. Изменение глубины проплавления *h* в зависимости от магнитной индукции происходит не столь явно, но тенденция к ее уменьшению сохраняется.

Микроструктуры образцов из сплава АК9 после модифицирующей обработки дуговым разрядом в магнитном поле представлены на рис. 1, *б*, *в*. На рисунках видно значительное диспергирование исходной структуры, вызванное высокими скоростями охлаждения тонкого слоя расплавленного металла. Параметр λ уменьшается до 5…7 мкм (рис. 1, *б*). Вблизи линии сплавления дисперсность структуры оплавленного слоя несколько меньше в результате частичного наследования структуры подложки при эпитаксиальной кристаллизации, а также меньшей начальной скорости кристаллизации расплава (рис. 1, *в*).

На рис. 2, *б*, *в*, *д*, *е* представлены микроструктуры образцов из дисперсно-наполненных КМ соответственно составов АК12+10 % $Al_2O_{3(40)}$ и АК12М2МгН+12 % $SiC_{(14)}$. Результатом поверхностной обработки образцов дуговым оплавлением с воздействием на дугу магнитным полем является диспергирование исходной структуры матрицы (толщина соответственно равна 3…4 и 4…5 мкм). При этом объемное содержание и размер армирующих частиц Al_2O_3 и SiC не изменяются.

Частицы SiC в обработанных поверхностных слоях образца КМ АК12М2МгН+12 % $SiC_{(14)}$ сохраняют исходную скольную огранку, что свидетельствует об отсутствии интенсивного межфазного взаимодействия между наполнителем и матричным расплавом во время дугового оплавления (рис. 2, *б*, *д*). Кроме того, в процессе поверхностной обработки происходит перераспределение армирующих частиц. Вследствие большой скорости охлаждения, присущей этому технологическому способу обработки, армирующие частицы распределяются в матрице более равномерно (рис. 3).

В результате обработки химический состав по толщине поверхностного слоя изменяется. Вблизи линии сплавления содержание кремния в слое уменьшается, а зона, прилегающая к поверхности образца, заметно обогащается кремнием по сравнению с исходной структурой (табл. 2). Причиной этого является ликвация, характерная для направленной кристаллизации оплавленного слоя от линии сплавления к поверхности слоя.

Диспергирование структуры матрицы и повышение однородности распределения наполнителя в поверхностных слоях дисперсно-наполненных

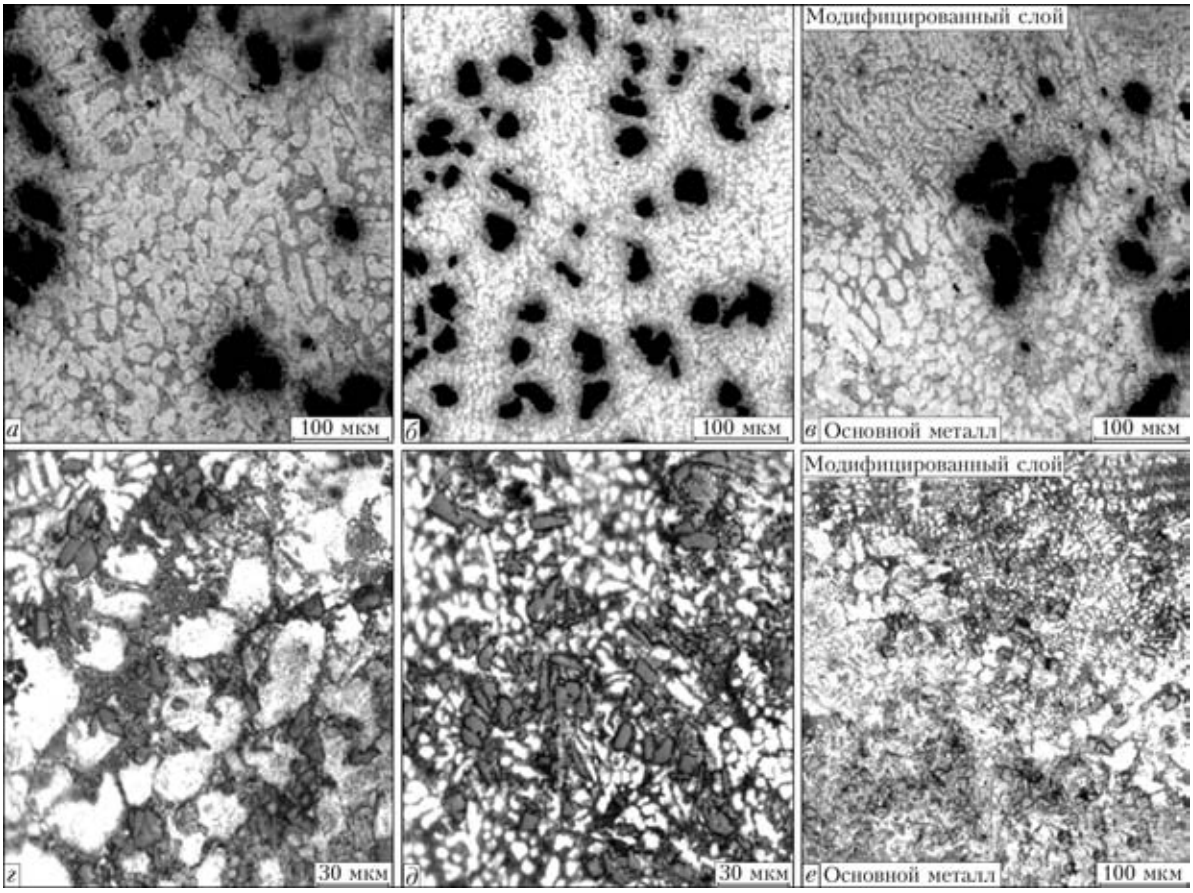


Рис. 2. Микроструктуры КМ АК12+10 % $Al_2O_{3(40)}$ (*а–в*) и АК12М2МгН+12 % $SiC_{(14)}$ (*г–е*) в исходном (литом) состоянии (*а*, *г*) и верхней части модифицированного слоя (*б*, *д*) и линии сплавления (*в*, *е*) после обработки дугой в магнитном поле ($I_{св}$ = = 110 А; $U_д$ = 16 В; *b* = 0,048 Тл)

КМ после модифицирующей обработки обусловливает увеличение твердости поверхностных слоев по сравнению с исходным состоянием сплава АК9 и дисперсно-наполненных КМ (рис. 4). Изменение значений магнитной индукции от 0,048 до 0,120 Тл практически не отражается на твердости оплавленного слоя.

Модифицирование структуры алюминиевых сплавов и КМ за счет обработки поверхности дуговым оплавлением в магнитном поле приводит к улучшению износостойкости и трибологических

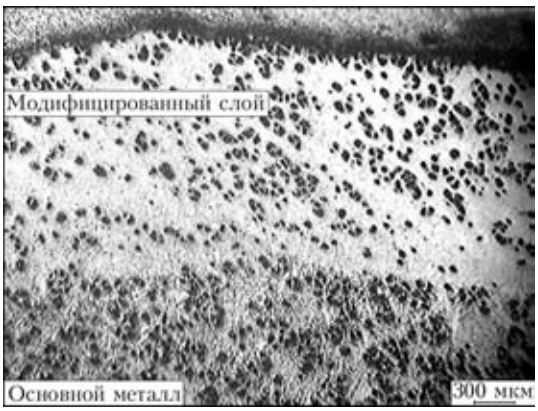


Рис. 3. Макроструктура КМ АК12+10 % $Al_2O_{3(40)}$ после обработки дугой в магнитном поле ($I_{св}$ = 110 А; $U_д$ = 16 В; *b* = = 0,12 Тл)

характеристик. Значения объемной интенсивности изнашивания I_v и коэффициента изнашивания *K* как у модельного образца АК9, так и у дисперсно-наполненных КМ существенно снижаются, особенно при увеличении нагрузки (рис. 5). Это может быть связано с уменьшением размеров кристаллов кремния и относительных размеров участков твердого раствора на основе алюминия, что увеличивает сопротивление абразивному и адгезионному изнашиванию образцов [9]. Существенное значение имеет также отсутствие деградации армирующих частиц в наплавленных слоях дисперсно-наполненных КМ.

Нормализованные коэффициенты трения образцов ($f_{мод}/f_{исх}$ — отношение коэффициента трения модифицированного образца к коэффициенту

Таблица 2. Химический состав по глубине обработанного слоя КМ АК12М2МгН+12 % $SiC_{(14)}$ (МРСА)

Участок измерения	Al, мас. % (ат. %)	Si, мас. % (ат. %)
Основной металл	91,58 (91,88)	8,42 (8,12)
Вблизи линии сплавления (со стороны модифицированного слоя)	96,3 (96,44)	3,70 (3,56)
Вблизи поверхности	83,08 (83,63)	16,92 (16,37)

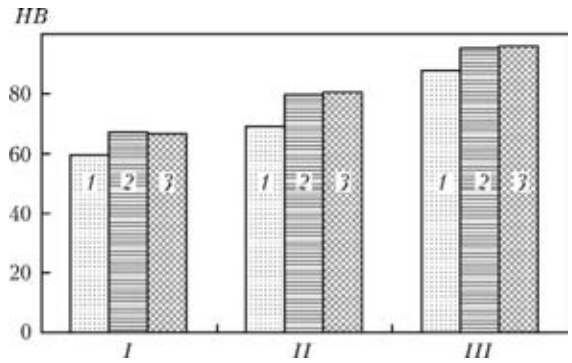


Рис. 4. Твердость образцов из сплава АК9 и дисперсно-упрочненных КМ АК9 (*I*), АК12+10 % $Al_2O_{3(40)}$ (*II*) и АК12М2МгН+12 % $SiC_{(14)}$ (*III*) в исходном состоянии (*1*) и после обработки дугой в магнитном поле при *b* = 0,048 (*2*) и 0,120 Тл (*3*)

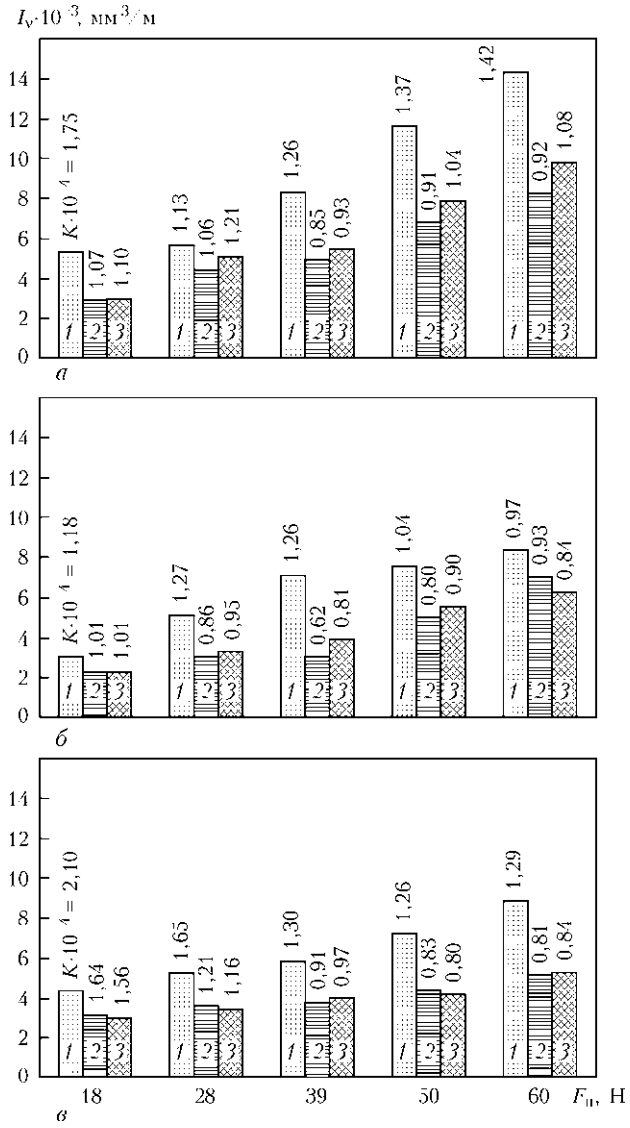


Рис. 5. Изменение объемной интенсивности изнашивания I_V и коэффициента изнашивания $K \cdot 10^{-4}$ образцов из сплава АК9 (*а*), КМ АК12+10 % $Al_2O_{3(40)}$ (*б*) и АК12М2МгН+12 % $SiC_{(14)}$ (*в*) в зависимости от нагрузки $F_н$ в условиях сухого трения скольжения: *1* — исходное состояние; *2*, *3* — после модифицирования поверхностного слоя при *b* = 0,048 и 0,12 Тл

трения исходного образца) в зависимости от приложенной нагрузки приведены на рис. 6. Из рисунка видно, что во всем диапазоне трибонагружения модифицированные образцы из модельного сплава АК9 имеют равные или меньшие значения коэффициента трения в сравнении с литыми образцами (рис. 6, *а*). Модифицированные дисперсно-наполненные КМ отличаются несколько большим коэффициентом трения на начальных стадиях испытаний при нагрузке до 39 Н по сравнению с исходным состоянием. Однако при больших нагрузках значения коэффициентов трения становятся одинаковыми (рис. 6, *б*, *в*), что может быть связано с формированием в процессе сухого трения скольжения переходного слоя, близкого по составу и дисперсности.

В процессе сухого трения скольжения приповерхностные слои испытывают сильную пластическую деформацию, следы которой в виде поворота осей дендритов в направлении скольжения можно наблюдать на микрошлифах поперечных сечений образцов после испытаний на трение (рис. 7, *а*). Ширина зоны пластической деформации литых образцов КМ составляет около 250 мкм, а модифицированных образцов снижается до 150 мкм. При испытаниях с осевой нагрузкой 60 Н на контактных поверхностях модифицированного образца отчетливо виден сформирован-

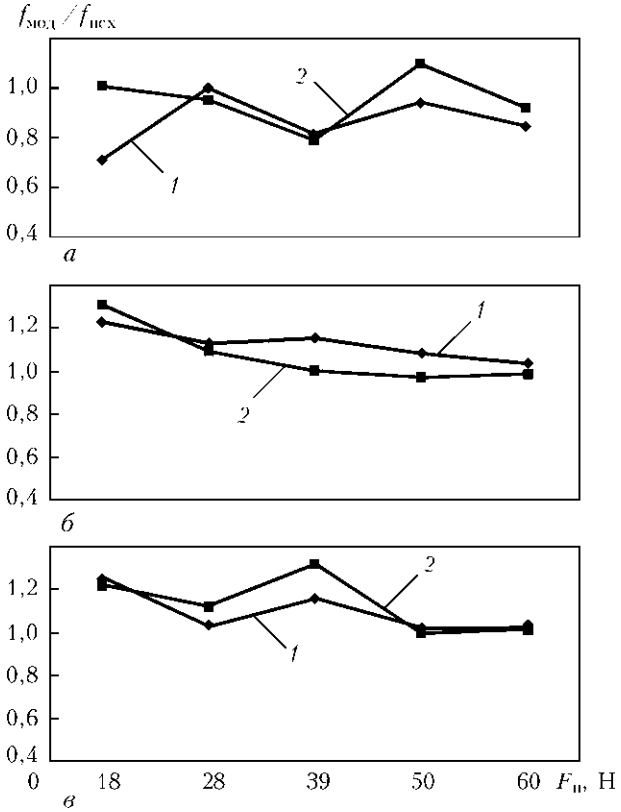


Рис. 6. Изменение нормализованного коэффициента трения $f_{мод}/f_{исх}$ образцов АК9 (*а*), КМ АК12+10 % $Al_2O_{3(40)}$ (*б*) и АК12М2МгН+12 % $SiC_{(14)}$ (*в*) после модифицирующей обработки в зависимости от приложенной осевой нагрузки при *b* = = 0,048 (*1*) и 0,120 (*2*) Тл

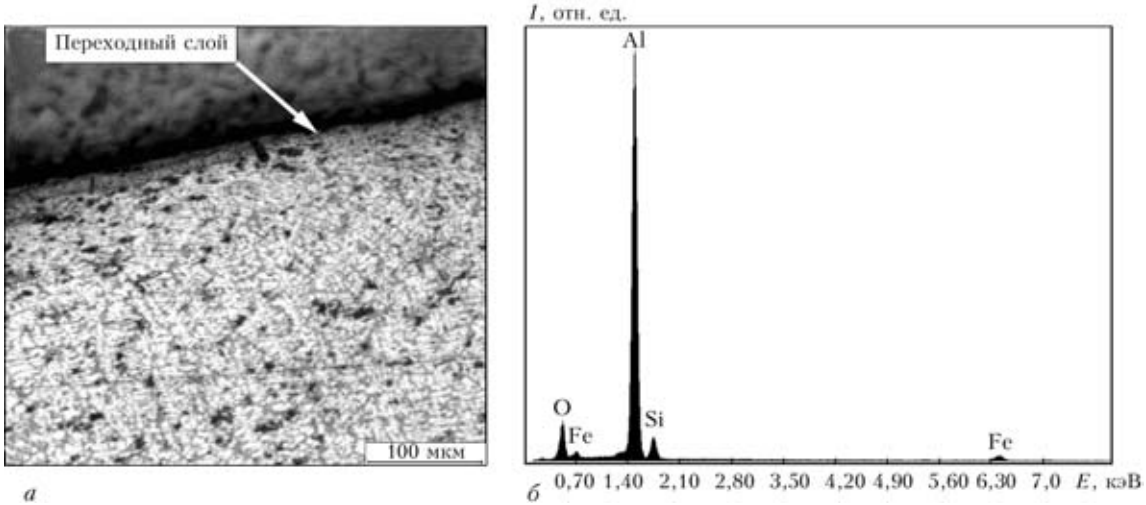


Рис. 7. Микроструктура модифицированного образца из сплава АК9 после испытаний на трение (*а*) и поэлементный состав переходного слоя согласно МРСА (*б*)

ный в процессе трения переходный слой. Согласно МРСА он представляет собой механическую наноструктурированную смесь из материала контртела и испытуемого образца, а также их оксидов (рис. 7, *б*). Появление железа или его оксидов может быть вызвано абразивным воздействием на контртело упрочняющих дисперсных частиц Al_2O_3, SiC, а также кристаллов кремния в составе сплавов АК9 и АК12М2МгН. Чем дисперснее микроструктура образца, испытуемого на трение, тем интенсивнее процессы наноструктурирования в переходном слое, который способствует снижению коэффициента трения и защищает образец от изнашивания.

Исходные образцы, а также образцы после модифицирующей обработки характеризуются коэффициентом стабильности процесса трения скольжения без смазки, близким к единице (табл. 3), что свойственно антифрикционным материалам и является свидетельством устойчивости процесса трения. Видно, что оплавление дугой в магнитном поле приводит к увеличению коэффициента стабильности образцов из дисперсно-наполненных КМ, причем его высокие значения (не ниже 0,9) сохраняются даже при максимальных осевых нагрузках.

Структура и механические свойства поверхностных слоев, оплавленных импульсным лазерным излучением. Поверхности, оплавленные при наименьшем значении расфокусировки луча (Δf = 1 мм или $d_п$ = 0,3 мм), имеют значительную шероховатость и множество углублений во всем диапазоне исследованных значений энергии импульсов. Такое состояние оплавленной поверхности свидетельствует о превышении оптимальной плотности лазерного излучения $E_{опт}$. В результате этого превышения происходит образование значительной доли парогазовой фазы, что приводит к существенному разбрызгиванию и испарению основного металла. Оплавленные поверхности, полученные при расфокусировке Δf = 3 и 5 мм, имеют гладкую поверхность. Ширина полосы оплавления поверхности за один проход составляет не более 1,5 мм.

На рис. 8 показаны микроструктуры оплавленных импульсным лазерным излучением образцов

Таблица 3. Значения коэффициентов стабильности $\alpha_{ст}$ сухого трения скольжения образцов в исходном состоянии и после обработки сварочной дугой в магнитном поле

Материал образца	Состояние и режим обработки	$\alpha_{ст}$ при приложенной осевой нагрузке $F_н$, Н				
		18	28	39	50	60
АК9	Исходное	0,87	0,91	0,92	0,93	0,90
	Обработка при *b* = 0,048 Тл	0,93	0,84	0,85	0,82	0,85
	Обработка при *b* = 0,120 Тл	0,87	0,81	0,82	0,85	0,84
АК12+10 % $Al_2O_{3(40)}$	Исходное	0,94	0,93	0,86	0,88	0,81
	Обработка при *b* = 0,048 Тл	0,81	0,85	0,95	0,95	0,97
	Обработка при *b* = 0,120 Тл	0,95	0,87	0,98	0,94	0,98
АК12М2МгН+12 % $SiC_{(14)}$	Исходное	0,98	0,91	0,91	0,88	0,85
	Обработка при *b* = 0,048 Тл	0,98	0,91	0,95	0,94	0,89
	Обработка при *b* = 0,120 Тл	0,96	0,94	0,93	0,95	0,93

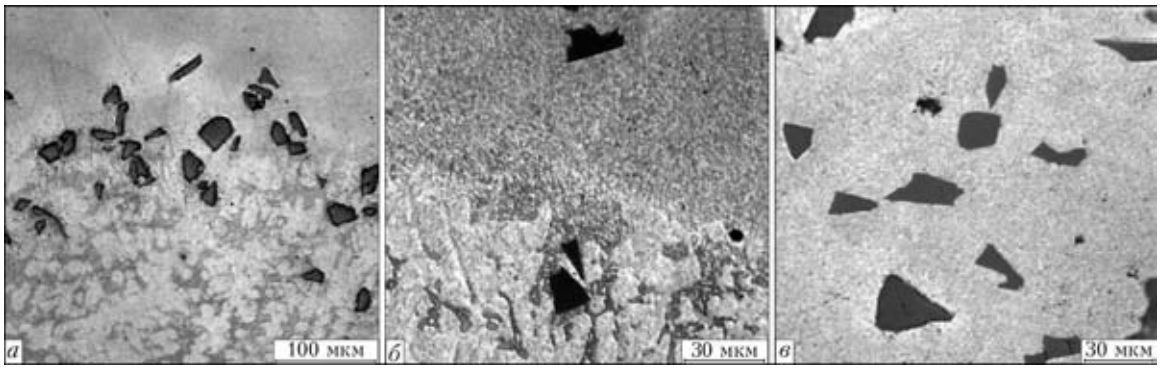


Рис. 8. Микроструктуры КМ АК12М2МгН+5 % $SiC_{(28)}$ после обработки импульсным лазерным излучением (Δf = 1 мм; $W_и$ = = 2250 Вт): *а*, *б* — линия сплавления; *в* — центральная часть

из КМ АК12М2МгН+5 % $SiC_{(28)}$. В оплавленном поверхностном слое КМ присутствует армирующая фаза и частицы сохраняют размеры и скольную огранку во всем диапазоне исследованных режимов. Значения λ при различных режимах лазерного оплавления для Δf = 1/3 мм приведены ниже:

$W_и$, Вт	812,5	1500	2250
λ, мкм	1,90/1,90	1,80/1,70	1,54/1,60.

В результате обработки лазерным излучением происходит измельчение исходной структуры матрицы на порядок и более (в исходном литом состоянии КМ имеет λ = 30 мкм).

Кроме металлографических исследований металла валиков, полученных оплавлением, проводили измерения их твердости при степени расфокусировки Δf = 1 мм, а также в основном металле на расстоянии 5 мм от линии сплавления (она составляет *HV* 130 МПа). Результаты измерений твердости приведены ниже:

W, Вт	815	1500	2250
HV, МПа	161	175	180.

Из полученных результатов видно, что микротвердость возрастает с увеличением мощности импульса, что является следствием не только диспергирования структуры матричного сплава после лазерного оплавления, но и дополнительного легирования матрицы за счет армирующей фазы.

Степень диспергирования структуры алюмоматричных КМ при оплавлении импульсным лазерным излучении больше, чем при оплавлении дуговым разрядом в магнитном поле. Однако производительность дугового оплавления значительно выше (минимальная ширина оплавления при дуговом составляет 6,6 мм при указанном способе обработки со скоростью 14 м/ч составляет 6,6 мм, а при лазерной обработке со скорости 2,7 м/ч — 1,5 мм).

Выводы

1. Показана возможность модифицирования поверхностных слоев алюминиевого сплава АК9 и алюмоматричных КМ при дуговом оплавлении поверхности в магнитном поле и оплавлении импульсным лазерным излучением.

2. При обработке сплава АК9 дуговым оплавлением в магнитном поле параметр уменьшается более чем в 7 раз, КМ АК12+10 % $Al_2O_{3(40)}$ — в 4 раза, при обработке КМ АК12М2МгН+12 % $SiC_{(14)}$ — более чем в 5 раз. Применение четырехполюсной магнитной системы позволяет регулировать геометрические размеры зоны оплавления (ширину и глубину) и дисперсность получаемой структуры.

3. При оплавлении импульсным лазерным излучением наблюдается большее диспергирование структуры КМ. Параметр λ для АК12М2МгН+5 % $SiC_{(28)}$ после лазерной обработки уменьшается в 16 раз, однако производительность процесса оплавления значительно ниже, чем при дуговой обработке.

4. Обработанные поверхности приобретают механические и триботехнические характеристики, превосходящие исходный материал.

5. Процесс дугового оплавления с воздействием на дугу и расплав магнитным полем может применяться для получения высококачественных и однородных по составу износостойких поверхностных слоев из алюмоматричных КМ.

1. *Чернышова Т. А., Кобелева Л. И., Болотова Л. К.* Дискретно армированные композиционные материалы с матрицами из алюминиевых сплавов и их трибологические свойства // Металлы. — 2001. — № 6. — С. 85–98.
2. *Поведение* при сухом трении скольжения дисперсно наполненных композиционных материалов на базе алюминиевых сплавов с различным уровнем прочности / Т. А. Чернышова, Л. И. Кобелева, Л. К. Болотова, Т. В. Лемешева // Перспектив. материалы. — 2005. — № 5. — С. 38–44.
3. *Аргонодуговая* наплавка дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов / Н. В. Коберник, И. В. Бродягина, Г. Г. Чернышов, Т. А. Чернышова // Физ. и химия обработки материалов. — 2005. — № 4. — С. 67–71.
4. *Коберник Н. В.* Изготовление износостойких покрытий аргонодуговой наплавкой композиционного материала

алюминиевый сплав АК12М2МгН — частицы SiC // Загот. пр-ва в машиностроении. — 2008. — № 3. — С. 13–17.
5. *Коберник Н. В.* Аргонодуговая наплавка композиционных материалов системы Al–SiC // Изв. вузов. Машиностроение. — 2008. — № 2. — С. 74–80.
6. *Аргонодуговая* наплавка износостойких композиционных покрытий / Н. В. Коберник, Г. Г. Чернышов, Р. С. Михеев и др. // Физ. и химия обработки материалов. — 2009. — № 1. — С. 51–55.
7. *Коберник Н. В*. Получение износостойких покрытий из композиционных материалов системы Al–SiC аргонодуговой наплавкой // Сварка и диагностика. — 2009. — № 1. — С. 25.
8. *Влияние* способа изготовления присадочного материала на формирование наплавленных покрытий из композиционных материалов / Н. В. Коберник, Г. Г. Чернышов, Р. С. Михеев, Т. А. Чернышова // Там же. — 2009. — № 4. — С. 18–22.
9. *Строганов С. Б., Ротенберг В. А., Гершман Г. Б.* Сплавы алюминия с кремнием. — М.: Металлургия, 1977. — 272 с.
10. *Влияние* микроплазменной обработки на свойства приповерхностного слоя образцов из различных конструкционных материалов / В. Г. Лаптева, Л. И. Куксенова, В. А. Иванов, М. Е. Коныжев // Материалы науч.-техн. конф. с участием иностранных специалистов «Трибология – машиностроению», г. Москва, 2008 г. — CD-ROM. Секция 3. — № 19.
11. *Бирюков В. П.* Лазерное упрочнение поверхностей трения мощными газовыми, твердотельными и волоконными лазерами // Там же. — № 7.
12. *А. с. 654964 СССР.* Магнитная система / А. И. Акулов, Б. К. Буль, Г. Г. Чернышов и др. — Опубл. 1979, Бюл. № 12.
13. *Взаимодействие* металлических расплавов с армирующими наполнителями / Т. А. Чернышова, Л. И. Кобелева, П. Шебо и др. — М.: Наука, 1993. — 272 с.
14. *Влияние* импульсного лазерного излучения на структуру и свойства алюмоматричных композиционных материалов армированных частицами SiC / Р. С. Михеев, Н. В. Коберник, Г. Г. Чернышов и др. // Физ. и химия обработки материалов. — 2006. — № 6. — С. 17–22.
15. *Трение*, износ и смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун и др. — М.: Машиностроение, 2003. — 469 с.
16. *Фукс И. Г., Буяновский И. А.* Введение в трибологию: Учеб. пособие. — М.: Нефть и газ, 1995. — 278 с.

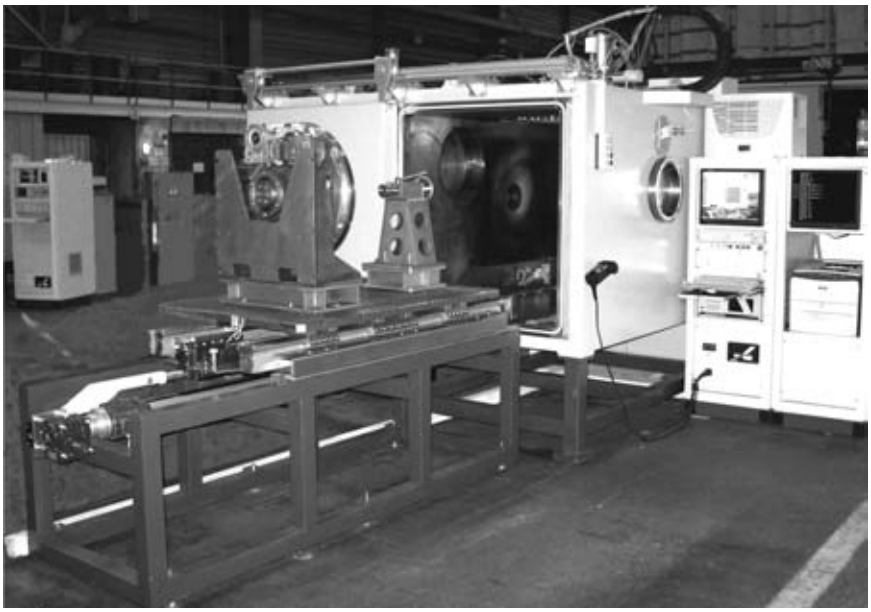
Studied was the possibility of modifying surface layers of antifriction aluminium alloy AK9 and aluminium-matrix composite materials reinforced with particles of silicon carbide SiC and aluminium oxide Al_2O_3 in glazing of surfaces with arc discharge in magnetic field, as well as with pulse laser beam. It is shown that glazing is accompanied by substantial dispersion of the initial surface layer structure. Samples after treatment are characterised by mechanical and tribological properties that are superior to those of the initial material.

Поступила в редакцию 09.03.2010

РАЗРАБОТАНО В ИЭС

ЭЛС в космическом машиностроении

Для ЭЛС титановых шаровых баллонов космического применения созданы специализированные установки КЛ-134 со скользящей по верхней крышке камеры сварочной пушкой и установка КЛ-154.



ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ
тел./факс: (38044) 525-43-19
E-mail: office@technobeam.com.ua

УДК 621.791.03-59:681.31

РЕМОНТ СУДОКОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6 С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **Н. А. ПАЩИН**, канд. техн. наук, **В. П. ЛОГИНОВ**, инж., **А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины), **А. И. БАБУЦКИЙ**, канд. техн. наук (Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины)

Выполнена электродинамическая обработка (ЭДО) сварных соединений из алюминиевого сплава АМг6 в судовых корпусах. При ЭДО натурных образцов сварных соединений получен эффект снижения начального напряженного состояния на 50…60 %. Разработаны технологические рекомендации по ЭДО судовых сварных корпусов. Мониторинг сварных соединений корпусов после ЭДО показал высокую эффективность процесса.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, судокорпусные сварные конструкции, стыковые соединения, остаточные напряжения, импульс электрического тока, электродинамическая обработка, технологические рекомендации, эксплуатационный ресурс, ударные нагрузки, вибрационные нагрузки

В настоящее время в малотоннажном судоходстве широко эксплуатируются сварные корпусные конструкции из алюминиевых сплавов. Это связано с тем, что алюминиевые корпуса по сравнению со стальными и стеклопластиковыми имеют меньшую массу при равном водоизмещении, что снижает эксплуатационные расходы, в частности, на топливо.

Специальные условия работы скоростных судов такие, как высокий уровень вибрационных и ударных нагрузок, приводят к повреждениям сварных соединений корпусов, которые устраняют с помощью ремонтной сварки. При этом в ряде случаев значения остаточных напряжений (ОН) в конструктивных элементах корпуса после ремонта превышают допустимый уровень, что приводит к разрушению сварных соединений и делает дальнейшую эксплуатацию судна невозможной. В связи с этим необходимо проведение исследований прогрессивных и технологичных способов регулирования ОН в корпусах алюминиевых судов, к которым относится обработка конструкции импульсами электрического тока различной длительности и конфигурации. Одним из способов токового воздействия является электродинамическая обработка (ЭДО), основанная на инициировании в изделии токовых разрядов, вызывающих в нем формирование локальных полей пластических деформаций, что стимулирует релаксационные процессы в обрабатываемом металле, которые в свою очередь приводят к снижению общего уровня ОН в конструкции [1–4].

Целью настоящей работы являлось изучение технологических возможностей ЭДО для регулирования ОН при ремонтной сварке трейлерных катеров (ТК) из алюминиевого сплава АМг6.

На современном этапе развития маломерного судостроения в Украине ТК приобретают все большую популярность, благодаря мобильности передвижения по суше на специальной трейлерной тележке.

Сварные ТК (рис. 1), корпуса которых были объектом настоящего исследования, имели габаритные размеры по длине, ширине и высоте соответственно 7,70, 2,63 и 1,20 м. Необходимость минимизации массовых характеристик корпусов, связанная с их транспортировкой по суше, привела к уменьшению толщины применяемых листовых заготовок с 5,0…6,0 до 2,5…3,0 мм, что позволило снизить массу корпуса на 30 %. Уменьшение толщины поясов обшивки компенсируется усилением жесткости продольно-поперечного набора, а заданная геометрия корпуса в районе палубы *1*, днища *4* и носовой оконечности киля *2* обеспечивается жестким профилем трубного сечения. Поперечная жесткость в носовой и кормовой оконечностях задается вертикальной *3* и наклонными *6* сварными стойками, а сопряжение стрингерного набора днища и бортов с кормой осуществляется посредством плоских связей — книц *5*. Насыщение корпуса продольными и поперечными связями обеспечило минимальное отклонение его от заданной геометрии. Так, продольный прогиб не превышал 5 мм, а поперечный — 3 мм, что способствовало достижению удовлетворительных гидродинамических характеристик судна. В то же время высокая жесткость корпуса в сочетании с малыми толщинами набора и обшивки делают его менее стойкими к ударным

© Л. М. Лобанов, Н. А. Пащин, В. П. Логинов, А. Г. Покляцкий, А. И. Бабуцкий, 2010

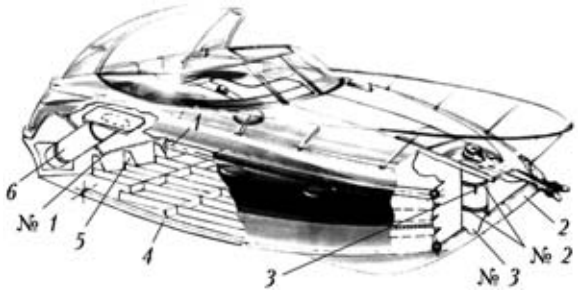


Рис. 1. Схема сварной конструкции корпуса ТК из сплава АМг6: *1* — усиление палубы; *2* — носовая оконечность киля; *3* — носовая стойка; *4* — усиление днища; *5* — кница; *6* — кормовая стойка; № *1* — шов усиления кормы; № *2* — шов стойки; № *3* — шов крепления стойки на форштевне

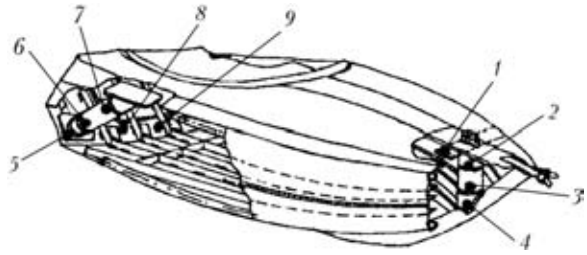


Рис. 2. Расположение характерных повреждений ТК: *1* — усиление носовой лебедки; *2–4* — разрушения носовой стойки; *5–7* — места разрушения кормовой стойки; *8*, *9* — усиление кормы под двигателем

и вибрационным нагрузкам по сравнению с судами традиционной постройки.

При эксплуатации партии ТК в некоторых из них появились повреждения сварных соединений, несовместимые с дальнейшей эксплуатацией судов. Расположение характерных повреждений корпусов показано на рис. 2. В носовой части трещины фиксировали в швах усиления носовой лебедки *1*, соединениях носовой стойки *2*, *3* и в местах ее крепления на киле *4*. В кормовой оконечности разрушения имели место в креплениях стоек к корме *5* и в сварных швах стоек *6*, *7*, а также усилении под двигателем *8*, *9*.

Работоспособность конструкций восстанавливали с помощью технологии ремонта, разработанной для изготовления крупногабаритного корпуса океанской гоночной яхты из алюминиевого сплава АМг5М [5]. После определения дефекта проводили его маркировку разметочным инструментом с последующей механической разделкой дисковой фрезой на всю толщину соединения. Принимали V-образную форму разделки трещины с углом, не превышающим более 30°. При этом длина ремонтного шва превышала длину разделанного участка на 30 мм с каждой стороны для гарантированного переплавления микротрещин. Стыковые соединения *2–4*, *6*, *7* (рис. 2) при ремонте кольцевых швов носовых и кормовых стоек с толщиной стенки до 3 мм выполняли за один проход ручной сваркой неплавящимся электродом в аргоне с использованием присадочного прутка диаметром 2 мм марки СвАМг6. Сварочный ток составлял 120 А, а расход аргона — 7 л/мин. Прямолинейные участки швов внахлест толщиной (3 + 6) мм при ремонте усиления лебедки *1* и кормовых стоек *5* выполняли сваркой на токе 200 А с присадочной проволокой диаметром 3 мм. На аналогичном режиме осуществляли ремонт тавровых соединений стрингеров кормового подкрепления *9* толщиной (3 + 6) мм (рис. 3). Разрушения в углах усиления кормы *8*, сваренного из листов различной толщины (3 + 6) мм, устраняли путем механической V-образной разделки на глубину 3 мм от лицевой поверхности швов с последующей подваркой на токе, не превышающем 150 А.

После завершения ремонтных мероприятий в ряде случаев наблюдали разрушение отремонтированных швов при минимальном пробеге судов. Повторная ремонтная сварка приводила к перегреву металла, что понижало его механические свойства. На основе анализа эксплуатационных повреждений сделано предположение, что их возможной причиной является высокий уровень ОН в восстановленных соединениях. Это связано с тем, что корпуса изготавливали методом поузловой сборки, обеспечивающим свободную усадку швов при сварке и, как следствие, минимальный уровень ОН в соединениях. Ремонтные мероприятия проводили в готовых корпусах в условиях «жесткого закрепления» поврежденных элементов, что исключало свободную реализацию усадочных укорочений, и, как следствие, повышало уровень ОН. Сочетание ударных и вибрационных нагрузок с высоким уровнем ОН в восстановленных элементах корпуса приводит к повреждаемости судна при минимальном пробеге.

В связи с отсутствием условий для реализации свободной усадки при ремонте сварных соединений ТК для регулирования уровня ОН использовали ЭДО. Для оценки влияния ремонтных швов и их последующей обработки на уровень ОН в поврежденных узлах ТК изготовили натурные образцы конструктивных элементов корпуса. Использовали образцы продольного стыкового соединения усиления кормы переменной толщины (3 + 6) мм размером 400×400 (рис. 1, шов № *1*), а в качестве образца стойки (рис. 1, шов № *2*) — трубу длиной 300 мм, диаметром 100 мм с толщиной стенки 3 мм с центральным кольцевым швом. Режимы ручной сварки образцов соответствовали принятым при изготовлении корпусов. Измерения начальных значений продольных ОН вдоль центральной оси шва проводили механическим деформометром с базой 30 мм. На образцах воспроизвели технологические операции разделки и заварки повреждений на штатном режиме, принятом при ремонте кормы судна. Затем осуществляли ЭДО образцов серией токовых импульсов. Обработку выполняли ручным инструментом

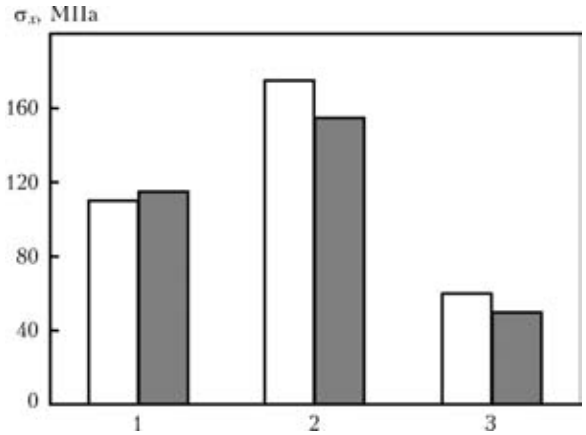


Рис. 3. Продольные ОН в образцах продольных (белые столбики) и кольцевых (черные) швов: 1 — начальные ОН; 2 — после ремонтной сварки; 3 — после ЭДО

Рис. 4. ЭДО сварных соединений усиления кормы корпуса ТК

(РИ), представляющим собой цилиндрический электрод из меди марки М1, который находится в изолированном корпусе [2]. Энергия импульса тока при ЭДО передается при касании РИ в заданной области обрабатываемой поверхности.

После ремонтной сварки и обработки производили текущие измерения ОН в швах, результаты которых представлены на рис. 3. На основе данных рисунка, можно сделать следующий вывод: если начальный уровень ОН в швах не превышал 120 МПа, то после ремонта кольцевых и продольных швов он повысился соответственно на 35 и 60 % и достиг 155…175 МПа, что может негативно сказаться на служебных характеристиках материала. После выполнения ЭДО значения ОН снизились более чем на 65 % и не превысили 50…60 МПа, что подтверждает эффективность этого вида обработки.

На основании результатов проведенных экспериментов по ЭДО образцов продольных и кольцевых стыков разработаны следующие технологические рекомендации по импульсной обработке проблемных сварных элементов корпусов маломерных судов из сплава АМг6: перед ЭДО сварных швов в отсеке судна следует очистить обрабатываемую зону от посторонних предметов, инструмента, кабельных и шланговых магистралей; обеспечить доступ РИ к зоне обработки на расстоянии не менее 20 мм от линии сплавления сварного шва; не допускать установки РИ в заданной точке обрабатываемой поверхности более чем на один разряд тока; выполнять ЭДО в нижнем и горизонтальном положении РИ в направлении от середины к краям шва; ЭДО круговых и кольцевых швов осуществлять в направлении вразбежку.

На основе разработанных рекомендаций осуществили обработку конструктивных элементов сварных корпусов ТК из сплава АМг6 в количестве семи единиц. Выполняли ЭДО сварных соединений носовых и кормовых отсеков, а также отдельных участков силового набора после ремонтной сварки (рис. 4).

В период навигации 2009 г. проводили мониторинг сварных соединений судовых корпусов, на которых выполнили ЭДО после ремонтной сварки. Результаты осмотра показали, что за этот период ТК прошли без повреждений от 300 до 1320 км пробега, при этом следов повреждений в виде микротрещин в зоне обработки не обнаружено.

Таким образом, можно заключить, что ЭДО является эффективным способом продления эксплуатационного ресурса тонкостенных корпусных конструкций из алюминиевых сплавов после ремонтной сварки.

1. *Исследование* влияния импульсной обработки на повышение ресурса металлических конструкций / Л. М. Лобанов, Н. А. Пащин, В. П. Логинов и др. // Автомат. сварка. — 2005. — № 11. — С. 28–32.
2. *Влияние* электродинамической обработки на напряженно-деформированное состояние сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 / Л. М. Лобанов, Н. А. Пащин, В. П. Логинов и др. // Там же. — 2007. — № 6. — С. 11–13.
3. *Влияние* электродинамической обработки на напряженное состояние сварных соединений стали Ст3 / Л. М. Лобанов, Н. А. Пащин, В. П. Логинов и др. // Там же. — 2007. — № 7. — С. 10–12.
4. *Особенности* формирования пластических деформаций при электродинамической обработке сварных соединений стали Ст3 / Л. М. Лобанов, В. И. Махненко, Н. А. Пащин и др. // Там же. — 2007. — № 10. — С. 10–16.
5. *Обеспечение* точности изготовления сварного корпуса океанской гоночной яхты / Л. М. Лобанов, В. И. Павловский, А. Н. Грищенко, Н. А. Пащин // Там же. — 1993. — № 3. — С. 40–43.

An electrodynamic treatment (EDT) of welded joints from aluminum alloy AMg6 in ship hulls was carried out. An effect of 50...60 % reduction of initial stressed state was obtained at EDT of full-size samples of welded joints. Technological recommendations for EDT of ship welded hulls were developed. A high process efficiency was shown by monitoring of welded joints of hulls after EDT.

Поступила в редакцию 06.04.2010

УДК 621.791.1/.8+621.791.94]03

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ ШЛАНГ-ПАКЕТЫ ДЛЯ ПОДВОДНОЙ СВАРКИ И РЕЗКИ

В. Н. МАРТИНОВИЧ, **Н. П. МАРТИНОВИЧ**, инженеры (ООО «НПО «Виток», г. Донецк),
В. А. ЛЕБЕДЕВ, **С. Ю. МАКСИМОВ**, доктора техн. наук, **В. Г. ПИЧАК**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
И. В. ЛЕНДЕЛ, инж. (Опытный з-д механич. свароч. оборуд., г. Ильница)

Рассмотрены примеры конструкций специализированной кабельной продукции для применения в механизированном оборудовании для сварки, наплавки и резки — полуавтоматов. Показаны возможности новых разработок кабелей для изготовления шланговых держателей, проанализированы их преимущества, технические характеристики, обозначены области их эффективного применения. Особое внимание уделено кабелям для питания систем полуавтоматов при их работе в экстремальных условиях.

Ключевые слова: дуговая сварка, полуавтоматы, коммуникации, кабель, шланговый держатель, конструкция, производство, условия эксплуатации

Совершенствование механизированного оборудования для сварки, наплавки и резки традиционно осуществляется посредством улучшения характеристик источников сварочного тока, механизмов подачи, систем управления и регулирования [1, 2] и др. Уделяется внимание и другим комплектующим оборудования данного типа. Это элементы коммуникаций (сварочные кабели, шланговые держатели), основу которых составляет специальный кабель [3]. При этом задачи, решаемые с помощью полуавтоматов, столь разнообразны (различные электродные проволоки, среда и условия эксплуатации и пр.), что требуют особого подхода к элементам коммуникаций, а это, естественно, предопределяет отличия в их конструкциях. И если задача выбора сварочных кабелей для обычных условий решается путем выбора из того, что уже выпускается промышленностью в достаточном количестве и хорошо себя зарекомендовало (например, сварочный кабель КОГ), то для особых условий эксплуатации (механизированная сварка под водой) требуются кабели с новыми характеристиками. Это в большей степени относится к кабельной продукции, являющейся основой для разработки и производства отечественных шланговых держателей различного назначения. Основная функция направляющего канала в шланговом держателе — обеспечить подачу электродной проволоки без рывков и заклиниваний с заданным алгоритмом движения при реализации модулированных режимов работы, движений с регулируемыми импульсными составляющими.

Цель настоящей работы — на примерах новых разработок специфичных кабелей рассмотреть возможность их использования в системах полуавтоматов для сварки сплошными и порошковыми электродными проволоками.

До настоящего времени сварочные полуавтоматы для сварки в защитном газе комплектовали полыми электросварочными кабелями марки КПЭС. В них полый внутренний канал выполнен в виде стальной спирали с наружной изоляцией, на которую навиты силовая жила и жилы управления, а поверх наложена оболочка из резины. Кроме них, использовали кабели марки КПЭСГ и аналогичной конструкции зарубежные кабели. В них полый внутренний канал выполнен в виде полимерной остаточно жесткой трубки, на которую навиты силовая жила и жилы управления, а поверх также наложена резиновая оболочка. Указанные электросварочные кабели по своему техническому уровню не соответствуют современным требованиям, основными недостатками таких кабелей являются их значительная жесткость и малый срок службы. Кроме того, конструкция кабеля КПЭСГ не предусматривает подачу по нему защитного газа в зону сварки, а конструкция кабеля КПЭСГ не обеспечивает сохранение заданной формы канала после перегибов кабеля и приложения к нему поперечных нагрузок, при которых пластмассовый канал деформируется, что затрудняет установку в него сменного направляющего канала для проволоки.

С целью устранения указанных выше недостатков сварочных кабелей ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона совместно с ООО «НПО «Виток» разработаны и изготовлены новые конструкции кабелей полых электросварочных гибких упрочненных марок КПЭСГУ с резиновой оболочкой и КПЭСГУВ с поливинилхлоридной (ПВХ) оболочкой, предназначенные для подвода под рабочим напряжением до 100 В постоянного тока или до

© В. Н. Мартинович, Н. П. Мартинович, В. А. Лебедев, С. Ю. Максимов, В. Г. Пичак, И. В. Лендел, 2010

42 В переменного тока частотой 50 Гц, подачи электродных проволок и защитного газа в зону сварки, а также передачи сигналов управления.

Внешний вид полого электросварочного гибкого упрочненного кабеля с медными жилами представлен на рис. 1. Он содержит полый эластичный пластмассовый или резиновый канал *3*, обвитый металлической однопроволочной цилиндрической спиралью *5*, на которую навиты стренги *6* основной жилы и жилы *4* управления, а поверх них наложена защитная резиновая или ПВХ оболочка *7*. Канал *3* обеспечивает подачу защитного газа в зону сварки; в нем размещается также сменная стальная спираль *2* для подачи сварочной проволоки *1*. При использовании такой конструкции при разработке шлангового держателя для подачи проволок из алюминиевых сплавов вместо стальной сменной спирали устанавливается также сменная трубка из фторопласта или углепластика.

В результате выполнения полого канала в виде эластичной полимерной трубки, обвитой цилиндрической металлической спиралью, значительно увеличиваются гибкость кабеля при любой температуре окружающей среды, срок его службы, при любых перегибах кабеля сохраняется цилиндрическая форма эластичной полимерной трубки (канала), что обеспечивает беспрепятственную замену сменного направляющего канала (сменной стальной спирали или пластикового канала), который довольно быстро выходит из строя вследствие истирания его сварочной проволокой.

Количество и номинальное сечение жил (основной и управления), номинальные внутренний диаметр канала и наружный диаметр кабеля указаны в таблице.

Испытания конструкций шланговых держателей, созданных с применением рассмотренного кабеля, показали их высокую надежность. Сравнение со шланговыми держателями известной германской фирмы «BINZEL» в нештатных ситуациях проводили при резких перегибах кабеля (угол 90° и более) с радиусом загиба, который образуется при усилии 200…300 кН, что достаточно часто происходит при манипулировании шланговым держателем, в частности, при транспортировании или повороте механизма подачи из-за подтягивания шлангового держателя. После нескольких таких циклов подача проволоки по каналу держателя фирмы «BINZEL» затрудняется, работоспособность шлангового держателя на основе кабеля КПЭСГУ сохраняется. Испытания рассматриваемого кабеля в составе шлангового держателя при подаче по его каналу электродных проволок типа Св-08Г2С разных диаметров показали, что проволока диаметром 1,2 мм может перемещаться с допустимыми колебаниями скорости на выходе при длине канала 3,5…4,5 м, а проволока диаметром 1,6…2,0 мм — при длине

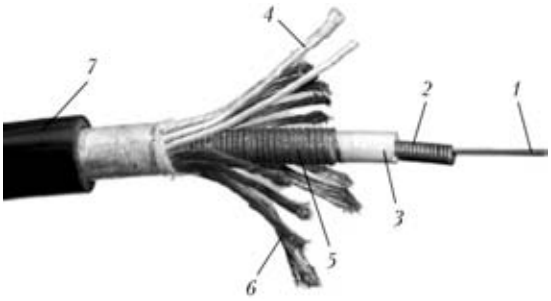


Рис. 1. Внешний вид кабеля для механизированного сварочного оборудования КПЭСГУ (*1–7* — см. текст)

канала 6,0 м. Таким образом, очевидно, что новая конструкция кабеля обеспечивает существенное расширение зоны обслуживания полуавтоматов для сварки и наплавки.

Кабели КПЭСГУ постепенно вводят в конструкции шланговых держателей современных типов, которые производят в Украине (ОЗМСО г. Ильница) и РФ (фирма «Линкор», г. Ставрополь).

Следует отметить, что по согласованию с потребителем допускается изготовление кабелей, имеющих сечение основной жилы, сечение жил управления, их количество, диаметры элементов канала и кабеля, отличающиеся от указанных в таблице.

Весьма сложной является задача создания кабеля для питания электропривода механизма подачи и систем управления и регулирования сварочного полуавтомата для сварки и резки на значительных глубинах (более 200 мм) [4].

Нами проведен комплекс исследований механической прочности и электрических характеристик (нагрева, затухания сигнала управления и падения напряжения на проводах питания) кабеля. Предприятием ООО «НПО «Виток» разработан и изготавливается кабель гибкий бронированный упрочненный марки КГБУ, поперечное сечение

Технические характеристики кабелей для механизированного сварочного оборудования

Номинальное сечение жилы, мм^2		Номинальный диаметр трубки канала, мм		Диаметр спирали канала, мм, не более
основной	управления	внутренний	наружный	
10	От 0,35 до 1,00	5,0	6,5	8,3
12		5,0	6,5	8,3
16		5,0	6,5	8,3
25		6,5	8,1	10,0
35		6,5	8,1	10,0
35		7,5	9,5	11,3
50		7,5	9,5	11.5
70		7,5	9,5	11,9
50		9,0	11,0	12,9
70		9,0	11,0	13,4

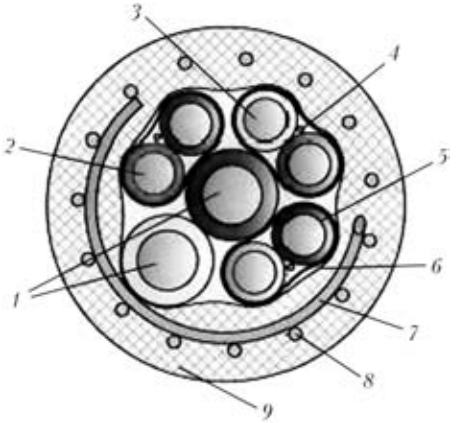


Рис. 2. Поперечное сечение кабеля полуавтомата для подводной сварки и резки (*1–9* — см. в тексте)

которого представлено на рис. 2. Кабель предназначен для управления аппаратами для подводной сварки при напряжении постоянного тока до 220 В и выполнен из изолированных ПВХ пластикатом гибких медных жил: двух жил *1* сечением 2,5 мм^2, трех витых пар жил *2*, *3* и *5* сечением 0,75 мм, экранированных фольгированной пленкой (фолсаном, алюмофлексом) и медной проволокой *4* диаметром не менее 0,15 мм, проложенной продольно под фольгированной пленкой.

Все витые пары и жила *1* скручены вокруг центральной жилы *1*. Поверх скрученных жил последовательно наложены полиэтилентерефталатная пленка ПЭТ-Э *6* с перекрытием не менее чем в три слоя, гибкая броня в виде витков однопроволочной спирали *7* из стальной плоской проволоки толщиной (0,85±0,10) мм и шириной (2,5±0,3) мм с осевым зазором между ее витками, составляющим не более двух размеров ширины проволоки, упрочняющие полиэфирные нити *8* и ПВХ оболочка *9*.

Жилы витых пар скручены между собой с шагом скрутки не более 10 наружных диаметров по скрутке. Фольгированная пленка навита на скрученную пару с перекрытием не менее 10 %.

Наружный диаметр кабеля составляет не более 20,5 мм, минимальный внутренний радиус петли изгиба кабеля — не менее 7 его наружных диаметров, разрывное усилие кабеля — не менее 1900 Н. Расчетная масса кабеля — 0,61 кг/м.

Наличие гибкой брони из стальной плоской проволоки обеспечивает прочностные характеристики кабеля в осевом и радиальном направлениях (в случае работы в глубоководной среде) при сохранении необходимой гибкости.

Испытания кабеля, в том числе в водной среде с соленостью 3,5 %, показали его высокое качество, по совокупности параметров он практически не имеет аналогов.

Для изготовления указанных кабелей ООО «НПО «Виток» (г. Донецк) по изобретениям [5, 6] разработало и изготовило уникальное оборудование для непрерывной навивки невращающихся металлических однопроволочных цилиндрических спиралей на любые заготовки, например в виде гибких труб, жил кабелей, в том числе скрученных. С использованием таких спиралей в качестве гибкой брони разрабатывают и изготавливают многие конструкции грузонесущих кабелей повышенной гибкости с повышенными взрыво-, электро- и пожаробезопасными свойствами. Их срок службы увеличился не менее чем в три раза по сравнению с кабелями с аналогичными жилами, но без гибкой брони. Эти разработки могут быть применены для сварочного, наплавочного и режущего оборудования, эксплуатируемого в экстремальных условиях.

Следует отметить, что в Украине имеется высокоэффективное предприятие ООО «НПО «Виток» по выпуску качественной кабельной продукции широкого спектра применения, оснащенное собственным оборудованием для обеспечения полного цикла производства с применением современных материалов. Это предприятие способно осуществить разработку и выпуск специальных конструкций кабелей по заданиям заказчика и в соответствии с его требованиями.

1. *Бельфор М. Г., Патон В. Е.* Оборудование для дуговой и шлаковой сварки и наплавки. — М.: Высш. шк., 1974. — 338 с.
2. *Лебедев В. А., Пичак В. Г., Смолярко В. Б.* Механизмы импульсной подачи электродной проволоки с регулированием параметров импульсов // Автомат. сварка. — 2001. — № 5. — С. 31–37.
3. *Чвертко А. И., Пичак В. Г.* Оборудование для дуговой и шлаковой сварки и наплавки. — Киев: Наук. думка, 1983. — 56 с.
4. *Новое* поколение полуавтоматов для подводной механизированной сварки и резки / К. А. Ющенко, В. А. Лебедев, В. Г. Пичак, С. Ю. Максимов // Сварка и диагностика. — 2009. — № 4. — С. 3l–37.
5. *А. с. 1440590 СССР.* Устройство для навивки спирали / Н. П. Мартинович, Э. П. Путилов. — Опубл. 07.01.87; Бюл. № 44.
6. *А. с. 1688961 СССР.* Устройство для навивки спирали / Н. П. Мартинович. — Опубл. 24.08.89; Бюл. № 41.

Considered are the examples of designs of special cable products for application in mechanized equipment for semi-automatic welding, surfacing and cutting. Possibilities of new cable developments for manufacture of hose holders were shown, their advantages and technical characteristics were analyzed, and areas of their effective application were described. Special attention was focused on cables for power supply of semi-automatic systems at their work under extreme conditions.

Поступила в редакцию 12.03.2010

УДК 621.791.052:620.179.16

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДИАГНОСТИКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КОНСТРУКЦИЯХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

В. А. ТРОИЦКИЙ, д-р техн. наук, **В. П. ДЯДИН**, **Е. А. ДАВЫДОВ**, кандидаты техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализированы результаты диагностики нефтехимического оборудования, полученные специалистами ИЭС им. Е. О. Патона НАН за последние 10 лет. Определены наиболее характерные участки аппаратов, склонных к эксплуатационным повреждениям, и предложены методы их контроля на базе УЗД. Отмечено, что наиболее часто встречающейся ошибкой при ремонте сварных соединений теплоустойчивых сталей является неполный их отпуск в зонах стыковки элементов, выполненных из различных конструкционных материалов. Предложены рекомендации по выбору материалов при замене оборудования, исчерпавшего свой срок эксплуатации.

Ключевые слова: сварные конструкции, эксплуатационный дефект, диагностика, низкотемпературное водородное расслоение, трещина, высокотемпературное растрескивание, термообработка, влияние среды, ультразвуковой контроль

В связи с резким увеличением цен на энергоносители и износом основного оборудования значительная часть предприятий нефтегазового комплекса нуждается в техническом переоснащении. Проведение реконструкции в первую очередь связано как с необходимостью уменьшения энергозатрат при производстве того или иного вида продукции, так и с увеличением глубины переработки используемого сырья.

Учитывая, что значительная часть дорогостоящего оборудования находится в эксплуатации более 20–30 лет, речь может идти только о его поэтапной модернизации.

Таким образом, возникает необходимость дальнейшего использования части технологического оборудования, отработавшего свой нормативный срок эксплуатации, что, в свою очередь, требует разработки более точных методов неразрушающего контроля и оценки возможной его дальнейшей эксплуатации.

В последние годы появились достаточно совершенные методы ультразвукового (УЗ) контроля на основе анализа времени прихода дифрагированных УЗ волн, отраженных от острых краев внутренних дефектов. Эти методы, условно обозначаемые как TOFD, SAFT, тандем и т. п., позволяют находить трещины, коррозионные, водородные и другие растрескивания, которые возникают в процессе эксплуатации.

© В. А. Троицкий, В. П. Дядин, Е. А. Давыдов, 2010

К основным условиям эксплуатации сварных конструкций обычно относят среду, с которой они контактируют, нагрузки, температуру, радиацию и время их совокупного воздействия.

Влияние нагрузки различают по длительности воздействия и скорости приложения (статические, циклические, динамические и др.). Нагрузки могут возникать как от внешних воздействий, так и собственных деформаций при структурных превращениях и неравномерных нагревах. В сочетании с формой сварных соединений и элементов конструкций образуются сложные локальные напряжения, которые оказывают влияние на прочность и дальнейшую работоспособность сварных конструкций.

Различают циклический и динамический характер нагружения, который также относят к наиболее тяжелым режимам работы сварных конструкций. Многие стали чувствительны к скорости приложения нагрузок, особенно при наличии концентраторов напряжений, что, в свою очередь, требует проведения термической обработки после сварки и предъявления более жестких требований к нормам неразрушающего контроля ответственных элементов.

Для обеспечения устойчивости сварных конструкций при воздействии больших сжимающих усилий основное значение играет толщина применяемого металла, форма конструктивных элементов. Температурные требования также существенно зависят от материала. Например, черные металлы характеризуются пониженной прочностью при наличии концентраторов напряжений, что диктует определенные требования к выбору металла, его термообработки и к допускаемым размерам дефектов.

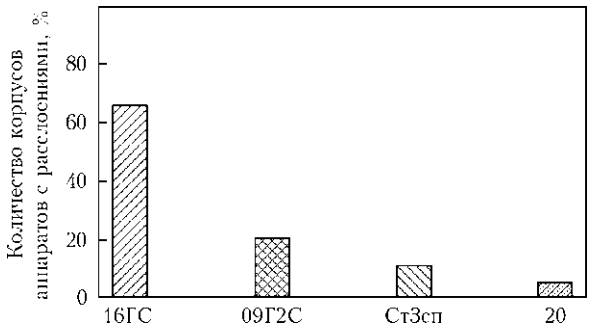


Рис. 1. Доля корпусов аппаратов с обнаруженными в них коррозионными расслоениями

Особая ситуация возникает в области высоких температур эксплуатации оборудования, где важен правильный выбор соответствующей жаропрочной стали. В противном случае при длительном воздействии температуры это может привести к изменению прочности и пластичности материала, его структуры, тепловому охрупчиванию и разрушению.

Влияние среды на конструкцию еще более разнопланово. Например, коррозия металла при сочетании с нагрузками дает коррозионное растрескивание и усталость. Влияние температуры и нагрузок еще более усугубляет ситуацию.

Ниже приведены результаты технической диагностики оборудования нефтехимической промышленности, проведенные сотрудниками ИЭС им. Е. О. Патона за последние десять лет.

Наряду с накоплением данных о характерных дефектах и совершенствованием методик неразрушающего контроля также исследовали различные аспекты возможной деградации служебных свойств конструкционных материалов и сварных соединений в агрессивных средах при нормальных и повышенных температурах.

Коррозионные повреждения нефтехимического оборудования (НХО) при переработке нефти вызываются ее неизбежными примесями [1]: сера-, хлор-, кислородоорганическими соединениями, пластовой водой и продуктами их термического расщепления. Агрессивность возникающих компонентов определяется как составом сырья, так и параметрами режима технологических процессов при его переработке (давление, температура и др.). Можно выделить следующие факторы, обусловливающие коррозионное разрушение НХО:

— расщепление сернистых соединений нефти и хлоридов, приводящих к образованию агрессивных составляющих, таких, как хлористый водород и сероводород;

— наличие водных электролитических сред, способствующих коррозионному растрескиванию, низкотемпературному водородному расслоению и водородной хрупкости сталей;

— применение щелочных агентов, способствующих возникновению каустической хрупкости сварных соединений из черных металлов;

— образование сероводорода при высоких температурах, приводящих к ускорению коррозионных процессов;

— увеличение агрессивности охлаждающих вод;

— появление кислых соединений (нафтеновые кислоты);

— наличие двухфазных сред и др.

Учитывая подвижность коррозионных сред в процессе переработки нефти, также создаются условия для возникновения комбинированных форм коррозионного разрушения (сочетание питтинговой коррозии с коррозионным растрескиванием, коррозии под напряжением с межкристаллитным растрескиванием и др.).

Многолетние обследования НХО, которое эксплуатировалось в широком диапазоне температур, давления, агрессивности среды, содержании H_2, H_2S и др., позволили выявить большое количество случаев низкотемпературных слоистоводородных повреждений корпусов аппаратов, изготовленных из низкоуглеродистых и низколегированных сталей. На рис. 1 приведена гистограмма распределения повреждений по маркам сталей относительно общего количества исследованных случаев. На качественном уровне рис. 1 хорошо отражает реальное состояние оборудования. Так, наибольшую склонность к низкотемпературному слоистому водородному расслоению проявляют металлоконструкции, изготовленные из сталей марок 16ГС и 09Г2С, в отличие от аппаратов, изготовленных из сталей марок сталь 20, сталь Ст3сп.

Анализ технического состояния НХО показывает, что различие в степени повреждаемости в основном связано с особенностями структурной текстуры металлопроката [2] и диффузионными процессами, идущими по границам залегания неметаллических включений [3, 4]. Это лишний раз подчеркивает необходимость как пересмотра класса сталей, пригодных для изготовления НХО, эксплуатируемого в сероводородных средах, так и использования методик ультразвукового контроля (УЗК) на основе регистрации дифрагированных УЗ колебаний.

На практике выявлено значительное количество случаев, когда изготовленное оборудование из сталей марок 09Г2С и 16ГС, без уточнения требований к их категориям, подвергалось отб-

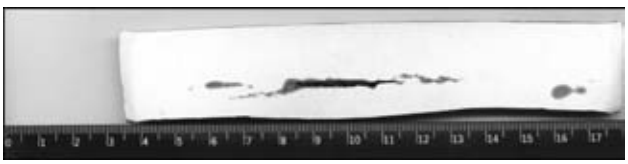


Рис. 2. Слоистое растрескивание по толщине листа

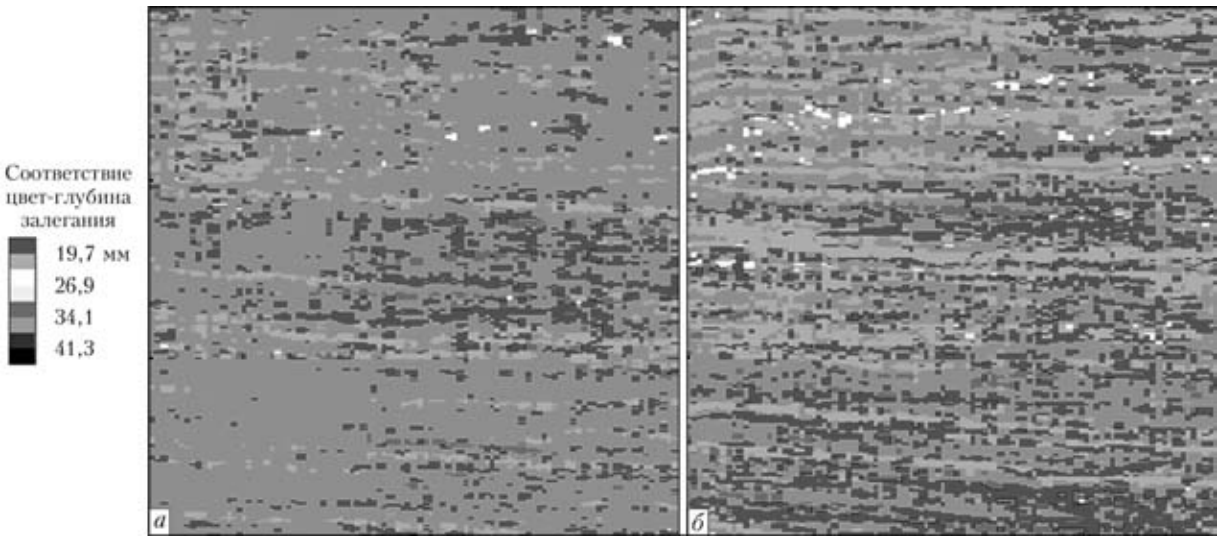


Рис. 3. Контроль роста несплошностей в металле корпуса абсорбера из стали 09Г2С толщиной 48 мм за год эксплуатации (реперный участок размером 750×750 мм): *а* — первичное сканирование; *б* — повторное сканирование того же участка через год

раковке уже через 2–4 года эксплуатации. Для металлопроката с резко выраженной зональной сегрегацией, залегающей на глубинах, равных половине или трети толщины листа, слоистые растрескивания развиваются в зоне, характеризующейся значительной анизотропией прочностных свойств в направлении толщины. Данный тип повреждений может отличаться по своей скорости развития в плоскости листа, носить ступенчатый или плоскостной характер. По мере накопления повреждений в дальнейшем может наблюдаться деформирование более тонкой стенки под действием внутреннего давления.

Исследования металлопроката УЗК системой P-Scan показали, что с повышенным содержанием серы и более равномерным распределением сульфидных включений по толщине листа слоистые растрескивания в основном носят ступенчатый характер (рис. 2).

Слоистому водородному растрескиванию НХО, изготовленному из низколегированных сталей 16ГС, 09Г2С и низкоуглеродистой стали Ст3сп5, подвергались газовые абсорберы, которые находились в эксплуатации свыше 20 лет при температурах 30…50 °С в средах, содержащих 15%-й водный раствор моноэталомина (МЭА), углеводородный газ, а также H_2 и H_2S в различных массовых процентах.

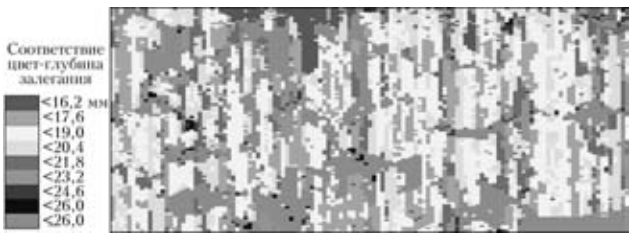


Рис. 4. Данные сканирования на участке корпуса абсорбера, изготовленного из стали 16ГС толщиной 28 мм (размер участка 250×500 мм)

На рис. 3 представлены дефектограммы участков сканирования корпуса абсорбера из стали 09Г2С толщиной 48 мм. Обследуемый участок находился вдали от ввода агрессивной среды. Видно, что процесс слоистого водородного растрескивания носит как плоскостной, так и ступенчатый характер с доминирующей скоростью развития в направлении плоскости проката. Ступенчатый характер растрескивания в этом случае определяется значительной толщиной сегрегационной зоны. На рис. 4 показан участок сканирования корпуса абсорбера, расположенный напротив ввода водородсодержащего газа (сталь 16ГС, толщина 28 мм). На рисунке достаточно четко просматриваются два слоя, подверженных слоистому водородному растрескиванию, залегающих на глубинах 12…16 и 18,5…24 мм от наружной поверхности. Слой на глубине 18,5…24 мм находится на завершающей стадии, о чем свидетельствует ступенчатое развитие процесса растрескивания по границам развитых несплошностей и видимое пластическое деформирование тонкой стенки под действием давления молизованного газа в полостях. Слой на глубине 12…16 мм подвержен менее интенсивному растрескиванию. Последнее объясняется его экранированием слоем на глубине залегания 18,5…24,0 мм.

Участок сканирования корпуса абсорбера, изготовленного из стали марки Ст3сп5 толщиной 12 мм, имеет некоторые отличия в характере слоистого растрескивания от рассмотренных выше. Как видно из рис. 5, размеры несплошностей в плоскости листа несколько меньше, чем на рис. 3, 4, ступенчатое развитие процесса слоистого растрескивания выходит на внутреннюю поверхность.

Рис. 5. Фрагмент участка сканирования с водородным растрескиванием элемента корпуса абсорбера, изготовленного из стали Ст3сп5 толщиной 12 мм (размер участка 250×250 мм)

В данном случае доминирующее развитие процесса водородного растрескивания происходит в направлении толщины листа. Подобный процесс растрескивания наблюдается и для стали 20, что также связано с особенностями структурной текстуры металлопроката и диффузионными процессами, идущими по границам залегания неметаллических включений.

В процессе диагностических обследований НХО особое внимание уделялось зонам, подверженным наиболее интенсивному слоистому водородному растрескиванию. К ним в первую очередь следует отнести область ввода водородсодержащих продуктов; участки по линиям раздела сред; застойные зоны; области пластических деформаций и зоны остаточных напряжений.

В области ввода водородсодержащих продуктов, кроме относительно высокого содержания водорода, всегда присутствует в той или иной мере действие потока (струи), которое способствует диффузионному насыщению металла в районе контакта, и как следствие, приводит к большим скоростям развития слоистого растрескивания по сравнению с другими частями аппарата. В качестве примера на рис. 6 приведена ультразвуковая оценка несплошностей на участке корпуса колонны. Указанный участок располагался напротив ввода водного раствора МЭА в аппарат. В отличие от других участков колонны, которые также имели слоистые повреждения в металле, приведенная на рисунке область отличается значительной интенсивностью развития водородного растрескивания. Как правило, такие области носят локальный характер, что позволяет провести их ремонт без демонтажа колонны. В последнее время на отечественных предприятиях нефтепереработки участились случаи полной замены обечаек в зонах ввода продукта, что, кроме значительного удорожания ремонтных работ, никак не влияет на дальнейшую работоспособность оборудования.

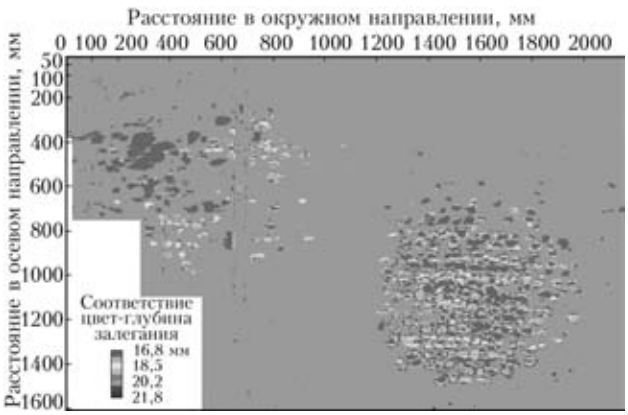


Рис. 6. Данные сканирования на участке корпуса колонны, противоположного вводу продукта (водный раствор МЭА) (размеры участка 1600×2000 мм, толщина металла 22 мм)

Достаточно частым случаем является сочетание питтинговой коррозии с низкотемпературным водородным расслоением металла по линии раздела фазовых состояний сред. Как правило, такие места находятся в нижних частях аппарата. В этом случае для сепараторов и теплообменных аппаратов зона основной коррозии находится вдоль образующей корпуса аппарата на уровне колебания раздела сред или в зонах смачивания.

Так, на рис. 7 приведена комбинированная форма коррозионного повреждения корпуса сепаратора в застойной области, образованной из-за выступающего патрубка.

К характерным участкам, склонным к возможному интенсивному низкотемпературному слоистому растрескиванию в водородсодержащих средах, относятся также области с наличием остаточных напряжений (например, зоны максимальных пластических деформаций при штамповке эллиптических днищ, места приварок вспомогательных элементов к корпусу и др.).

Влияние остаточных напряжений в сварных соединениях довольно отчетливо проявляется при диагностике щелочных емкостей, изготовленных из сталей марок 16ГС и 09Г2С. В этих аппаратах, отработавших нормативные сроки эксплуатации при температурах свыше 50 °С и концентрации щелочи не менее 10 %, периодически встречаются центральные продольные трещины в Т-образных сварных соединениях глубиной до 10 мм и более (в ряде случаев наблюдались трещины в околошовных зонах монтажных швов). При заказе данного типа оборудования рекомендуется предусматривать его высокий отпуск.

Что касается высокотемпературной сероводородной коррозии, то данный тип повреждений наблюдается при эксплуатационных температурах

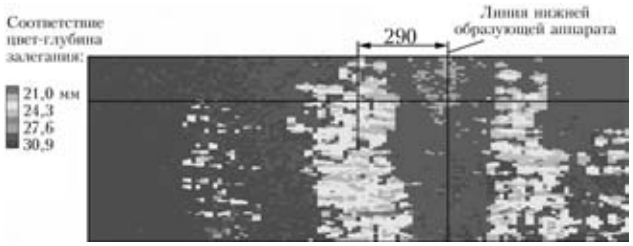


Рис. 7. Данные сканирования металла с коррозионным повреждением в застойной зоне сепаратора толщиной 32 мм из стали 16ГС (размер участка 500×1750 мм)

Рис. 8. Высокотемпературное растрескивание сварного шва теплообменника, изготовленном из стали 12ХМ, в зоне ремонтной подварки

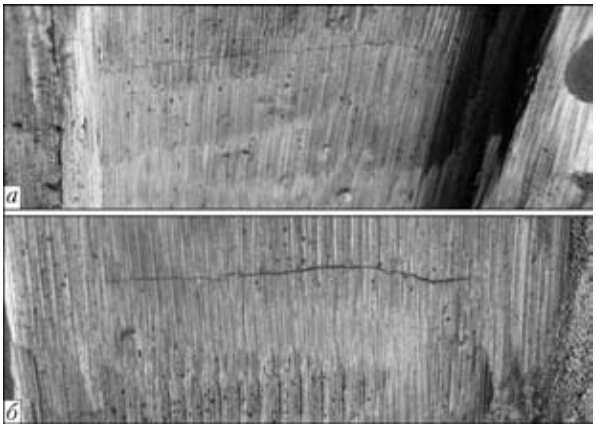


Рис. 9. Высокотемпературное растрескивание кольцевых швов в зоне фланцевого соединения (сталь 15Х5МУ) с обечайкой теплообменника (сталь 12ХМ) различной толщины: *а* — сварной шов приварки обечайки теплообменника к днищу толщиной 35 мм; *б* — сварной шов в зоне соединения обечайки толщиной 45 мм к фланцу

свыше 260 °С в трансферных трубопроводах, змеевиках печей и соединенных с ними теплообменных аппаратах в виде мелких широких язв, переходящих одна в другую. В чистом виде такой вид коррозионного разрушения довольно легко выявляем, однако высокая скорость развития требует особых подходов к его неразрушающему контролю. В комбинированном варианте данный вид коррозионного повреждения является наиболее опасным в связи с развитием растрескивания сварных соединений в местах скопления цепочек мелких язв и появлением сквозных трещин. Влияние остаточных напряжений в этих случаях особенно велико. Несмотря на то что практически все силовое оборудование изготовлено из хромомолибденовых сталей, предусматривающих обязательную термообработку после сварки, не всегда удается снять остаточные напряжения полностью. За данный период обследования специалистами ИЭС им. Е. О. Патона выявлено значительное количество растрескиваний сварных соединений, приводящих к аварийному отключению ответственного силового оборудования и установок в целом из-за появления сквозных трещин и пропуска продукта практически на всех нефтеперерабатывающих заводах Украины. Так, на рис. 8 приведен участок сварного шва с возникшей трещиной через год после проведения ремонтных работ в силовом теплообменнике.

Наиболее характерными элементами, подверженными такого рода повреждениям, являются участки сварных соединений в местах приварок патрубков, элементов трансферных трубопроводов и обечаек теплообменников к фланцам. В большинстве случаев появление дефектов в данных соединениях связано с неполным отпуском сварного соединения из-за различия материалов соединяемых элементов (рис. 9).

В теплообменном оборудовании длина таких дефектов обычно не превышает ширину сварного шва из-за наличия остаточных сжимающих напряжений в металле ЗТВ, что сдерживает их развитие в этом направлении. В направлении толщины такие ограничения отсутствуют, что и приводит к появлению сквозных «коротких» трещин.

Для трансферных трубопроводов подобное растрескивание обычно происходит по линии сплавления приварки фланца к трубе, в этом случае немаловажную роль играют изгибные напряжения, возникающие из-за теплового расширения трубопровода, что и приводит к частичному или полному разрыву.

Межкристаллитное растрескивание защитных облицовочных швов и основного плакирующего слоя оборудования, выполненного из биметалла, также довольно частое явление в нефтехимическом производстве. Вместе с тем если глубина межкристаллитного растрескивания плакирующего слоя биметалла обычно ограничивается толщиной плакировки в связи с наличием тонкой мартенситной прослойки на границе перехода к легированному металлу, то в облицовочных швах она в значительной мере зависит от правильного выбора сварочных материалов и технологии сварки. Зафиксировано несколько случаев, когда в результате таких нарушений наблюдались протяженные трещины глубиной более половины сечения [5]. В качестве примера на рис. 10 представлен результат измерения глубины подобной трещины с помощью метода TOFD. Следует отметить, что УЗ технология позволяет достаточно точно (с погрешностью 1…2 мм) измерить размеры трещин, информация о которых необходима для оценки работоспособности объекта контроля. В обычной практике диагностических обследований оценку

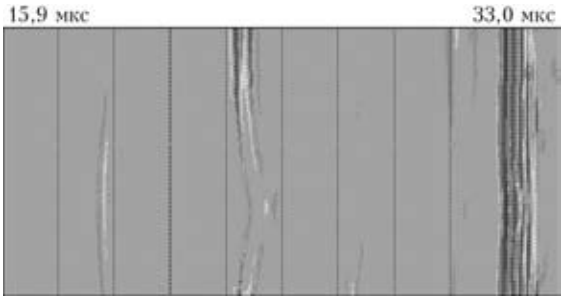


Рис. 10. Пример измерения в сварном соединении трещины методом TOFD, которая первоначально инициирована растрескиванием облицовочного плакирующего слоя

размеров трещин получают выборкой, что связано с рядом технологических трудностей. Следует отметить, что использование метода TOFD в объектах с плакированной поверхностью имеет ряд специфических особенностей, поэтому от специалистов, проводящих измерения, требуется определенная квалификация и опыт. Следует отметить повышенную чувствительность стали 10Х18Н10Т к такому виду повреждений в отличие от стали 08Х13.

Усталостные разрушения, за исключением резервуаров, довольно редкое явление в нефтехимии. Вместе с тем на ряде предприятий зафиксирован рост технологических трещин в сварных соединениях опорных частей и накладках с развитием их в основной корпус реакторов коксовых камер под действием термических циклических напряжений и колебаний.

Что касается хрупких разрушений, то практически все случаи имели место после проведения ремонтно-восстановительных работ при неполном удалении дефекта с последующей его переплавкой. В большинстве хрупкие разрушения были вызваны деформационным старением и наводороживанием металла перед фронтом не полностью удаленного дефекта. В последнее время подобные разрушения имели место при ремонте вакуумных колонн на ряде предприятий Украины и России.

Выводы

1. Проанализированы характерные зоны НХО, наиболее склонные к повреждениям в процессе эксплуатации. Предложены рекомендации к требованиям выбора конструкционных материалов для изготовления и ремонта НХО, позволяющие снизить риск эксплуатационного повреждения оборудования.

2. Показано преимущество ультразвуковых компьютеризированных систем за контролем роста эксплуатационных дефектов при диагностике НХО.

1. *Шрейдер А. В., Дегтярева Г. Л., Дьяков В. Г.* Защита от коррозии оборудования для переработки нефти. — М.: Недра, 1964. — С. 107–120.
2. *Слоистое*, слоисто-хрупкое и слоисто-вязкое разрушение сварных соединений / В. С. Гиренко, А. В. Бернацкий, М. Д. Рабкина, Н. П. Коржова // Пробл. прочности. — 1987. — № 3. — С. 70–76.
3. *Карпенко Г. В.* Нові уявлення про вплив водню на властивості сталі // Приклад. механіка. — 1960. — **6**, № 4. — С. 361–367.
4. *Карпенко Г. В., Крипякевич Р. И.* Влияние водорода на свойства стали. — М.: Изд-во лит-ры по черной и цветной металлургии, 1962. — 196 с.
5. *Некоторые* результаты технической диагностики сосудов и трубопроводов в нефтехимической промышленности / В. С. Гиренко, М. Д. Рабкина, В. П. Дядин и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1998. — № 3. — С. 17–24.

Results of diagnostics of oil-and-gas equipment conducted by specialists of the E.O.Paton Electric Welding Institute during the last 10 years were analysed. The most characteristic regions of the devices susceptible to service damages were determined, and methods for testing them by the ultrasonic inspection methods were suggested. It is noted that the most frequent error in repair of welded joints on heat-resistant steels is their incomplete tempering in the zones of contact of elements made from different structural materials. Recommendations are proposed to select materials for replacement of equipment that exhausted its specified service life.

Поступила в редакцию 09.03.2010

ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛА WELDING and CUTTING, 2010, № 1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ BLUETOOTH ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ. — С. 12–13.

Как известно, способ сварки трением с перемешиванием (Friction Stir Welding) по сравнению с другими способами обладает следующими преимуществами: более высокими механическими свойствами сварного соединения, минимальным короблением соединяемых металлов, возможностью соединения металлов, относящихся к категории ограниченно свариваемых, например, магниевых и медных сплавов, сталей и титановых сплавов.

Способ характеризуется нагревом до температуры порядка 80% от точки плавления соединяемых металлов и применяется при изготовлении разнообразных сварных конструкций космического, авиационного, железнодорожного, морского и автомобильного транспорта, при строительстве мостов, изготовлении сосудов под давлением и в других областях техники.

Однако широкое использование этого способа сварки ограничивается высокой стоимостью разработки и изготовления узкоспециализированного оборудования, а также достаточно высоким уровнем технологических затрат.

Для исключения этих недостатков фирма Sigmapi System Ltd. совместно с TWI (The Welding Institute, Cambridge/UK) и фирмой BAE System разработала новый процесс сварки трением с перемешиванием, названный LowStir процесс, использующий специальную сварочную головку, которая стандартным конусным хвостовиком может быть закреплена в отверстии шпинделя обычного вертикального фрезерного станка, что позволяет расширить использование этого процесса на любом малом предприятии. В комплект сварочной головки входит система программного обеспечения, позволяющая проводить настройку технологических режимов и регистрацию параметров для дальнейшего анализа качества сварки.

Поскольку на обычных фрезерных станках отсутствует система регистрации технологических параметров, необходимых для обеспечения высокого качества процесса сварки, для использования этих станков в процессах сварки трением с перемешиванием была разработана сварочная головка, внутри которой разместили систему датчиков регистрации технологических параметров, источник питания (блок аккумуляторов) и вращающуюся антенну, обеспечивающую по системе радиосвязи обмен информацией с расположенным вблизи зоны сварки ноутбуком с модулем Bluetooth.

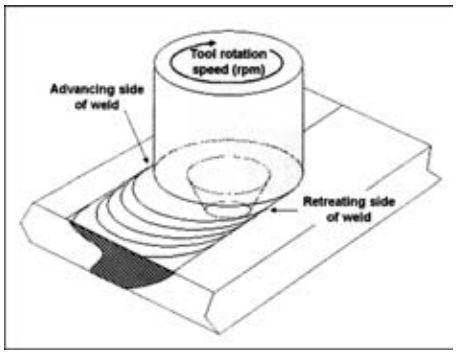
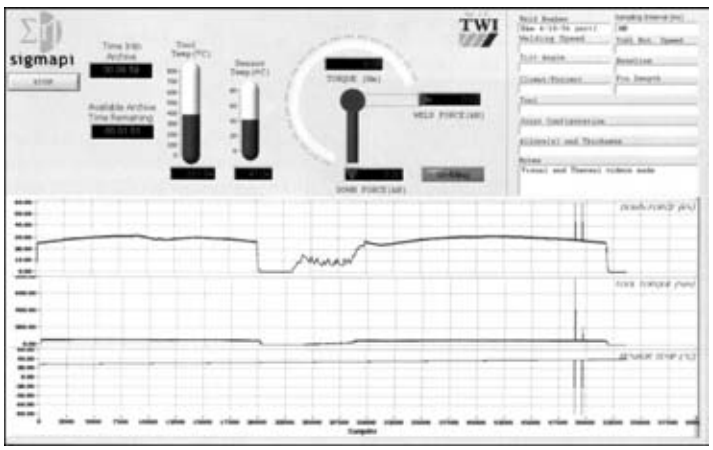


Схема процесса сварки трением с перемешиванием



Типичная картина бланка регистрации технологических параметров на дисплее компьютера

Разработанная новинка позволяет вместо узкоспециализированного оборудования, стоящего сотни тысяч фунтов стерлингов, использовать относительно недорогую сварочную головку, программное обеспечение и фрезерные станки, имеющиеся почти в каждой мастерской.

Система регистрации технологических параметров позволяет измерять при частоте считывания параметров в пределах 1…100 Гц силы приложения вертикального и горизонтального усилий (в пределах 50 и 25 кН соответственно), крутящий момент на сварочном инструменте (до 100 Н·м), температуру датчиков и вращающихся деталей, измеряемую двумя термопарами. Более подробную информацию по данной теме можно найти на сайте www.lowstir.com.

ДУГОВАЯ ПАЙКА ОЦИНКОВАННОЙ СТАЛИ. — С. 20.

Основные затруднения при сварке оцинкованной стали обусловлены тем, что цинк начинает испаряться намного раньше температуры плавления основного металла (температура его плавления равна 420 °С, а температура испарения — 900 °С). При этом наличие его паров над сварочной ванной способствует появлению пористости сварного шва, непроваров и возникновению трещин. Сварочная дуга в парах цинка теряет устойчивость, и самое главное пары цинка вредно влияют на здоровье сварщика.

В связи с этим при сварке оцинкованной стали желательно использовать процесс нагрева с меньшим значением тепловложения. Одним из альтернативных вариантов является использование сварочной проволоки на основе меди, например, широко используемых проволок из сплава медь–кремний ($CuSi_3$) или медь–алюминий (CuAl8). При этом достигаются следующие преимущества: отсутствие коррозии в зоне паяного шва, минимальное разбрызгивание металла, незначительное выгорание покрытия, малое значение тепловложения, низкие затраты на зачистку паяного шва, катодная защита основного металла.

В связи с высоким содержанием меди в сварочной проволоке температура плавления этих бронз снижается до 1000…1080 °С (в зависимости от состава сплава). Поскольку при использовании данных присадочных материалов основной металл не плавится, то такого рода соединения можно отнести к категории паяных, хотя в отличие от них при дуговом нагреве не требуется использование флюсов. Дуга при этом служит источником тепла, по величине сравнимого с теплом, выделяемым при газопламенном нагреве.

Для этого способа соединения возможно применение различных вариантов дугового нагрева: с плавящимся электродом, с вольфрамовым электродом в среде инертного газа, можно использовать плазменный нагрев, а также все чаще применяемый в настоящее время нагрев лазерным лучом.

МАГНИТНЫЙ ЗАЖИМ СВАРОЧНОГО КАБЕЛЯ. — С. 21.

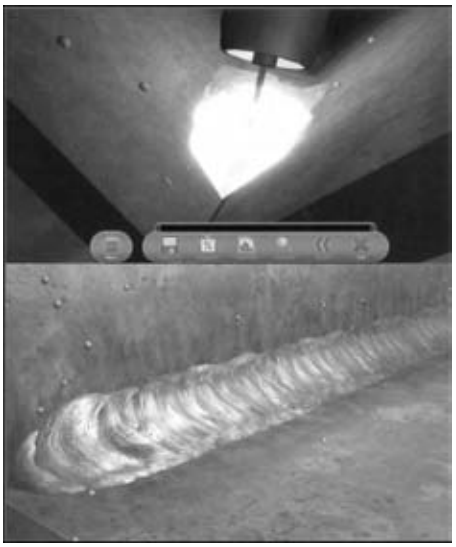
При сварке сталей (за исключением немагнитных хромоникелевых сплавов) вместо обычных заземляющих сварочный кабель зажимов можно использовать «заземление» в виде магнитной скобы. Однако одним из обязательных условий использования магнитного устройства является необходимость периодической очистки достаточно большой поверхности прилегания магнита к свариваемому изделию от застывших на нем разбрызгиваемых в процессе сварки капель металла, так как протекание электрического тока через точки с высоким электрическим сопротивлением (через отдельные металлические шарики) приводит к появлению на свариваемом изделии пятен подгорания.

«ARC+» — ВИРТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОБУЧЕНИЯ СВАРЩИКОВ. — С. 24–28.

Фирма 123 Certification Inc. (Монреаль) представила разработку тренажера активного обучения практическим технологическим навыкам проведения процесса дуговой сварки с применением технологии стопроцентного отображения виртуальной реальности на основе компьютерной программы обучения без использования реальной сварочной дуги и свариваемого образца.

В комплект имитатора сварочного процесса входит стандартный электрододержатель для дуговой сварки плавящимся электродом или сварочная горелка с вольфрамовым электродом в среде инертного газа; дисплей с трехмерным отображением сварочной дуги и изделия, смонтированный внутри сварочной маски, система электронных датчиков и система слежения с шестью степенями свободы для моментального (в системе он-лайн) фиксирования любых перемещений руки сварщика относительно визуального маркера на дисплее.

Стереоскопическое (трехмерное) изображение, имитирующее сварочный процесс, с высокой степенью разрешения ученику сварщика позволяет видеть влияние его манипулирования на процесс сварки во время тренировки на дисплее внутри сварочной маски, а затем просматривать запись выполнения процесса сварки на экране компьютера для выявления своих ошибок и корректировки полученных практических навыков, сверяя свои действия с комментариями инструктора.



Кадр изображения на экране дисплея виртуального процесса выполнения сварки углового шва плавящимся электродом в среде инертного газа

Процесс обучения сварщика приемам аргонодуговой сварки на тренажере «ARC+»

Имитация процесса сварки основана на физических законах и эмпирическом анализе большого количества экспериментальных данных, полученных в результате более чем двадцатилетней разработки программного продукта и технологических параметров, заложенных в базу данных компьютера. К технологическим параметрам, характеризующим ход сварочного процесса, относятся следующие: перемещение сварочной горелки, расстояние электрода до свариваемого изделия, скорость сварки, угол наклона и поворота горелки и др.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБЫЧНОГО ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА ДЛЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО АЛЮМИНИЯ. — С. 40–45.

Фирма «Boeing» лет пятнадцать назад вложила около 15 млн дол. США в разработку способа сварки трением с перемешиванием и в настоящее время как NASA, так и Lockheed Martin используют этот способ для сварки подвесных баков шаттлов, изготавливаемых из наилегчайших алюминий-литиевых сплавов.

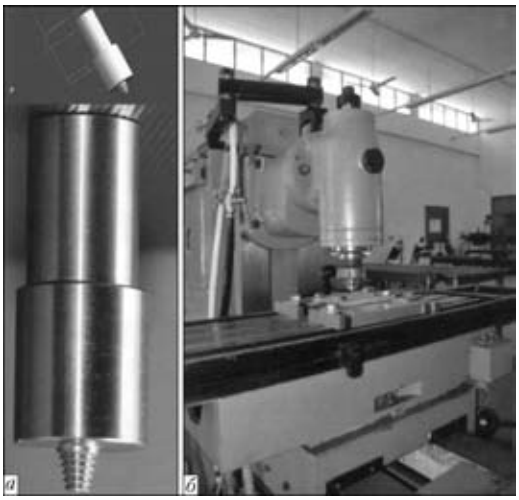
К преимуществам данного способа относится то, что соединение достигается за счет деформации металла, и процесс сварки происходит в твердой фазе, в результате чего из-за отсутствия дефектов сварного шва, связанных с плавлением и последующим затвердеванием металла, прочность сварного соединения достигает прочности основного металла.

Благодаря этим преимуществам можно с большой долей уверенности предположить, что по мере совершенствования данный способ сварки с успехом заменит плазменно-дуговую и электронно-лучевую сварку в некоторых специфических сферах применения конструкций из алюминия и титана.

В данной работе рассмотрена возможность реализации данного способа для сварки листов промышленного алюминия на обычных вертикально-фрезерных станках. При этом подходе к основным затруднениям, возникающим при реализации данного способа, относится узкий диапазон регулирования числа оборотов шпинделя фрезерных станков (1500…1070 об/мин), узкий диапазон регулирования скорости перемещения стола (20…50 мм/мин) и отсутствие регулирования усилия прижима инструмента к свариваемым деталям.

Проведенные прочностные испытания сварных образцов показали возможность достижения требуемых значений угла загиба сварного шва без образования трещин и достижения механической прочности сварного соединения (при испытании на растяжение) на уровне прочности основного металла.

В ходе выполнения исследований установлено, что требуемая прочность соединений при этом способе сварки достигается за счет выбора следующих технологических факторов: способа фиксации свариваемых образцов алюминия (толщиной 6,3 и 12,6 мм с размерами образцов в плане 100×50 мм), скорости перемещения инструмента вдоль линии контакта свариваемых листов (скорости сварки около 31,5 мм/мин), числа оборотов инструмента и высоты рабочего выступа относительно заплечиков инструмента.



Сварочный инструмент из быстрорежущей стали (*а*) и внешний вид фрезерного станка с ним (*б*)

При увеличении скорости вращения инструмента происходит повышение температуры металла из-за возрастания трения, более интенсивная деформация и более интенсивное перемешивание металла на границе раздела. Однако при увеличении скорости сварки и снижении числа оборотов инструмента прочностные параметры сварного соединения ухудшаются. Предполагается, что причиной снижения прочности в этом случае является недостаточный нагрев свариваемых листов, необходимый для требуемого перемешивания металла.

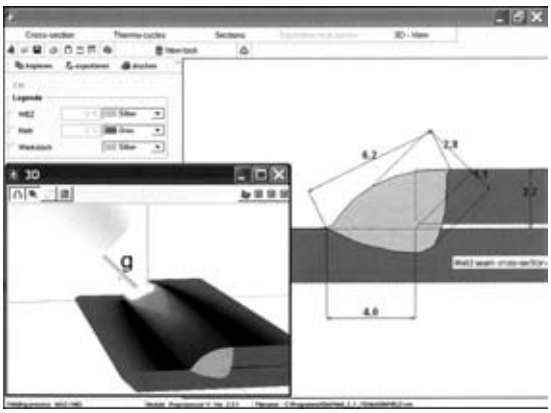
Основной вывод проведенных исследований заключается в том, что реализация процесса сварки промышленных марок алюминия возможна при использовании стандартных фрезерных станков, но при некотором снижении скорости сварки.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДУГОВОЙ СВАРКИ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ДУГОЙ. — С. 46–51.

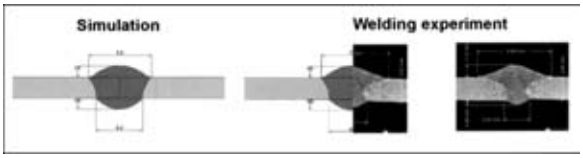
Использование моделирования процесса автоматической сварки предоставляет возможность использования базы данных, содержащей информацию о качественных и количественных взаимосвязях между заданными параметрами, параметрами реального процесса и критериями качества сварного соединения.

В данной работе представлена концепция разработки и использования компьютерной модели для оптимизации и проведения исследований обычного процесса дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа, включая детальное описание метода создания необходимой базы данных, разработку программного продукта, моделирующего реальный процесс, а также конечную оценку используемой модели процесса сварки.

Предполагается, что в ближайшем будущем результаты компьютерного моделирования сварочного процесса могут быть использованы для наладки и мониторинга (оперативно-



Результаты моделирования конкретного процесса сварки



Сопоставление результатов математического моделирования и параметров сварного шва, полученных в результате экспериментальной проверки

го контроля) процесса автоматической дуговой сварки пульсирующей дугой. Применение моделирования открывает возможность выявления и установления количественных зависимостей между заданными параметрами процесса, текущими параметрами и качественными показателями сварного соединения.

При этом появляется возможность существенного сокращения времени, требуемого для переналадки параметров процесса сварки в случае изменения вида свариваемой продукции, более того, возможен переход к стратегии автоматической оптимизации сварочных параметров, нацеленной на повышение качества конечного продукта, несмотря на изменения граничных условий процесса сварки нового изделия.

На первом этапе реализации математического моделирования процесса сварки необходимо использовать синтез зависимостей между параметрами модели и экспериментальными данными конкретного процесса сварки. В случае изменения постановки задачи результаты моделирования, выполненные в соответствии с разработанной системой SimWeld, могут обеспечить моментальную выдачу некоторых вероятных параметров процесса, наиболее близких к реальным.

Проведение сравнительного анализа результатов моделирования и экспериментальных данных показывает, что для достижения приемлемых показателей моделирования необходимо закладывать в базу данных результаты не менее двух тысяч технологических зависимостей между устанавливаемыми параметрами процесса сварки и геометрией сварного шва.

Разработка компьютерной программы, моделирующей процесс сварки на основании экспериментальных данных, занимает довольно большой отрезок времени, поэтому на данный момент не является законченной.

КОНТАКТНАЯ ТОЧЕЧНАЯ СВАРКА ВЫСОКОПРОЧНЫХ И СВЕРХВЫСОКОПРОЧНЫХ ФЕРРИТНЫХ ОЦИНКОВАННЫХ СТАЛЕЙ С ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫМИ АУСТЕНИТНЫМИ ХРОМОНИКЕЛЕВЫМИ СТАЛЯМИ. — С. 52–57.

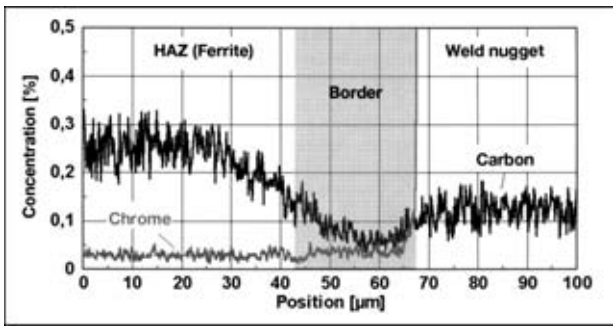
За последнее время намечается тенденции использования более высокопрочных металлов как для облегчения сварных конструкций, так и для повышения их жесткости и надежности в эксплуатации, особенно при изготовлении крупногабаритных узлов большегрузных автомобильных и железнодорожных транспортных средств. Однако в связи со снижением пластичности большинства сталей при повышении их прочности разработки новых сортов сталей проводятся с целью достижения наиболее выгодного соотношения показателей прочности и пластичности.

Практическая реализация данной тенденции приводит к тому, что при изготовлении современных сварных конструкций возникает необходимость в сварке разнородных сталей, причем процесс контактной точечной сварки является одним из наиболее распространенных при изготовлении кузовных узлов, состоящих из различных марок ферритных и аустенитных сталей.

В данной статье представлены некоторые результаты исследований точечной контактной сварки высокопрочных и сверхвысокопрочных ферритных оцинкованных сталей DX54D+Z100 (марки 1.0306), микролегированной мелкозернистой стали HX340LAD+Z100 (марки 1.0933) и TRIP стали HCT690TD (марки 1.0947), обозначаемых в данной статье как HI, HII и HIII, с высоколегированной аустенитной коррозионностойкой хромоникелевой сталью типа X8CrMnNi19-6-3, (марки 1.4376, толщиной 1,5 мм), специально разработанной для изготовления узлов автомобильных и железнодорожных корпусов.

Для сварки использовали обычную стационарную установку для точечной сварки, обеспечивающую сварку на постоянном токе с частотой пульсации сварочного тока около 1000 Гц. При сварке листов металла с различной обработкой поверхности (осветленной после проката, с нанесением покрытия гальваническим путем и методом погружения в расплав) учитывали полярность тока сварки при заданном чередовании листов металла из различных сплавов.

Перед проведением исследований был определен диапазон сварочных режимов (ток сварки в пределах 5…7 кА, время сварки в пределах 300…600 мс, при рабочей поверхности электрода около 8 мм и усилии сварки 4 кН), обеспечивающий воспроизводимое качество сварных соединений самых различных сочетаний марок сталей.



Распределение углерода и хрома (пропорционально в мас. %) в области раздела между зоной термического влияния в металле ферритной стали и сварочным ядром стали 1.4376 и стали 1.0947 + Z

Проведенные металлографические исследования сварных образцов с целью выявления схемы разрушения металла показывают, что в случае сварки сталей различных марок встречается вариант разрушения сварного соединения с местным вырывом (по границе сварного ядра), который обычно не наблюдается при сварке сталей одной марки, и это объясняется, вероятнее всего, резким различием прочности металла на границе ядра сварной точки с зоной термического влияния.

По мнению авторов, декарбюризация металла в зоне раздела, которая является причиной снижения прочности сварного соединения, может быть в некоторой степени устранена в случае подавления процесса диффузии углерода из зоны раздела между сварным ядром и зоной термического влияния, что позволит повлиять на характер разрушения сварного соединения.

Существующие технологические приемы повышения прочности сварного соединения в основном ограничены использованием дополнительного импульса подогрева, благодаря которому снижается твердость металла в зоне термического влияния, но, к сожалению, этот подход не влияет на твердость металла сварного ядра и на характер разрушения сварной точки.

УДК 621.791.009(100)

10-я ЮБИЛЕЙНАЯ ЕВРОПЕЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-ВЫСТАВКА ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ

7–10 июня 2010 г. в Москве прошла 10-я Юбилейная Европейская конференция-выставка по неразрушающему контролю (10 ЕКНК). Она собрала рекордное за все время проведения подобных форумов количество стран-участниц — в Москву приехали представители 65 государств. Общее количество зарегистрированных участников составило 1021 человек, участников конференции и выставки — 1230 человек. Москва получила право на ее проведение в результате конкурса на сессии EFNDT в 2005 г. в Вене. Президентом 10 ЕКНК был утвержден В. В. Клюев, академик РАН, Президент Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике. Научный комитет был сформирован из представителей 43-х стран, в него вошли 153 известных ученых и руководителей национальных обществ НК.

В соответствии с программой 10-й ЕКНК состоялось пленарное заседание, на котором были представлены шесть докладов: *В. В. Клюева* (Россия) «Нанотехнологии и нанодиагностика», проф. V. Krstelj (Хорватия) «Позиционирование EFNDT в Европейской инфраструктуре качества», чл.-кора РАН *Н. А. Макхутова* (Россия) «Диагностика состояния объектов и мониторинг рисков крупномасштабных проектов», Президента ICNDT д-ра M. Farley (Великобритания) «Деятельность ICNDT в сфере международной сертификации персонала НК», проф. U. Ewert (Германия) «Перспективы мобильной компьютерной томографии», проф. *В. П. Вавилова* (Россия) «Термографический неразрушающий контроль: краткая история, современность и тенденции».

Затем заседания проходили в 25 секциях, на которых было представлено 703 доклада, посвященных различным методам, направлениям и проблемам в области неразрушающего и контроля и технической диагностики (НК и ТД).

В рамках конференции состоялись:

• Генеральная ассамблея Европейской федерации по НК (EFNDT General assembly), на которой были выбраны новые члены Совета директоров, представлен отчет Совета директоров EFNDT, утвержден обновленный устав EFNDT;

• Генеральная ассамблея международного комитета по НК (ICNDT General Assembly) под председательством Президента ICNDT д-ра М. Фарлея, на которой были рассмотрены следующие вопросы: отчет о работе ICNDT за 2009 г., согласование оперативных процедур ICNDT, обсуждение членских взносов, бюджет на 2010–2011 гг., вручение сертификатов новым членам, промежуточный отчет о подготовке к 18-й Всемирной конференции по НК (18th WCNDT), отчеты региональных групп;

• Заседание Совета директоров Европейской федерации по НК (EFNDT BoD meeting), посвященное 10-й ЕКНК, обсуждению стратегического плана, финансового отчета, бюджета 2010–2011 гг., доработке оперативных процедур EFNDT, вступлению новых членов, а также планированию следующего собрания, которое было предложено провести в Киеве;

• два заседания Международной академии по НК (Academia NDT International) под председательством Президента академии д-ра Дж. Нардони, в которых приняли участие 25 действительных членов академии из 17 стран мира. В академию избрано 7 новых действительных членов и 2 почетных. Общее количество членов академии НК составило 44 академика из 21 страны. Было принято решение в ближайшие 2-3 года довести численность академии до 100 членов, при этом важно расширять географию представительства;

• заседание исполнительного комитета Международного комитета по НК (ICNDT Executive committee meeting), на котором были рассмотрены документы для обсуждения на Генеральной ассамблее ICNDT, ключевые вопросы в работе WG1 и WG3, а также вступление новых членов из Центрально-азиатского региона;

• форум по квалификации, сертификации и аккредитации (Forum on qualification, certification and accreditation). Участники форума, представлявшие более 20 стран, обсудили последние изменения в стандартах ИСО 9712 и EN 473 и внесли предложение объединить требования этих стандартов и создать единый стандарт по сертификации персонала НК;

• встреча EFNDT и Американского общества по НК (EFNDT-ASNT meeting), посвященная особенностям функционирования Американского комитета по НК, кроме того, были рассмотрены вопросы обучения и сертификации персонала НК в США, в частности новой инновационной программы, направленной на вовлечение и поддержку молодых специалистов;

• заседания ИСО ТК 135 «Неразрушающий контроль», в которых участвовало более 60 участников из 20 стран мира.

В рамках конференции прошла выставка средств НК, в которой на 151 стенде приняли участие более 190 компаний из 16 стран и 32 национальных общества по НК.

На выставке были представлены более тысячи приборов и систем НК с применением акустических, ультразвуковых, радиационных, вибрационных, электромагнитных, магнитных, тепловых и других методов контроля, информационные стенды ICNDT, EFNDT, национальных обществ по НК стран Европы, Азии, Америки и Африки.

В рамках выставки прошел конкурс инноваций под председательством д-ра М. Дугласа (Канада).

Дипломы 10-й ЕКНК присуждены шести инновационным разработкам:

— малогабаритному бетатрону на энергию 2,5 МэВ для работы в полевых условиях (ГОУ ВПО Томский политехнический университет, НИИ интроскопии);

— системе НК внутреннего состояния труб теплообменников, парогенераторов и других промышленных объектов, имеющих в своем составе трубы небольшого диаметра ACOUSTIC EYE (ООО МНПО «Спектр»);

— автоматизированному стенду вихретокового контроля колец подшипников «ВИСТКОН» (UNITEST GROUP);

— магнитострикционным генераторам волноводных волн повышенной мощности (Southwest Research Institute);

— автоматизированной установке контроля кольцевых сварных швов в системе труба – трубная доска «ШИЛО» (Лаборатория ТСНК);

— системе для внешнего и внутреннего АУЗК сварных соединений и основного металла трубопроводов и тройников сварных с накладками АВГУР-Т (ООО «НПЦ «ЭХО+»).

В специально оборудованном зале ведущими производителями мира было представлено 16 презентаций новейшего оборудования. Вызвала интерес презентация Гарри Пасси (компания «Sonotron NDT») «Ультразвуковой контроль с применением фазированных решеток. Визуализация результатов в соответствии с реальными геометрическими размерами и формой объекта контроля», а также УЗ дефектоскопа на фазированных решетках «ISONIC 2009».

В рамках выставки прошел конкурс среди компаний-экспонентов на «Лучший стенд ЕКНК 2010». По результатам анонимного опроса более 300 специалистов комиссия во главе с главным редактором журнала «Insight» Д. Гилбертом определила победителей. Ими стали стенды компаний: «OLYMPUS», ООО МНПО «Спектр», «General Electric», South African Institute for NDT (в номинации «Лучший стенд Национального общества по НК»).

На торжественном заседании, посвященном закрытию 10-й юбилейной конференции, были подведены ее итоги и представлены страны-организаторы следующих международных конференций — 18-й Международной конференции в ЮАР в 2012 и 11-й Европейской конференции в Чехии в 2014 г.

С. В. Клюев, канд. техн. наук

УДК 621.791.009(100)

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО СВАРОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ

7–11 июня 2010 г. в Артемовске, Донецкая обл., состоялась V Международная конференция «Сварочные материалы. Технологии. Производство. Качество. Конкурентоспособность», посвященная 20-летию Ассоциации «Электрод». Организаторы конференции — Ассоциация «Электрод» предприятий стран СНГ и ЗАО «Артеммашзавод «ВИСТЕК». В работе конференции приняли участие 44 специалиста от 29 предприятий и организаций Украины, России и Казахстана. Работу конференции открыл Президент ассоциации генеральный директор ЗАО «СВАМА» И. М. Лившиц. С вступительным словом к участникам конференции обратился генеральный директор ЗАО «Артеммашзавод «ВИСТЕК» Н. И. Ятченко. Ведущий научный сотрудник ИЭС им. Е. О. Патона д-р техн. наук В. Н. Шлепков зачитал приветствие академика Б. Е. Патона участникам конференции.

В программу конференции включено 25 докладов и сообщений, большинство из которых вошли в сборник из 195 страниц, макет которого подготовила Международная ассоциация «Сварка». Одна часть докладов была посвящена покрытым электродам и технологии их изготовления, в другой — изложены проблемы разработки, производства и применения проволок сплошного сечения, порошковой проволоки и флюсов для механизированной дуговой сварки. В течение двух пленарных заседаний выступившие перед участниками конференции докладчики изложили, прокомментировали содержание докладов и ответили на вопросы слушателей.

В докладе «Методические приемы совершенствования и разработки электродов для ручной дуговой сварки и наплавки» канд. техн. наук И. Н. Ворновицкий (ОАО НПО «ЦНИИТМАШ») изложил суть новых критериев качества и алгоритма процедур

разработки электродов, с помощью которых решаются задачи обеспечения высокого качества их изготовления и стабильности сварочно-технологических характеристик. На примере операции приготовления обмазочной массы показаны преимущества интенсивных смесителей перед катковыми в улучшении ключевых показателей электродов, таких как производительность (повышается), потери металла на угар и разбрызгивание (уменьшаются), маневренность электрода (улучшается). О новой технологии повышения модуля жидких стекол, предназначенных для изготовления сварочных материалов, доложил О. В. Дзюба (ООО «НПЦ Сварочные материалы», г. Краснодар). Для этого предложено использовать приемы электродиализа, которые применяются для опреснения морской воды. В докладе проанализированы некоторые свойства полученных жидкостекольных материалов.

Результаты отработки технологии изготовления флюса марки 48 КРФ-16, предназначенного для сварки конструкций атомных энергетических установок, которая позволяет добиться существенного понижения содержания серы и фосфора в наплавленном металле, изложил в своем выступлении И. М. Лившиц (ООО «Ижорские сварочные материалы»).

Инженер И. Н. Зверева (ОАО «ММК-МЕТИЗ», г. Магнитогорск) рассказала о достоинствах смазки марки «PANLUBE S622T» фирмы «PAN CHEMICALS» (Италия), которые выявлены при изготовлении электродных стержней из проволоки, полученной в поточной линии волочения катанки после механического удаления окалины с ее поверхности. Отмечается высокая технологичность процесса, включая стабильность волочения, высокую эффективность захвата смазки, отсутствие пыления и «горения» смазочного материала. Смазка легко удаляется с поверхности проволоки в процессе промывки, что подтверждается результатами оценки количества смазки на поверхности стержней после операции рубки. Два доклада И. М. Лившица посвящены текущим проблемам производства и применения электродов общего назначения. В первом из них анализируются попытки заменить электроды УОНИИ-13/55, которым в прошлом году исполнилось 70 лет, новыми разработками с целью улучшения их технологичности в процессе производства, повышения сварочно-технологических показателей, а также физико-механических характеристик выполненных ними швов. Речь идет о результатах работ прежних лет (ЦУ-6, ЦУ-7 ЦНИИТМАША, АНО-Д ИЭС им. Е. О. Патона, УОНИИ-13/45АА и УОНИИ-13/55АА ЦНИИ КМ «ПРОМЕТЕЙ»), а также о перспективных разработках, ведущихся нынче в рамках государственной программы «Магистраль». Во втором докладе справедливо осуждаются спекуляции, ведущиеся некоторыми изготовителями электродов вокруг надуманной проблемы о влиянии цвета покрытия на сварочно-технологические и эксплуатационные свойства электродов.

В обширном докладе канд. техн. наук В. Г. Лозового (ООО «НПЦ Сварочные материалы») изложен опыт большого коллектива авторов, накопленный при испытаниях и применении российских импортнозаменяющих электродов ЛБ-52 TRU при сварке доменной печи Новолипецкого металлургического комбината. Доклад насыщен фактическими данными и будет весьма полезен тем, кто занимается разработкой и применением низководородных электродов, предназначенных для сварки и ремонта объектов металлургического комплекса.

Анализу физико-химической природы и результатам исследований прочности электродных покрытий посвящен доклад канд. техн. наук А. Е. Марченко (ИЭС им. Е. О. Патона). Показано, что прочность электродных покрытий, изготовленных с использованием связующего в виде жидкого стекла, обеспечивается гидратными формами щелочных силикатов, возникающих в ходе обезвоживания жидкого стекла при нагреве электродов не выше 200°С. Структура силикатной связки существенно деградирует в ходе высокотемпературной термообработки (400°С), которой подвергаются низководородные электроды. В результате в ней полностью исчезают гидратные формы силикатов, обладающие вяжущими (адгезионными) свойствами. Наряду с этим высокотемпературный нагрев и охлаждение электродов провоцируют возникновение внутренних напряжений в покрытии, вызванных недопущенной усадкой силикатной матрицы, а также разницей коэффициентов термического расширения матрицы и наполнителя в покрытии, с одной стороны, и покрытия и стержня, с другой стороны.

О новой редакции международных стандартов ISO 9000 и ISO 9001 и их национальных версиях в Украине, а также о перспективе появления в ближайшее время нового стандарта ISO 9004 говорилось в докладе канд. техн. наук А. Е. Марченко, который он подготовил совместно с инж. Н. А. Проценко (ИЭС им. Е. О. Патона).

В обзоре, подготовленном канд. техн. наук А. Е. Марченко и Н. В. Скориной (ИЭС им. Е. О. Патона), а также инж. Костюченко В. П. (ОАО «Межгосметиз-Мценск), приведена подробная техническая характеристика и преимущества низководородных электродов с двухслойным покрытием, которые имеются на международном рынке сварочных материалов и показаны перспективы их разработки и производства в странах СНГ.

С докладом «Обоснование и экспериментальное исследование системы раскисления и микролегирования металла, наплавленного низководородными электродами ответственного назначения», подготовленного коллективом авторов во главе с акад. НАНУ И. К. Походней, выступил А. Е. Марченко. Поскольку при сварке покрытыми электродами зона

сварки не столь надежно защищена от окружающего воздуха, как при использовании других сварочных материалов, титан в системе раскисления Mn–Si–Ti действует не только как раскислитель, но и как нитридообразующий элемент. Такое «раздвоение» не позволяет использовать его как микролегирующий элемент для эффективного регулирования ударной вязкости металла шва. Для повышения защитной способности покрытия следует увеличить соотношение $CaCO_3$:CaF_2 в покрытии и его толщину. Комбинируя в этих условиях титан в качестве микролегирующего элемента с бором, можно повысить ударную вязкость металла шва не только при комнатной, но и при отрицательной температуре вплоть до –60 °С.

Вопросам производства сварочных материалов на ГП «ОЗСМ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины» в условиях кризиса был посвящен доклад инженеров П. А. Косенко и Н. А. Соловей. В нем подчеркивается, что в сложившихся экономических условиях на рынке сварочных материалов качество выпускаемой продукции и предоставляемых услуг имеет первостепенное значение для успешного функционирования предприятия. Действующая система управления качеством по стандарту ISO 9001:2000 была сертифицирована в 2007 г. Сейчас ведется подготовка ее к ресертификации в соответствии с положениями новой версии стандарта, вступившей в силу в 2009 г. В настоящее время ОЗСМ полностью подготовил свои испытательные лаборатории к аккредитации по ISO/IEC 17025:2006. В своей рыночной деятельности он переориентировался на работу с небольшими организациями и продажу электродов розницей. В мелкую упаковку стали паковать наиболее востребованные марки электродов. Была спроектирована, изготовлена и пущена в эксплуатацию упаковочная линия производительностью около 470 коробок массой 1кг электродов в час. Изготовленная из прочного микрогофрокартона и выдержанная в фирменном стиле и традиционных для ОЗСМ бело-голубых тонах новая упаковка обеспечит надлежащую сохранность электродов и удовлетворит запросы потребителей.

Вопросу применения порошковых проволок для сварки конструкций агрегатов металлургического и горнорудного производства был посвящен доклад специалистов ИЭС им. Е. О. Патона, с которым выступил д-р техн. наук В. Н. Шлепков. В докладе проанализированы дефекты конструкций, выявленных в агрегатах отмеченных производств после их длительной эксплуатации. Изложены характеристики разработанных порошковых проволок и технологии их применения для механизированной и автоматической сварки этих конструкций. Результаты испытаний предложенной технологии показали повышение производительности сварочных работ в 1,5…2 раза. Экономятся сварочные материалы, понижается уровень остаточных напряжений в сварных соединениях и повышается их эксплуатационная надежность. Определены общие принципы использования предложенной технологии на разнообразных объектах металлургического комплекса.

В. Н. Шлепаков также выступил с докладом «Основы построения композиций порошковых проволок с высокой производительностью сварки». Он отметил, что решение проблем механизированной сварки сталей повышенной и высокой прочности определяется технологическими и металлургическими требованиями, которые предъявляются к сварным соединениям, а высокую производительность процесса плавления проволочного электрода следует сочетать с низким удельным тепловложением в околошовную зону. Это достигается использованием трубчатых газозащитных порошковых проволок с металлическим типом сердечника, в составе которых доля наполнителя не превышает 1,5%. Соотношение долей металлической и газошлакообразующей частей сердечника устанавливается в зависимости от требуемого уровня легирования наплавленного металла. Для защиты расплавленного металла от воздуха должны применяться газовые смеси на основе аргона. Этим обеспечивается стабильное горение дуги, снижение числа коротких замыканий, а характер переноса электродного металла с капельного переходит на струйный.

В заключительной части своего выступления докладчик сделал обзор аспектов производства и применения бесшовной порошковой проволоки, в котором обобщил многолетний мировой и отечественный опыт в этом вопросе. В виде отдельного доклада он тоже включен в сборник. Суть проведенной Институтом электросварки им Е. О. Патона модернизации трех марок электродов — АНО-21, АНО-4 (рутиловое покрытие, разработка ИЭС) и УОНИ-13/55 (низководородное покрытие, разработка ЦНИИМ, РФ) — изложила в своем докладе инж. О. И. Фольборт (ИЭС им. Е. О. Патона). Модернизация электродов АНО-21 проведена с целью расширения их сортамента и в расчете на максимально возможное использование сырья украинских производителей. Модернизация электродов АНО-4 и УОНИ-13/55 вызвана необходимостью выполнения требований, которые предъявляет НАКС РФ к продукции, поставляемой как в Россию, так и в Федерацию зарубежными производителями. О производстве силикатных глыб, предназначенных для изготовления сварочных электродов, их характеристиках и условиях поставок доложил в своем выступлении С. Ю. Рябов — главный инженер ООО «Силикат» (г. С.-Петербург). Ряд запланированных выступлений не состоялся в связи с тем, что докладчики по разным причинам не прибыли на конференцию и не участвовали в ее работе. С их докладами можно ознакомиться, поскольку все они включены в изданный сборник.

А. Е. Марченко, канд. техн. наук,
П. В. Игнатченко, инж.

УДК 621.791.009(100)

X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-ВЫСТАВКА «ПРОБЛЕМЫ КОРРОЗИИ И ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. КОРРОЗИЯ-2010»

8–11 июня 2010 г. во Львове состоялась X Международная конференция-выставка «Проблемы коррозии и противокоррозионной защиты конструкционных материалов. Коррозия-2010», посвященная 100-летию со дня рождения академика Г. В. Карпенко — одного из основателей физико-химической механики материалов, научного направления, возникшего в первой половине XX в. на стыке механики материалов, физики твердого тела и химии поверхностных явлений.

Проблема коррозии и противокоррозионной защиты металлоконструкций и их сварных соединений является актуальной для многих отраслей промышленности Украины, в том числе строительства, транспорта, машиностроения, нефтегазодобывающей, горнорудной, энергетической, металлургической, химической и пищевой отраслей.

Ежегодные потери промышленности развитых стран вследствие коррозии оцениваются в 4...5 % валового национального продукта. При этом больше 15 % этой суммы можно было бы сэкономить, если использовать известные прогрессивные противокоррозионные методы защиты. Поэтому защита и снижение потерь металла от коррозии, особенно в связи с увеличением потребления в промышленности и сельском хозяйстве разных типов металлопродукции, приобретают особенно важное значение.

Международные конференции-выставки по проблемам коррозии и противокоррозионной защиты конструкционных материалов во Львове, ставшие традиционными, призваны ознакомить широкий круг специалистов с новыми теоретическими и практическими разработками в этой области науки, современными методами повышения коррозионной стойкости металлоконструкций различного назначения, а также устанавливать более тесные научно-производственные и коммерческие контакты между украинскими и зарубежными специалистами. Организатором конференций-выставок является Украинская ассоциация коррозионистов во главе с ее президентом, чл.-кор. НАН Украины, д-ром техн. наук В. И. Похмурским. В настоящее время ассоциация объединяет порядка 50-ти научно-исследовательских учреждений, организаций и предприятий и более 100 индивидуальных членов.

В работе юбилейной конференции-выставки приняли участие представители научных учреждений, коммерческих фирм и промышленных предприятий Германии, Австралии, России, Украины, Польши, Мексики, Казахстана, Литвы, Беларуси и других стран, что свидетельствует об ее актуальности и возрастающем авторитете.

Конференцию открыл чл.-кор. НАН Украины, д-р техн. наук В. И. Похмурский, который выступил с пленарным докладом «Роль академика Г. В. Карпенко в развитии исследований коррозионно-механического разрушения металлов».

Главные вопросы, затронутые на конференции — это фундаментальные аспекты коррозии и коррозионно-механического разрушения; проблемы водо-

Открытие юбилейной конференции-выставки. *Слева*: чл.-кор. НАН Украины, д-р техн. наук В. И. Похмурский, *справа*: директор ФМИ им. Г. В. Карпенко НАНУ В. В. Панасюк

Лаборатория коррозии отдела № 28 представляет ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ на конференции «КОРРОЗИЯ-2010»

родной и газовой коррозии; новые тенденции в разработке коррозионностойких материалов и создание с их помощью газотермических, гальванических и других покрытий; современные направления развития ингибиторной, биоцидной и электрохимической защиты; методы исследований и коррозионный контроль; коррозия и экологические проблемы; проблемы подготовки специалистов-коррозионистов; пути внедрения новейших методов противокоррозионной защиты оборудования нефтегазовой промышленности, энергетического и химического оборудования.

Особый интерес у представителей промышленных предприятий вызвали работы прикладного характера, освещавшие вопросы мониторинга металлических конструкций, в том числе газо-, нефте- и водопроводов и их сварных соединений, электрохимической защиты и защитных покрытий (докладчики Р. Джала, В. Черватюк, М. Хома, ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины; С. Поляков, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ; Ю. Герасименко, Г. Васильев, НТУУ «Киевский политехнический институт»; И. Реформатская, ФГУП «Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л. Я. Карпова» и др.).

В выставке приняли участие производственные предприятия, непосредственно работающие в области защиты металлофонда от коррозии: НТК ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины, ГП Инженерный центр «Техно-ресурс» НАН Украины, ГП Инженерный центр «Львовантикор» ФМИ НАН Украины, DE NORA DEUTSCHLAND GmbH (Германия), ООО ТВП «ЗИНГА МЕТАЛЛ и К», ООО «Тек Инжиниринг», ОАО «Запорожский электроаппаратный завод» и др. ИЭС им. Е. О. Патона представляла делегация молодых ученых-коррозионистов под руководством д-ра техн. наук С. Г. Полякова. Темой выступлений и стендовых докладов патоновцев были актуальные прикладные разработки в области мониторинга техногенных сред (грунтов, грунтовых вод, охлаждающих жидкостей) с применением электрохимических методов исследований, таких как метод поляризационного сопротивления, метод поляризационных кривых, электрохимических шумов, которые уже применяются на предприятиях нефтегазового комплекса, ОАО «Укргидроэнерго» и коммунального хозяйства. Важное место в экспозиции выставки занимала разработка лаборатории коррозии ИЭС им. Е. О. Патона — система коррозионного мониторинга трубопроводов (СКМТ) ТУ У 33.2-30019801-001:2006, предназначенная для определения: уровня защищенности трубопровода по протяжности и во времени по ДСТУ 4219; скорости коррозии металла трубопровода на внешней поверхности; места повреждения защитного покрытия; скорости остаточной коррозии металла трубопровода в дефекте защитного покрытия; тока диффузии водорода через стенку металла трубопровода; коррозионной активности грунта в местах залегания трубопровода; коррозионной активности транспортированного продукта; электрохимических потенциалов: поляризационного, коррозионного, суммарного с омической составляющей, поперечного и продольного градиента потенциалов по всей длине трубопровода, а также их изменения во времени; наличия блуждающих токов.

СКМТ аттестована Укрметртестстандартом Украины как средство измерительной техники, что является редкостью для такого класса приборов, измеряющих мгновенную скорость коррозии металла.

На заключительном заседании конференции обсуждались вопросы терминологии в области защиты от коррозии, разработки нормативных документов в этой сфере, которые были бы гармонизированы с международными стандартами.

С. Г. Поляков, д-р техн. наук,
С. А. Осадчук, инж.

НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ!

Л. М. ЛОБАНОВУ — 70

В сентябре исполнилось 70 лет доктору технических наук, профессору, академику НАН Украины, заслуженному деятелю науки и техники Украины, лауреату Премии Совета Министров СССР, Государственной премии Украины, Премии им. Е. О. Патона НАН Украины, известному ученому в области материаловедения и прочности материалов и конструкций Леониду Михайловичу Лобанову.

Л. М. Лобанов окончил факультет промышленного и гражданского строительства Киевского инженерно-строительного института и механико-математический факультет Киевского государственного университета. С 1963 г. работает в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, с 1985 г. — заместитель директора по научной работе и заведующий отделом оптимизации сварных конструкций новой техники института.

Научная деятельность Л. М. Лобанова связана с исследованиями поведения материалов при сварке, разработкой экспериментальных методов исследования и регулирования сварочных напряжений и деформаций, созданием высокоэффективных сварных конструкций и разработкой методов и средств их диагностики.

Широкое признание получили его работы, посвященные разработке методов оптического моделирования, голографической интерферометрии, электронной спекл-интерферометрии и ширографии для исследования напряженного состояния и контроля качества сварных соединений в конструкциях из металлических, композиционных и полимерных материалов. Разработанные методологические подходы и созданные приборы имеют высокую точность и информативность применяются в научно-исследовательских организациях и предприятиях Украины, стран СНГ, Китая, Южной Кореи.

Благодаря трудам Л. М. Лобанова и его учеников сформировано новое научное направление — бездеформационная сварка конструкций, которая базируется на регулировании тепловых процессов во время сварки с целью уменьшения тепловложения и создании предварительно напряженно-деформированных состояний, оптимизированных по отношению к сварочным напряжениям и деформациям. Разработанные способы и технические средства устранения сварочных деформаций и напряжений были использованы при создании комплекса «Энергия-Буран» и других ракетно-космических систем. Принципиально новыми являются разработанные технологии бездеформационной сварки стрингерных панелей и оболочек из высокопрочных алюминиевых и титановых сплавов.

Под руководством Л. М. Лобанова в ИЭС им. Е. О. Патона выполняется комплекс фундаментальных исследований в области статической и динамической прочности сварных соединений с учетом их механической неоднородности и наличия трещиноподобных дефектов, сопротивления сварных соединений хрупким и слоистым разрушениям, а также усталостным разрушениям, научных подходов для обеспечения надежности и долговечности сварных конструкций при соблюдении требований относительно снижения их металлоемкости, методов неразрушающего контроля качества и диагностики сварных соединений и конструкций, оценки и продления ресурса сварных конструкций ответственного назначения. Созданы новые типы высокоэффективных сварных конструкций, к которым относятся легкие стрингерные металлоконструкции, пролеты мостов, тяжелонагруженные конструкции из высокопрочных сталей, уникальные конструкции преобразуемого объема. При его активном участии разработаны и введены в практику Государственные стандарты Украины, которые регламентируют требования к качеству сварных конструкций и технологии их изготовления, организовано систему сертификации сварочных технологий, материалов, оборудования и конструкций, разработана концепция Государственной программы по обеспечению технологической безопасности для основных отраслей экономики Украины.

Л. М. Лобанов принимал активное участие в создании трехтомного издания «Сварные строительные конструкции», в котором обобщен опыт по исследованию и разработке в области проектирования и изготовления конструкций, определения их технического состояния и реконструкции.

Л. М. Лобанов ведет большую научно-организационную работу как председатель Украинского технического комитета по стандартизации в области сварки, заместитель председателя Межгосударственного научно-технического совета по сварке и родственным технологиям, член Межведомственного совета по вопросам Научно-технологической безопасности при Совете Национальной безопасности и обороны Украины, заместитель председателя научного совета по целевой комплексной программе НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин». Он активно сотрудничает с международными научны-

ми организациями стран СНГ и дальнего зарубежья, регулярно выступает с научными докладами на престижных научных форумах, возглавляет ряд международных проектов.

Л. М. Лобанов — автор более 600 научных работ, в том числе 6 монографий, 60 авторских свидетельств и патентов. Подготовил 8 докторов и 15 кандидатов наук.

Награжден орденами «За заслуги» II и III степеней и «Знак Почета», знаком отличия Президиума НАН Украины «За научные достижения», медалью Ю. В. Кондратюка за участие в космической деятельности и многими другими медалями и знаками отличия.

В. С. ГВОЗДЕЦКОМУ — 80

В августе исполнилось 80 лет Василию Степановичу Гвоздецкому, главному научному сотруднику Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки и техники Украины, лауреату Премии Совета Министров СССР, Государственной премии УССР, известному ученому в области физики газового разряда и его приложений в технологических процессах соединения и обработки различных материалов.

В. С. Гвоздецкий родился 16 августа 1930 г. в селе Шура-Копеевка Тульчинского района Винницкой области в семье колхозника. Война прервала на несколько лет его учебу в сельской семилетней школе, которую он окончил лишь в 1948 г. Дальнейшая учеба в Тульчинском педагогическом училище (также с трехлетним перерывом на время службы в рядах Советской Армии) проявила его склонность к точным наукам и определила выбор профессии. В 1955–1960 гг. В. С. Гвоздецкий — студент радиофизического факультета Киевского государственного университета.

С 1961 г. трудовая и научная деятельность В. С. Гвоздецкого связана с ИЭС им. Е. О. Патона, где он прошел путь от рядового инженера отдела новых способов сварки до заведующего отделом физики газового разряда и техники плазмы, который он возглавил с момента его создания в 1978 г.

Начав свою научную деятельность уже в зрелом возрасте, В. С. Гвоздецкий благодаря глубоким теоретическим знаниям, природным способностям, интуиции физика, а также целеустремленности и настойчивости сумел в относительно короткий срок достичь значительных успехов в приложении своих знаний к решению актуальных практических задач сварочной науки.

В 1960-е годы им проведены систематические исследования малоамперной сжатой дуги и разработаны основы нового способа микроплазменной сварки металлов малых толщин.

В ходе решения этой задачи В. С. Гвоздецкий выполнил ряд фундаментальных исследований в области физики дугового разряда: им развита теория термо-автоэлектронной эмиссии с учетом полей индивидуальных ионов, разработана теория контрагирования малоамперной сжатой дуги, горящей в различных средах, проведены теоретические и экспериментальные исследования катодных процессов сварочной дуги и определены условия стабильного горения малоамперной дуги с холодным катодом.

В результате был разработан целый ряд способов микроплазменной сварки различных металлов, в том числе алюминия и его сплавов, созданы новые, оригинальные источники питания с применением тиристорных коммутаторов сварочного тока и малогабаритные плазмотроны для микроплазменной сварки на постоянном и переменном токе, а также в импульсном режиме (однополярными и разнополярными импульсами). Проведенные работы легли в основу кандидатской и докторской диссертаций В. С. Гвоздецкого, которые он защитил соответственно в 1968 г. и 1975 г.

В последующие годы под руководством В. С. Гвоздецкого были разработаны оригинальные электрические схемы тиристорных инверторов сварочного тока и созданы малогабаритные инверторные источники питания для сварки дугой высокочастотного модулированного тока (до 20 кГц) в широком диапазоне сварочных токов (1...200 А). Плазменная сварка высокочастотным модулированным током была широко и с большим экономическим эффектом внедрена в 1980-е годы с участием В. С. Гвоздецкого на предприятиях Мингазпрома СССР для ремонта и восстановления узлов и деталей газоперекачивающих агрегатов (рабочих лопаток турбин, жаровых камер, труб и др.).

В настоящее время В. С. Гвоздецкий проводит активную исследовательскую работу в области плазменной и термоструйной хирургии. С его участием созданы плазменно-хирургический комплекс, оборудование для термо- и пароструйной сварки и обработки живых тканей, проведен ряд исследований по использованию плазменных, термо- и пароструйных технологий в хирургии.

В. С. Гвоздецкий — автор более чем 200 научных работ, в том числе 2 книг, 53 авторских свидетельств, 22 зарубежных патентов и 4 патентов Украины.

А. Д. РАЗМЫШЛЯЕВУ — 70

В августе исполнилось 70 лет известному ученому в области сварки и наплавки, доктору технических наук, профессору кафедры оборудования и технологии сварочного производства Приазовского государственного технического университета, заслуженному изобретателю Украины, действительному члену Академии инженерных наук Украины Александру Денисовичу Размышляеву.

Александр Денисович родился 4 августа 1940 г. в Мариуполе. Вся его трудовая и научная деятельность связана с Приазовским государственным техническим университетом, куда он пришел молодым специалистом в 1965 г. после окончания этого же университета по специальности «Оборудование и технология сварочного производства». Он является учеником известного ученого, доктора технических наук, заведующего кафедрой, профессора К. В. Багрянского, под руководством которого подготовил диссертацию по исследованию процесса наплавки ленточным электродом и защитил в 1976 г. в Киевском политехническом институте.

Основные направления научной работы А. Д. Размышляева: исследование гидродинамических процессов в ванне при дуговой сварке и наплавке, разработка методов и средств управления формированием швов при сварке и наплавке.

В последние годы он плодотворно изучает процессы в сварочной дуге и ванне при дуговой наплавке и сварке с воздействием управляющих магнитных полей.

Результатом научной деятельности А. Д. Размышляева явилось опубликование им двух монографий, более 150 научных работ и получение более 20 авторских свидетельств на изобретения и патентов Украины. Под его руководством защищено 4 кандидатских диссертаций. Он является членом Специализированного совета при ПГТУ по защите кандидатских и докторских диссертаций. С 2003 по 2009 гг. был членом Специализированного совета по защите докторских диссертаций в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. В 1997 г. избран Председателем Донецкого отделения Общества сварщиков Украины, которым он является и по настоящее время.

А. Д. Размышляев большое внимание уделяет подготовке молодых специалистов по сварке. С 1999 по 2006 гг. он работал деканом сварочного факультета в ПГТУ.

Сердечно поздравляем юбиляров, желаем им крепкого здоровья, творческой активности долголетия и благополучия!

ПОДПИСКА — 2011 на журнал «Автоматическая сварка»

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

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

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

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

ПОДПИСНОЙ КУПОН

Адрес для доставки журнала _____

_____

Срок подписки с _____ **20** **г. по** _____ **20** **г. включительно**

Ф. И. О. _____

Компания _____

Должность _____

Тел., факс, E-mail _____

РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Обложка наружная, полноцветная
Первая страница обложки (190×190мм) — 700$
Вторая страница обложки (200×290мм) — 550$
Третья страница обложки (200×290мм) — 500$
Четвертая страница обложки (200×290мм) — 600$

Обложка внутренняя, полноцветная
Первая страница обложки (200×290мм) — 400$
Вторая страница обложки (200×290мм) — 400$
Третья страница обложки (200×290мм) — 340$
Четвертая страница обложки (200×290мм) — 340$

Внутренняя вставка
Полноцветная (разворот А3) (400×290мм) — 570$
Полноцветная (200×290мм) — 340$
Полноцветная (200×142мм) — 170$
Реклама в разделе информации
Полноцветная (165×245мм) — 300$
Полноцветная (165×120мм) — 170$
Полноцветная (82×120мм) — 80$

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
- Статья на правах рекламы (страница А4, 170×240мм) — 170$
- При заключении рекламных контрактов на сумму, превышающую 1000$, предусмотрена гибкая система скидок

Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрези 200×290мм
- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5мм с целью избежания потери части информации

Все файлы в формате IBM PC

- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi
- К файлам должна прилагаться распечатка (макеты в формате Word не принимаются)

Подписано к печати 08.07.2010. Формат 60×84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 9,09. Усл.-отт. 9,67. Уч.-изд. л. 10,22 + 6 цв. вклеек. Цена договорная.
Печать ООО «Фирма «Эссе». 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

© Автоматическая сварка, 2010

РАЗРАБОТАНО В ИЭС **УСТАНОВКА НК 362М**

Для автоматизированного ультразвукового контроля концевых участков труб диаметром 508...1420 мм с толщиной стенки 7...50 мм.

Установка обеспечивает:

✦ прозвучивание по всему периметру обоих концов труб по всей толщине стенки, выявление дефектов типа расслоений на ширине 60 мм от торца и продольно ориентированных дефектов типа трещин на ширине 30 мм от торца;

✦ автоматический контроль качества акустического контакта по всем дефектоскопическим каналам.

В установке автоматически выполняются следующие операции:

✦ запись и хранение информации о процессе и результатах контроля;

✦ выдача светового и звукового сигнала о наличии дефекта;

✦ выдача светового и звукового сигнала о недопустимом ухудшении качества акустического контакта;

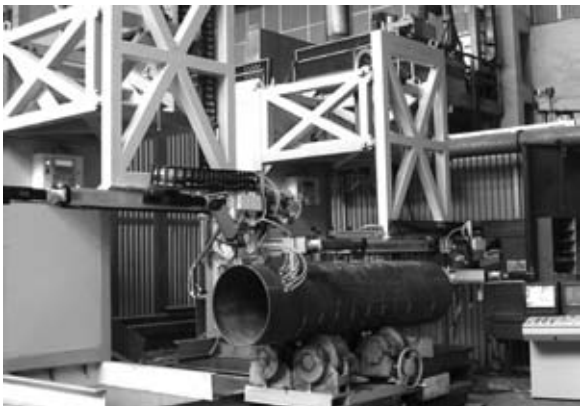
✦ диагностика работы оборудования и выдача сообщений на устройство человеко-машинного интерфейса;

✦ подготовка и передача необходимой информации о результатах контроля и работе установки в цеховую базу данных;

✦ нанесение отметок разного цвета на поверхность трубы, определяющих местоположение дефектов и участков с неудовлетворительным акустическим контактом.

Многоканальный ультразвуковой дефектоскоп выполнен на базе плат «Socomate».

Локально-иммерсионные акустические головки



Основные технические характеристики установки НК 362М

Параметр	Значение
Рабочая частота, МГц	2,5; 4,0
Линейная скорость контроля, м/мин, максимальная	20
Диапазон регулирования скорости, не менее	1/100
Количество УЗ каналов на базе плат «Socomate», шт.	16
Частота следования зондирующих импульсов по каждому каналу обеспечивает посылку импульсов на 1 мм, не менее	2
Запас чувствительности по каналам в динамическом режиме, не хуже, дБ	12
Неконтролируемая зона на концах труб, мм, не более	10
Неконтролируемая зона в районе сварного шва, мм, не более	15
Расход воды, л/мин, не более	50
Потребляемая мощность, кВ·А, не более	8

РАЗРАБОТАНО В ИЭС

УСТАНОВКА НК 364

Предназначена для автоматизированного ультразвукового контроля цельнокатаных железнодорожных колес, изготавливаемых по ГОСТ 10791 и техническим условиям, а также колес по зарубежным стандартам UIC, AAR в технологической линии их производства диаметром 760...1092 мм.

В установке автоматически выполняются следующие операции:

- ✦ запись и хранение результатов контроля;
- ✦ выдача светового и звукового сигнала о наличии дефекта;
- ✦ выдача светового и звукового сигнала о недопустимом ухудшении качества акустического контакта;
- ✦ диагностика работы оборудования и выдача сообщений на устройство человеко-машинного интерфейса;
- ✦ подготовка и передача необходимой информации о результатах контроля и работе установки в цеховую базу данных.

Установка имеет 6 акустических локально-иммерсионных блоков для контроля

- ✦ обода в осевом направлении;
- ✦ обода в радиальном направлении;
- ✦ ступицы;
- ✦ диска;
- ✦ диска в осевом направлении наклонными преобразователями;
- ✦ реборды.

Установки АУЗК железнодорожных колес успешно прошли метрологическую аттестацию в Украине, России, гарантийные испытания и введены в промышленную эксплуатацию.

Производительность установки составляет 70 колес в час.

Основные технические характеристики установки НК 364

Рабочая частота, МГц	2,5...5,0
Скорость вращения колеса, об/мин	5...20
Количество УЗ каналов, шт.	20 (40)
Временная нестабильность чувствительности за 8 ч работы, дБ, не более	2
Неравномерность чувствительности по ширине зоны контроля на глубине 70 мм, дБ, не более	0,5
Частота следования зондирующих импульсов по каждому каналу обеспечивает посылку импульсов на 1 мм, не менее	1
Запас чувствительности по каналам в динамическом режиме, дБ, не хуже	8
Неконтролируемая зона у боковых поверхностей контролируемых участков, мм:	
внутренняя боковая поверхность обода; диск колеса, не более	5
наружная боковая поверхность обода (для прямых ПЭП), внутренняя и наружная боковые поверхности обода (для наклонных ПЭП); поверхность катания, боковые поверхности ступицы	10
Величина акустического зазора, мм:	
при контроле обода и диска колеса для прямых и наклонных преобразователей, работающих в иммерсионном варианте	10...40
при контроле ступицы колеса для прямых преобразователей, работающих в щелевом варианте	0...3
Точность слежения за исходной кромкой зон контроля, мм	±0,5
Потребляемая мощность, кВ·А, не более	12

ОТЛИЧНАЯ СВАРКА

БОЛЕЕ МОЩНАЯ ДУГА СО СТРУЙНЫМ ПЕРЕНОСОМ МЕТАЛЛА ДЛЯ РОТОРОВ СВЕРХМОЩНЫХ ГИДРОТУРБИН

Новая функция для высокоэффективной сварки

Роторы гидротурбин подвержены огромным нагрузкам и рассчитаны на максимально долгую эксплуатацию. Для сварки нестандартных турбин на фирме «Andritz Hydro» используют функцию дуги со струйным переносом металла с импульсным управлением (Pulse Controlled Spray-arc — PCS). В этой компании основными приоритетами являются максимальная мощность и повышенная эффективность использования энергии, при этом более глубокое проплавление, снижение разбрызгивания и широкий диапазон возможных установок и регулировок.

PCS: Сочетание импульсной дуги и стандартной дуги со струйным переносом металла обеспечивает широкий диапазон регулирования при высокоэффективной сварке роторов гидротурбин на фирме «Andritz Hydro»

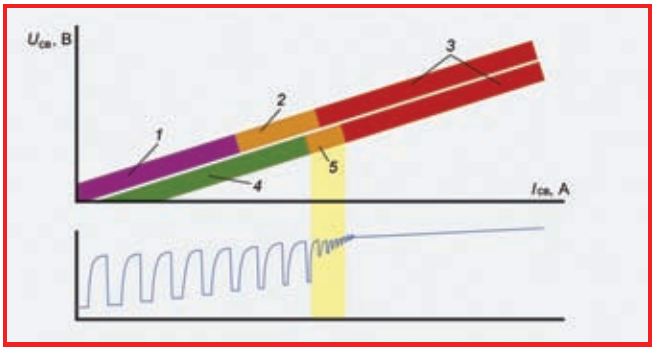
Инженер-сварщик Бодо Гизельманн объясняет: «Ротор гидротурбины — это основное устройство для получения электричества из кинетической энергии. В Европе мы одни из очень немногих поставщиков и единственные поставщики в Германии, которые производят роторы массой до 200 тонн». В широкий спектр используемых металлических материалов входят морская латунь и медные сплавы (CuAl8, CuAl10Ni2, CuMn13Al7), нелегированные конструкционные стали, закаленные в воде высо-

* Статья на правах рекламы.

копрочные марки сталей (S890Q), аустенитные, аустенитно-ферритные стали и материалы на основе никеля, вплоть до мягких мартенситных хромистых сталей с 13 % Cr и 4 % Ni. Специалисты-сварщики на «Andritz Hydro» практически являются пионерами в применении инновации, называемой PCS. По мнению Бодо Гизельманна, с точки зрения мощности, PCS — лучшее, что есть на рынке.

PCS: характеристики и преимущества

Функция PCS, разработанная на фирме «Fronius», сочетает импульсную и стандартную дугу со струйным переносом металла таким образом, что это объединяет и усиливает преимущества, определяемые пользователем. Для наиболее успешного применения высокоэффективного процесса с широким диапазоном регулирования на максимальной мощности фирма «Andritz Hydro» использует машины «TransPuls Synergic 5000». При этом сварочный процесс запускают на пониженной мощности, например, 50 % мощности «мягкой» импульсной дуги. После окончания предварительной настройки сварщик повышает мощность до рабочего значения. Отличительной особенностью PCS является обеспечение «агрессивной» дуги со струйным переносом металла, минуя промежуточный этап крупнокапельного переноса. На тонколистовом материале рабочее значение достигается в диапазоне импульсной дуги. На толстолистовом металле дуга со струйным переносом устанавливается непосредственно с низкого начального уровня мощности. Для окончания шва и заполнения кратера используется обратная последовательность. Сварщик может сохранить всю последовательность в виде «задания» для сварки определенной толщины и (или) комбинации материалов.



Обычные дуговые процессы (дугой, горящей с периодическими короткими замыканиями дугового промежутка, с крупнокапельным и со струйным переносом металла) в сравнении с инновационным процессом сварки дугой со струйным переносом металла и пульсирующей дугой с импульсной модуляцией: *1* — дуга, горящая с периодическими короткими замыканиями дугового промежутка; *2* — дуга с крупнокапельным переносом металла; *3* — дуга со струйным переносом металла; *4* — импульсная дуга; *5* — дуга со струйным переносом металла с импульсной модуляцией

Результаты и преимущества

Основные преимущества PCS заключаются в более глубоком проплавлении, высокой скорости сварки, высокой производительности наплавки, возможности сварки без коротких замыканий в диапазоне скорости подачи проволоки 1,5...22 м/мин (4,9...72 фут/мин), широком диапазоне регулирования в режиме импульсной дуги и низком разбрызгивании при переносе металла. Концентрированная агрессивная дуга со струйным переносом металла проникает на большую глубину в соединение, обеспечивая контролируемое сплавление боковых стенок зазора. Бодо Гизельманн объясняет, что благодаря этому можно уменьшить угол скоса кромок до 20 %, что дает большую экономию при подготовительных операциях. Кроме того, это намного облегчает работу в нестандартных положениях. Так как расплав быстрее заполняет зазор в соединении, и сварка выполняется на повышенной скорости, уменьшается тепловложение на единицу длины шва и снижаются деформации. Следует также отметить, что PCS положительно влияет на баланс энергии благодаря снижению расхода электричества. Повышенная рентабельность и конкурентоспособность при снижении воздействия на окружающую среду — это действительно убедительные аргументы.

ООО «Фрониус Украина» 07455,
Киевская обл.,
Броварской р-н, с. Княжичи,
ул. Славы, 24
Тел.: +38 044 277 21 41;
факс: +38 044 277 21 44
E-mail: sales.ukraine@fronius.com;
www.fronius.ua

«Andritz Hydro» — компания, являющаяся технологическим лидером и занимающая наибольшую долю рынка в области гидроэлектрических установок. Ее международный кадровый состав насчитывает около 5600 человек. На предприятии в Равенсбурге работает 460 человек, которые разрабатывают, производят, ремонтируют и модернизируют гидроэлектрические установки, включая роторы гидротурбин массой до 200 тонн. В этих работах сварщики «Andritz Hydro» полагаются на функцию PCS, разработанную фирмой «Fronius».

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-НпХ25П4Н3Т, 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

С 1992 г. на рынке сварочного оборудования Украины

предприятие
«Триада-Сварка»
г. Запорожье

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

ABICOR BINZEL
Fronius
SELMA

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

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 (38056) 37-41-912
E-mail sp@speissplav.dp.ua

НАВКО-ТЕХ
Automatic machines and robots for arc welding

Автоматические установки и роботы для дуговой сварки и наплавки

УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ШВОВ

УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ КОЛЬЦЕВЫХ ШВОВ

РОБОТОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ СВАРКИ

СВАРОЧНАЯ АППАРАТУРА

Украина, Киев
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

ОАО «Электромашиностроительный завод «Фирма СЭЛМА»

Производство электросварочного оборудования

Номенклатура выпускаемого оборудования составляет более 100 наименований сварочной техники для всех видов электродуговой сварки:

- трансформаторы и выпрямители для ручной дуговой сварки
- полуавтоматы для сварки в среде защитных газов
- установки для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом
- установки воздушно-плазменной резки металла
- сварочные автоматы. Сварочные головки
- машины для контактной точечной сварки
- оборудование для механизации процесса сварки и резки
- оборудование для управления контактными сварочными машинами
- машины для автоматической плазменной резки портального типа
- машины для автоматической резки и разделки кромок под сварку труб
- дизельные сварочные агрегаты типа АДД
- машины для механической подготовки кромок под сварку

Вся продукция фирмы сертифицирована Госстандартами Украины и России. На предприятии внедрена и сертифицирована система обеспечения качества выпускаемой продукции ISO 9001-2001, TUV (Германия).

«Фирма СЭЛМА» проводит гарантийное и сервисное обслуживание оборудования, пусконаладочные работы, обучение и консультации по эксплуатации сварочного оборудования.

95000 , г. Симферополь, Украина,
ул. Генерала Васильева, 32А
Отдел маркетинга и сбыта: +38 (0652) 66-85-37, 58-30-55
Факс: +38 (0652) 58-30-53
E-mail: sales@selma.crimea.ua http://www.selma.ua

ОАО «ЗАПОРОЖСТЕКЛОФЛЮС»

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

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

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

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

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

Силикат натрия растворимый (модуль от 2,0 до 3,5). Широко применятся для изготовления жидкого стекла и сварочных электродов.

МЫ ВСЕГДА ГАРАНТИРУЕМ СТАБИЛЬНОСТЬ ПОСТАВОК И САМЫЕ НИЗКИЕ ЦЕНЫ В СНГ
Наша цель — более полное удовлетворение Ваших потребностей в качественных и современных сварочных материалах.

ОАО "ЗОНТ"

ТМ АВТОГЕНМАШ

ПРОИЗВОДСТВО:
МАШИН ФИГУРНОЙ ГАЗОКИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ "АСШ-70М";
МАШИН ДЛЯ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ "МЕТЕОР";
МАШИН ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ "КОМЕТА М";
МАШИН ДЛЯ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ "МАРИНА";
МАШИН ПЛАЗМЕННОЙ И ГАЗОКИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ С ЧПУ ДЛЯ ФИГУРНОЙ РЕЗКИ ТРУБ;
ПЕРЕНОСНЫХ ГАЗОРЕЖУЩИХ МАШИН "РАДУГА";
НАСОСОВ, ТЕПЛООБМЕННИКОВ И ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ДЛЯ КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ.

ПОСТАВКА
ИСТОЧНИКОВ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ.

КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ И МОДЕРНИЗАЦИЯ
МАШИН ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛА.

ОАО "ЗОНТ" (ТОРГОВАЯ МАРКА <<АВТОГЕНМАШ>>)
65104, УКРАИНА, Г. ОДЕССА, ПР-Т. МАРШАЛА ЖУКОВА 103.
Т. +38 (048) 717-00-50, 715-69-40, Ф. +38 (048) 715-69-50
E-MAIL: OAOZONT@ZONT.COM.UA
WWW.ZONT.COM.UA
WWW.AUTOGENMASH.COM

Днепрометиз
Группа предприятий «Северсталь-метиз»

ОАО "Днепрометиз" - крупнейшее предприятие Украины в своей отрасли, входит в международную группу производителей "Северсталь-метиз"

e-mail: sale@dm.severstalmetiz.com
т/ф: (0562) 34-82-24, 35-83-69, 35-15-97
Украина, 49081, г. Днепропетровск, пр. им. газеты „Правда", 20

ПРОВОЛОКА:
сварочная Св-08 (А), Св-08Г2С
Вр-1 для армирования ЖБК
общего назначения без покрытия
термообработанная черная
оцинкованная
колючая

СЕТКИ:
плетеные
сварные
рифленые

ЭЛЕКТРОДЫ:
МР-3
АНО-4
АНО-6
АНО-21
УОНИ

ГВОЗДИ
БОЛТЫ
ГАЙКИ
ШАЙБЫ

www.dneprometiz.com.ua

Каховский завод электросварочного оборудования
market@kzeso.com www.kzeso.com

СИЛА ПРОТИВОПОЛОЖНОСТЕЙ...

КЗЭСО

Специальные Научные Разработки
Научно-производственная фирма
СНР

ДИАГНОСТИКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА

Магнитный структуроскоп КРМ-Ц-К2М
- остаточные напряжения
- конструкционные напряжения
- результаты термообработки
- усталостные изменения
- развитие опасных зон
- оценка ресурса
- предупреждение разрушений

✔ без зачистки
✔ через защитное покрытие до 6 мм
✔ без контактной жидкости

Украина, 61121, г. Харьков, ул. Светлая, 10/16; тел./факс +38 (057) 771-65-91, 738-32-06
www.snr-ndt.com | e-mail: mail@snr-ndt.com
в Москве – ООО "Магнитометрическая диагностика", +7 (499) 502-93-91, mail@mdiag.ru

Разработка, производство, внедрение

СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Проволоки порошковые для сварки и наплавки, проволоки сплошные, электроды, флюс, наплавочные установки

Welding Alloys Group

HYUNDAI WELDING

ООО «НПФ «Элна» является разработчиком и производителем порошковых проволок для сварки и наплавки, а также представителем компаний WELDING ALLOYS GROUP (Англия) и HYUNDAI WELDING Co. Ltd (Южная Корея) в Украине

НПФ ЭЛНА

ООО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА «Элна»
ул. Антоновича, 69, г. Киев, 03150, Украина
тел. (044) 200-80-25, 200-85-17, факс (044) 200-85-17
e-mail: mfo@elna.com.ua www.elna.com.ua

ЗАВОД АВТОГЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДОНМЕТ®

Украина, г. Краматорск, тел./факс: (06264) 5-77-13
svarka@donmet.com.ua www.donmet.com.ua

Все для газовой резки и сварки.
Електросварка.

100% гарантия от производителя

GYS ТЗ ДОНМЕТ®

ФИРМЕННАЯ ТОРГОВАЯ СЕТЬ

КИЕВ • ДОНЕЦК
Тел./факс (044) 404-38-72 Тел./факс (062) 381-88-93

ЗАПОРОЖЬЕ
Тел./факс (061) 224-11-56

ЛУГАНСК • ОДЕССА
Тел./факс (0642) 71-51-65 Тел./факс (048) 785-19-65

Plasma Master

Научно-производственная фирма
ПЛАЗМА-МАСТЕР ЛТД.

Лидер в Украине в области плазменно-порошковой наплавки

- Оборудование для плазменно-порошковой наплавки
- Плазмотроны для наплавки различных модификаций
- Технологические разработки в области плазменной наплавки
- Услуги по наплавке деталей машин

Ручная плазменно-порошковая наплавка - прекрасный инструмент в ремонте!

Украина, 03680, Киев
ул. Кржижановского, 3
тел./факс: +38 044 537-31-44
office@plasma-master.com.ua
www.plasma-master.com.ua