



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

ИЗДАТЕЛЬ:

Международная ассоциация
«Сварка»

Адрес редакции:

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

Редакторы:

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

Свидетельство о государствен-
ной регистрации КВ 4788
от 09.01.2001.

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

СОДЕРЖАНИЕ

НОВОСТИ 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Махненко В. И., Миленин А. С. Математическое
моделирование процессов реакционной диффузии при
сваркопайке нахлесточных соединений типа титан-алюминий 5

Лобанов Л. М., Махненко В. И., Пашин Н. А., Логинов В. П.
Особенности формирования пластических деформаций
при электродинамической обработке сварных соединений
стали СтЗ 10

Кузьмин С. В., Лысак В. И., Хаустов С. В., Сильченко Т. Ш.
Принципы расчета режимов сварки взрывом металлических
слоистых композитов 16

Рябцев И. А., Переплетчиков Е. Ф., Миц И. В., Бартенев И. А.
Влияние исходной структуры и гранулометрического состава
порошка на структуру металла 10P6M5, наплавленного
плазменно-порошковым способом 23

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Игнатченко П. В. Производство сварочных материалов в СНГ
(по материалам IV Международной конференции по
сварочным материалам стран СНГ) 28

*Кулик В. М., Савицкий М. М., Лупан А. Ф., Черторыльский
Л. А., Сухоярский В. Э.* Аргодуговая сварка заготовок
валов для металлургического оборудования 34

Козулин С. М., Лычко И. И., Козулин М. Г. Методы
восстановления бандажей вращающихся печей (Обзор) 40

Жерносеков А. М., Андреев В. В. Импульсно-дуговая сварка
плавящимся электродом (Обзор) 48

Бернадский В. Н., Шелягин В. Д., Маковецкая О. К.
Современный рынок лазерной техники для сварки и
обработки материалов 53

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Жудра А. П., Кривчиков С. Ю., Петров В. В. Влияние титана
на трещиностойкость углеродистого наплавленного металла 60

Патенты в области сварочного производства 62

По зарубежным журналам 64

Новые книги 66

ХРОНИКА

2-я Научно-практическая конференция на ОАО «Фирма
«СЭЛМА» 67

5-я Международная конференция «Металлы, сварка и
порошковая металлургия» 70

Наши поздравления (В. Л. Найда, М. Ф. Гнатенко) 71

ИНФОРМАЦИЯ 73

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B.E.PATON

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

THE INTERNATIONAL
EDITORIAL COUNCIL:

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

FOUNDERS:

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

PUBLISHER:

International Association «Welding»

Address of Editorial Board:

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

Editors:

E. N. Kazarova, T. V. Yushtina

Electron galley:

I. S. Batasheva, L. N. Gerasimenko,
A.I.Sulima, I. R. Naumova,
I. V. Petushkov

State Registration Certificate
KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved.

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

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

CONTENTS

NEWS	3
------------	---

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

<i>Makhnenko V. I., Milenin A. S.</i> Mathematical modeling of processes of reaction diffusion in braze welding of overlap joints of aluminium-titanium type	5
<i>Lobanov L. M., Pashchin N. A., Loginov V. P.</i> Specifics of formation of plastic deformations in electrodynamic treatment of welded joints of steel St3	10
<i>Kuzmin S. V., Lysak V. I., Haustov S. V., Silchenko T. Sh.</i> Principles of calculation of conditions of explosion welding of metallic laminar composites	16
<i>Ryabtsev I. A., Pereplyotchikov E. F., Mitz I. V., Bartenev I. A.</i> Effect of initial structure and granulometric composition of powder on structure of metal 10R6M5 deposited by plasma-powder method	23

INDUSTRIAL

<i>Ignatchenko P. V.</i> Production of welding consumables in CIS (from materials of the IVth International Conference on welding consumables of CIS countries)	28
<i>Kulik V. M., Savitsky M. M., Lupan A. F., Chertorulsky L. A., Sukhoyarsky V. E.</i> Argon arc welding of shaft billets for metallurgical equipment	34
<i>Kozulin S. M., Lychko I. I., Kozulin M. G.</i> Methods of restoration of bands of rotary furnaces (Review)	40
<i>Zhernosekov A. M., Andreev V. V.</i> Pulsed-arc consumable electrode welding (Review)	48
<i>Bernadsky V. N., Shelyagin V. D., Makovetskaya O. K.</i> Present-day market of laser equipment for welding and treatment of materials	53

BRIEF INFORMATION

<i>Zhudra A. P., Krivchikov S. Yu., Petrov V. V.</i> Effect of titanium on crack resistance of carbon deposited metal	60
Patents in the field of welding	62
Review of foreign journals	64
New books	66

NEWS

The 2nd Scientific-Practical Conference at OJSC «SELMA company»	67
The 5th International Conference «Metals, welding and powder metallurgy»	70
Our congratulations (V. L. Naida, M. F. Gnatenko)	71

INFORMATION	73
-------------------	----

ДЕЛОРО СТЕЛЛИТ ГРУП – ЮБИЛЯР

НАМ 100 ЛЕТ — в этом году Делоро Стеллит Групп (Deloro Stellite Group) отмечает столетие своего основания и теперь уже векового успешного развития.

Немного истории. Уникальный широкоизвестный в технических кругах сплав Стеллит (Stellite®) был разработан американским изобретателем Элвудом Хейнсом (см. стр. 1 обл.) из города Кокомо, штат Индиана США (Патент США № 873.745 от 23 апреля 1907 г.). Стеллит (от лат. звездный) — сплав на основе кобальта. Для его производства необходим достаточно чистый кобальт... На многие годы прославилась маленькая канадская деревня золотоискателей Делоро. На золотых рудниках О'Брайна, кроме золота, добывали большое количество кобальта высокой чистоты. Впервые ученый Элвуд Хейнс оценил свойства кобальта и его сплавов и получил первый патент. Благодаря сотрудничеству О'Брайна и Элвуда было создано предприятие Делоро Стеллит. Стеллиты планировалось применять в автомобилестроении, пищевой промышленности и медицине — а сейчас ...

А СЕЙЧАС мы стали ведущей компанией в мире. В арсенале у нас 12 предприятий по всему миру. Более 500 сплавов на основе кобальта, никеля и железа. Мы производим присадочные материалы: прутки,



покрытые электроды, порошковые проволоки и порошки практически для всех известных способов нанесения термических покрытий. Области применения наших оригинальных сплавов — энергетика, нефтегазодобыча, нефтехимия, аэрокосмическая техника, арматуростроение, пищевая, медицина и др. Мы все еще молоды, полны надежд, творческих сил и технического потенциала! Нам по плечу помочь Вам в борьбе с абразивным износом, эрозией, коррозией, кавитацией, высокой температурой и т.д.

100 ЛЕТ – ВРЕМЯ ЗРЕЛЫХ РЕШЕНИЙ. В сентябре 2007 г. построен и введен в действие новый современный литейный цех на территории Делоро Стеллит ГмбХ (Кобленц, Германия), который позволит сок-



ратить сроки выполнения заказов клиентов и повысить качество выполняемых работ.

Делоро Стеллит Холдинг ГмбХ (Германия) и Вирго Консалтинг Лимитед (Индия) подписали в сентябре 2007 г. договор о создании совместного предприятия с производством в штате Уттрэйчл (Индия). На предприятии будут использоваться современные технологии плазменно-порошковой наплавки (Starweld PTA), сверхзвукового напыления (Jet Kote®) и оригинальные материалы Делоро Стеллит для нанесения термических покрытий на детали паровых и газовых энергетических турбин.

В октябре 2007 г. в Хьюстоне (США) будет открыто новое предприятие Делоро Стеллит, специализация которого — выполнение заказов по



наплавке, напылению и финишной механической обработке особо ответственных деталей нефтегазового оборудования для промышленности США. Современные технологии и материалы Делоро Стеллит обеспечат надежными и износостойкими изделиями производителей и потребителей этой отрасли.

Делоро Стеллит для авиационной промышленности Украины. Делоро Стеллит Групп и ведущее авиационное предприятие Украины ОАО «Мотор Сич» после нескольких лет сотрудничества заключили первый контракт на изготовление и поставку ручной установки для плазменно-порошковой наплавки и роботизированной установки для микроплазменной наплавки. ОАО «Мотор Сич» — одно из крупнейших в мире и единственное в Украине предприятие по производству, испытанию и ремонту двигателей для самолетов, вертолетов и промышленных газотурбинных установок. Наше оборудование будет использоваться как для упрочнения новых деталей, так и для восстановления ранее использованных. Роботизированная установка разработана для наплавки особо малых деталей газовых турбин и двигателей: торцы бандажных полок лопаток, гребешки лабиринтных уплотнений на рабочих лопатках, валах и дисках



турбин, зиги бандажных полок лопаток турбин и т. д. Для этих целей разработан специальный плазмотрон, работающий на токах 3...50 А с возможностью формирования наплавочного шва сверхмалых размеров. Для наплавки будут использоваться оригинальные порошки Делоро Стеллит. Установки будут изготовлены предприятием Хеттигер Стеллит (Кобленц, Германия) и введены в эксплуатацию в Украине в четвертом квартале 2007 г.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПОЛУАВТОМАТ ООО «ШТОРМ-ИТС»

В 2007 г. ООО «Шторм-ИТС» завершил работу над новой моделью полуавтомата — ПДГО-528 М, сочетающей в себе надежность, функциональность, простоту управления и доступную цену. Данная модель предназначена для сварки изделий из малоуглеродистых, низколегированных и легированных сталей, алюминия, меди. Сварка может осуществляться протяженным или прерывистым швом, стальными проволоками (диаметр 0,8...1,6), алюминиевыми (диаметр 1,2...2,0) или порошковыми (диаметр 1,0...3,2).

Полуавтомат может работать с различными сварочными выпрямителями на токе от 60 до 500 А. В основе конструкции полуавтомата лежит 4-х роликовый механизм подачи проволоки, который обеспечивает стабильную подачу проволоки без затруднения ее

прохождения по каналу горелки независимо от качества намотки проволоки на кассету и колебаний напряжения в сети питания. Полуавтомат разработан в двух модификациях: с газовым и жидкостным охлаждением горелки. Сварочная горелка быстро подсоединяется к полуавтомату с помощью центрального евроразъема. Благодаря разделному регулированию прижатия проволоки и высокому крутящему моменту, аппарат обладает значительным усилием проталкивания проволоки, что позволяет использовать сварочные горелки с длиной шланга до 5 м.

Новая плата управления встроена в корпус полуавтомата. В данной модели реализованы функции: защиты двигателя от перегрузки; защиты от попадания сварочного напряжения в схему управления; защиты силовых транзисторов от перегрева.

Универсальное питание схемы управления позволяет использовать широкий диапазон питающих напряжений.

Предусмотрена возможность установки времени продувки газа до и после сварки, минимального и максимального значения скорости подачи проволоки во время сварки. Максимальная длина пакета, не приводящая к потере функциональных возможностей полуавтомата, — 50 м. Полуавтомат компактен, имеет небольшой вес (17 кг), современный и эргономичный дизайн: откидная крышка полуавтомата позволяет быстро менять ролики, специальная рукоятка позволяет легко перемещать его по территории производственного участка. Усиленный корпус дает возможность использовать данный полуавтомат в интенсивных производственных условиях.

Конструктивно полуавтомат оснащен кассетодержателем под проволоку с диаметром кассеты 300 мм (евростандарт), массой до 18 кг и пластиковым

кожухом, защищающим проволоку от загрязнений. Возможен вариант поставки полуавтомата без кожуха, что удешевляет приобретаемую модель и упрощает процесс смены проволоки.

ПДГО-528 М ремонтпригодный и легкий в обслуживании, в его конструкции отсутствуют труднозаменяемые механизмы. Он обеспечен гарантийным (1 год) и послегарантийным обслуживанием.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ ФМХ-1

Ивано-Франковским национальным техническим университетом разработано портативное устройство для определения физико-механических



характеристик сталей ФМХ-1. С помощью прибора можно оценить пределы текучести (200...800 МПа) и прочности (400...1000 МПа) материалов с погрешностью не более 10 %. Для оценки механических характеристик используется их зависимость от твердости и теплопроводности материала. Встроенный алгоритм обработки измерительной информации базируется на нейронных сетях. Устройство обеспечивает возможность определения структуры стали и способно работать под управлением ПК и автономно. Для первого варианта разработано специализированное программное обеспечение для синхронизации устройства с ПК.





УДК 621.91.01

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕАКЦИОННОЙ ДИФФУЗИИ ПРИ СВАРКОПАЙКЕ НАХЛЕСТОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИПА ТИТАН–АЛЮМИНИЙ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **А. С. МИЛЕНИН**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана математическая модель процессов реакционной диффузии в сварных нахлесточных соединениях типа титан–алюминий. Произведена оценка степени риска образования хрупкого слоя интерметаллида $TiAl_3$ в зависимости от параметров сварочного процесса. Получены данные о распределении элементов в зоне сварного контакта.

Ключевые слова: сваркопайка, титан, алюминий, разнородное соединение, реакционная диффузия, слой интерметаллидного соединения, моделирование

Одной из характерных особенностей сварки разнородных металлов с ограниченной взаимной растворимостью является риск формирования в зоне сварного контакта слоев интерметаллидных соединений. Наличие значительной доли таких включений может существенно снизить технологические свойства сварного узла [1–3].

В связи с этим кинетика процессов реакционной диффузии, имеющих место при сварке разнородных соединений, должна быть учтена при оптимизации параметров соответствующего производственного цикла.

Экспериментальное изучение тепломассопереноса при сварке сопряжено со значительными трудностями и затратами, поэтому определенный интерес в этом плане представляют методы математического моделирования соответствующих процессов на основе современных численных методов [4].

С этой целью на примере получения нахлесточного соединения титана и алюминия сваркопайкой разработана математическая модель, описывающая процессы реакционной диффузии на границе сварного соединения.

Характерные особенности процессов реакционной диффузии при сваркопайке нахлесточных соединений типа титан–алюминий. При сварке титана с алюминием в случае формирования интерметаллидных слоев в зоне сварного контакта возникает проблема снижения качества разнородного соединения [1, 5]. Как видно из диаграммы состояния двойной системы титан–алюминий (рис. 1), эти металлы отличаются низкой взаимной растворимостью, поэтому при перемешивании их жидких фаз невозможно избежать возникновения хрупких интерметаллидных соединений.

Вследствие существенного различия температур плавления титана (1668 °C [6]) и алюминия (660 °C [7]) для их соединения может быть применена сваркопайка. Суть этого процесса заключается в том, что под действием источника сварочного нагрева металл с более высокой температурой плавления (титан) остается твердым, а с более низкой (алюминий) плавится, образуя сварнопаяный контакт [1, 2, 5, 8]. Это позволяет максимально снизить температуру нагрева поверхности соприкосновения жидкого и твердого металлов и тем самым уменьшить риск образования интерметаллидных слоев.

Процесс формирования интерметаллидного слоя у поверхности сварнопаяного контакта может быть условно разделен на следующие этапы [9]:

релаксация пика межфазной энергии на границе жидкий–твердый металл;

формирование островков новой фазы в местах микродефектов на поверхности твердого металла, рост этих островков вдоль поверхности контакта и смыкание их в сплошную прослойку;

диффузионный рост интерметаллидного слоя в направлении от поверхности разнородного контакта.

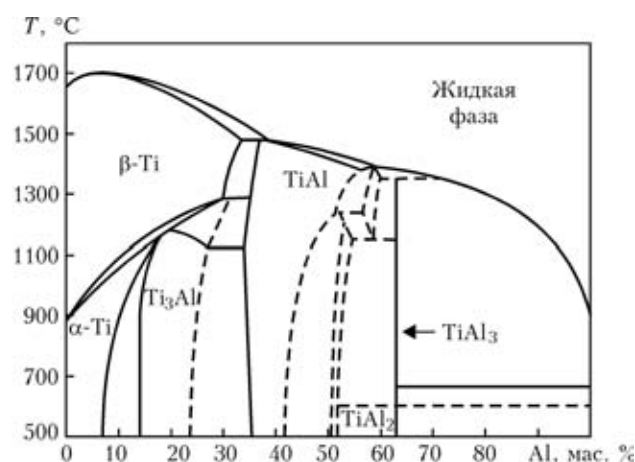


Рис. 1. Диаграмма состояния двойной системы Ti–Al [2]

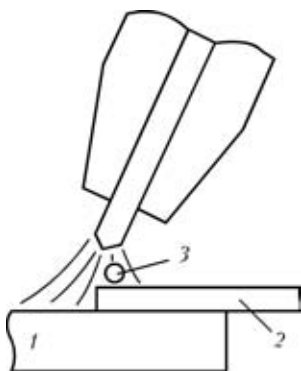


Рис. 2. Схема процесса получения сварнопаяного нахлесточного соединения системы Ti–Al [5]: 1, 2 — соответственно алюминиевая и титановая часть изделия; 3 — алюминиевая присадочная проволока

Следует также отметить, что в течение первых двух этапов формирования интерметаллидного слоя его толщина невелика, поэтому значительного снижения технологических характеристик сварного соединения [8, 10] не происходит. Суммарная длительность этих этапов определяет так называемый латентный период образования интерметаллидов. Именно его наличие позволяет избежать появления в сварных соединениях титана и алюминия хрупких интерметаллидных слоев толщиной, достаточной для значительного ухудшения эксплуатационных свойств сварного узла.

Несмотря на то, что на диаграмме состояния двойной системы Ti–Al показано наличие четырех стабильных интерметаллидных соединений (Ti_3Al , $TiAl$, $TiAl_2$, $TiAl_3$), при сваркопайке титана и алюминия возможно формирование только слоя стехиометрического соединения $TiAl_3$, тогда как количество других интерметаллидных фаз либо пренебрежимо мало, либо они вообще отсутствуют [11]. Это связывают с различными отношениями скорости реакции образования соответствующих интерметаллидных соединений к скорости поступления элементов в область реакции (диффузии) при сварке, что не может быть отражено в равновесной диаграмме состояния двойной системы.

В рамках разработанной математической модели рассматривается процесс реакционной диффузии с формированием слоя интерметаллидного соединения $TiAl_3$.

Моделирование процессов теплопереноса и реакционной диффузии при сваркопайке нахлесточного соединения типа титан–алюминий. Одним из примеров сваркопайки разнородного соединения системы Ti–Al является аргонодуговая сварка внахлестку титановой и алюминиевой пластин с использованием алюминиевой присадочной проволоки [1, 5]. Схема этого процесса представлена на рис. 2. Концентрированный источник нагрева (в данном случае — это сварочная дуга, хотя в настоящее время в подобных схемах

используют лазер [2, 8]) движется вдоль сварного контакта, расплавляя алюминиевую проволоку и подплавляя алюминиевую кромку. Жидкий алюминий, растекаясь по твердому титану (титановая кромка может быть предварительно алитирована), образует сварнопаяный контакт. Чтобы не происходило перегрева сварочной ванны и титан оставался в твердом состоянии, источник сварочного нагрева движется достаточно быстро, что делает целесообразным использование для математического моделирования процессов теплопереноса соответствующих двумерных моделей.

Геометрические параметры полученного сварного соединения следующие:

Ширина титановой пластины, мм	70
Ширины алюминиевой пластины, мм	70
Толщина титановой пластины, мм	2
Толщина алюминиевой пластины, мм	8
Высота сварочного валика, мм	6,2
Ширина шва, мм	20,3
Длина линии контакта титановой и алюминиевой части сварного соединения, мм	30

Основные технологические характеристики процесса сварки:

Скорость перемещения источника вдоль соединения, мм/с	4
Мощность источника, кВт	4,4
КПД нагрева, %	50
Диаметр сварочного пятна, мм	3

Геометрические размеры валика сварного шва приняты с учетом равнопрочности получаемого сварного соединения.

Следует также отметить, что в рамках данной математической модели не рассматривается вопрос о растекании металла вплоть до формирования валика конечной формы, поскольку влияние этого процесса на характер распространения тепла невелико и проявляется только в небольшой области, расположенной перед источником сварочного нагрева.

Кинетика двумерного температурного поля может быть описана с помощью численного решения уравнения теплопроводности:

$$C(x, y, T) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(x, y, T) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(x, y, T) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где $T(x, y, t)$ — температура в точке (x, y) прямоугольной системы координат в момент времени t , °C; $\lambda(x, y, T)$ — теплопроводность металла в точке (x, y) с температурой T , Дж/(мм·с·°C); $C(x, y, T)$ — объемная теплоемкость материала, Дж/(мм³·°C).

Для корректной постановки задачи теплопроводности требуется учет начальных и граничных условий. Таковыми приняты следующие:

$$-\lambda(x, y, T) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial n} \Big|_{(x, y) \in G} = \alpha_1 (T(x, y, t) - T_c); \quad (2)$$

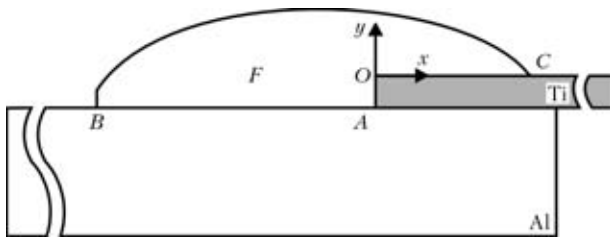


Рис. 3. Схема нахлесточного сварного соединения типа титан-алюминий [1, 5]

$$T(x, y, 0) = \begin{cases} T_L^{\text{Al}}, & \text{если } (x, y) \in F, \\ T_c, & \text{если } (x, y) \notin F, \end{cases} \quad (3)$$

где n — нормаль к поверхности; G — граница контакта металла сварного соединения с окружающей атмосферой; α_t — коэффициент теплопередачи, который, согласно экспериментальным данным, в случае контакта с окружающей атмосферой, равный $0,0002 \text{ Вт}/(\text{мм}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; $T_L^{\text{Al}} = 600^\circ\text{C}$ — температура плавления алюминия; T_c — температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$; F — область шва, ограниченная кривой $AOCB$ (рис. 3).

Численное решение уравнения теплопроводности (1) с граничными (2) и начальными условиями (3) для сварки разнородного соединения с указанными выше геометрическими параметрами позволило выявить характер изменения во времени поля температур. Расчет проводили по всей площади поперечного сечения сварной конструкции.

Таким образом, зная временную зависимость температуры поверхности контакта алюминия и титана можно оценить риск образования слоя интерметаллидов. Зависимость латентного периода образования интерметаллидного соединения TiAl_3 от температуры на границе поверхностного контакта титана и алюминия показана на рис. 4. Чтобы учесть латентный период в случае переменного во времени поля температур рассматривался коэффициент χ риска образования интерметаллидов в следующем виде [5]:

$$\chi = \int_0^{t_0} \frac{dt'}{\tau(T)}, \quad (4)$$

где t_0 — обозримое время пребывания рассматриваемой конкретной точки контакта титана с жидким алюминием при высокой температуре; $T = T(t')$ — температура в рассматриваемой точке контакта в момент времени t' , $0 \leq t' \leq t_0$; $\tau(T)$ — длительность латентного периода, которая принимается по рис. 4. В этом случае выполнение условия $\chi < 1$ гарантирует отсутствие интерметаллидных слоев значительной толщины.

В качестве примера расчета этого критерия в случае нахлесточного сварного соединения титана

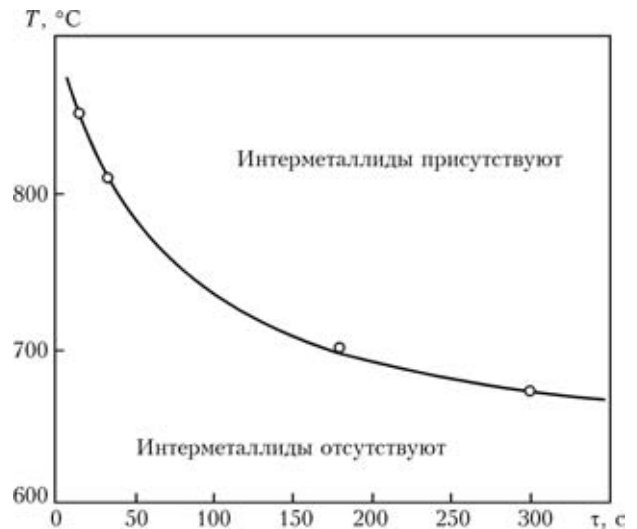


Рис. 4. Температурная зависимость длительности τ латентного периода образования интерметаллидного соединения TiAl_3 на границе поверхностного контакта твердого титана с жидким алюминием [5]

и алюминия на рис. 5 показано распределение коэффициента риска образования интерметаллида TiAl_3 вдоль линии OC поверхностного контакта металлов (рис. 3) при различных пространственных положениях источника сварочного нагрева относительно края титановой части сварного соединения (значения $\chi > 1$ на графиках не показаны). Как видно из рисунка, коэффициент риска образования интерметаллидов существенно зависит от положения источника нагрева. В том случае, если источник находится либо около края

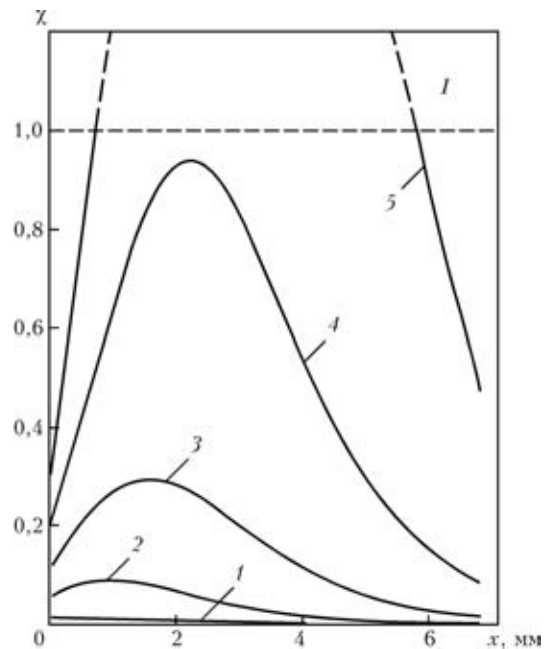


Рис. 5. Зависимость коэффициента χ риска образования TiAl_3 в различных точках поверхности сварного контакта в разнородном соединении от положения источника нагрева: 1 — $x_0 = -2,7$; 2 — 0; 3 — 1; 4 — 2; 5 — 3 мм; I — область высокого риска снижения эксплуатационных качеств конструкции вследствие наличия интерметаллидных слоев



титановой части сварного соединения, либо смещен в сторону алюминиевой части, то это практически гарантирует отсутствие интерметаллидного слоя. Однако если источник смещен в сторону титановой части изделия на расстояние 2 мм и более, тогда избежать появления хрупких интерметаллидных слоев трудно. Эти результаты хорошо согласуются с разработанными на основе экспериментальных данных параметрами режимов сваркопайки нахлесточных соединений титана с алюминием [5].

В некоторых случаях наличие сплошного интерметаллидного слоя определенной толщины не снижает общей прочности сварного узла (если, например, процесс сварки значительно ослабляет прочность зоны термического влияния алюминиевой части изделия). В связи с этим определенный интерес представляет оценка толщины слоя интерметаллидов при режимах, когда нарушается условие $\chi < 1$.

Как уже упоминалось выше, если время пребывания зоны поверхностного контакта титана и алюминия при высоких температурах превышает длительность латентного периода, то это влечет формирование слоя интерметаллида $TiAl_3$, рост которого определяется скоростью взаимной диффузии атомов свариваемых элементов.

Описание процессов массопереноса осуществлялось в рамках двумерного закона Фика [12], который в случае возможной химической реакции компонентов диффундирующих веществ имеет вид

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_i(x, y, T, c_i) \frac{\partial c_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_i(x, y, T, c_i) \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) - V_i(c_p, c_{TiAl_3}), \quad (5)$$

где c_i — концентрация i -го элемента ($i = Al, Ti$) в момент времени t ; D_i — коэффициент диффузии i -го элемента, mm^2/c ; T — температура рассматриваемой точки сварного соединения, декартовы координаты которой (x, y) , $^\circ C$; $V_i(c_p, c_{TiAl_3})$ — функция объемного источника i -го вещества, $1/c$ (если соотношение алюминия и титана в растворе таково, что существует избыток одного из этих элементов над пределом их взаимной растворимости, то происходит уменьшение концентрации избыточного элемента с появлением соответствующего количества интерметаллида).

Начальными условиями для данной задачи служит исходная концентрация элементов в титановой и алюминиевой части изделия.

В качестве граничного для уравнения (5) принято следующее условие:

$$c_i|_{\infty} = c_i^0, \quad (6)$$

где c_i^0 — начальная концентрация i -го элемента; $c_i|_{\infty}$ — то же, но на значительном расстоянии от области контакта. Для рассматриваемого случая с учетом кратковременности контакта свариваемых металлов при высоких температурах можно считать, что в областях, расположенных на расстоянии 1 мм от плоскости сварного контакта, изменения состава металлов вследствие взаимной диффузии элементов не происходит. Соответственно в этих пределах проводился расчет по уравнению (5) вдоль линии разнородного контакта.

Как известно, коэффициент диффузии D_i зависит от температуры и состава металла в рассматриваемой зоне и его значения приведены в табл. 1. Теплофизические свойства титана и алюминия, используемые в рассматриваемой модели, представлены в табл. 2 [13, 14]:

Как было описано выше, при положении источника сварочного нагрева на расстоянии 3 мм в сторону титановой части соединения у поверхности контакта образуется интерметаллидный слой шириной около 5 мм (см. рис. 5). Решение задач теплопереноса и реакционной диффузии для этого случая дало возможность определить распределение титана, алюминия и интерметаллида $TiAl_3$ в области поверхностного сварного контакта титана и алюминия.

Рис. 6 иллюстрирует распределение интерметаллида $TiAl_3$ в области сварного контакта при расположении источника сварочного нагрева на расстоянии 3 мм в сторону титановой части соединения. Как видно из рисунка, распределение интерметаллидного соединения вдоль поверхности контакта неравномерно: в зоне расположения центра пятна источника нагрева кинетика процессов реакционной диффузии более интенсивна,

Таблица 1. Значения коэффициента диффузии титана в алюминии D_{Ti} [13]

Содержание [Ti], мас. %	$D_{Ti} \cdot 10^9$ (mm^2/c) при $T, ^\circ C$					
	100	200	300	400	500	600
5	0,573	1,320	3,062	7,138	16,699	39,179
25	0,703	1,487	3,206	7,034	15,665	35,332
50	0,866	1,696	3,387	6,905	14,372	30,523
75	1,033	1,904	3,567	6,775	13,079	25,713
95	1,159	2,071	3,711	6,672	12,045	21,866

Таблица 2. Теплофизические свойства титана и алюминия, используемые в математической модели [13, 14]

Теплофизические параметры	Ti	Al
Теплопроводность (при $T = 20...700$ $^\circ C$), $Dж/(^\circ C \cdot cm \cdot c)$	0,118...0,114	2,254...2,500
Теплоемкость (при $T = 20...700$ $^\circ C$), $Dж/(г \cdot ^\circ C)$	0,54...0,69	0,90...1,22

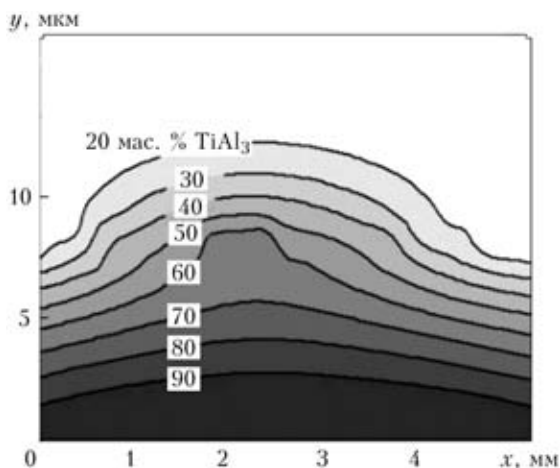


Рис. 6. Распределение интерметаллида $TiAl_3$ по ширине сварного контакта и его глубине

что выражается в существенном увеличении содержания интерметаллида $TiAl_3$, тогда как ближе к периферии оно уменьшается. Интерметаллидный слой растет в сторону алюминиевой части сварного изделия, что объясняется меньшей растворимостью титана в алюминии, чем алюминия в титане, а также стехиометрическим соотношением титана и алюминия в $TiAl_3$.

Выводы

1. В рамках разработанной математической модели термодиффузионных процессов при сварке соединений типа титан–алюминий проанализировано влияние технологических параметров процесса на риск образования хрупкого слоя интерметаллида $TiAl_3$ на границе сварного контакта.

В частности, доказано, что оптимальным является положение центра сварочного пятна на уровне края титановой пластины либо со смещением в сторону алюминиевой пластины, что подтверждено экспериментальными данными.

A mathematical model of the processes of reaction diffusion in overlap welded joints of commercial titanium — aluminium was developed. The degree of the risk of formation of a brittle interlayer of $TiAl_3$ intermetallics was assessed depending on welding process parameters. Data were derived on element distribution in the welded contact zone.

2. Обнаружено, что смещение источника на 3 мм в сторону титановой пластины вызывает формирование охрупчивающего интерметаллидного слоя шириной около 5 мм и толщиной до 15 мкм.

3. Рост интерметаллидного слоя происходит в сторону алюминиевой части сварного изделия и определяется скоростью диффузии титана и его незначительной растворимостью в алюминии.

1. Рабкин Д. М., Рябов В. Р., Гуревич С. М. Сварка разнородных материалов. — Киев: Техніка, 1975. — 206 с.
2. Characterization and properties of dissimilar metal combinations of Fe/Al and Ti/Al-sheet materials / F. Wagner, I. Zerner, M. Kreimeyer et al. // Proc. ICALEO, Sept., 2001, Orlando, Florida, USA. — Orlando: LIA Congress Proc., 2001. — P. 365–374.
3. Beeinflussung der Bildung intermetallischer Phasen beim Laserfuegen von Werkstoffkombinationen durch gezielte Nutzung kurzzeitmetallurgischer Effekte / T. Pretorius, M. Kreimeyer, I. Zerner et al. — Bremen: BIAS-Verlag, 2002. — S. 23–32.
4. Рябов В. Р. Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами. — Киев: Наук. думка, 1983. — 264 с.
5. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / Под ред. В. Н. Замкова. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
6. Еременко В. Н. Титан и его сплавы. — Киев: Изд-во АН УССР, 1960. — 500 с.
7. Алюминий: свойства и металловедение / Под ред. Дж. Е. Хэтча. — М.: Металлургия, 1989. — 422 с.
8. Kreimer M., Vollertsen F. Processing titanium-aluminum hybrid joints for aircraft applications // Proc. of the Third intern. WLT-conf. on lasers in manufacturing, Munich, June, 2005. — Munich, 2005. — P. 238–243.
9. Лариков Л. П., Рябов В. Р., Фальченко В. М. Диффузионные процессы в твердой фазе при сварке. — М.: Машиностроение, 1975. — 140 с.
10. Ланкина Л. В., Коренюк Ю. М. Исследование процессов на границе соединения при нагреве биметалла титан–алюминий // Свароч. пр-во. — 1974. — № 8. — С. 4.
11. Dybkov V. I. Reaction diffusion and solid state chemical kinetics. — Kyiv: IPMS publ., 2002. — 297 p.
12. Кристиан Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. — М.: Мир, 1978. — 541 с.
13. Цвиккер У. Титан и его сплавы. — М.: Металлургия, 1979. — 512 с.
14. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справ. / Под. ред. Б. Е. Неймарка. — М.: Энергия, 1967. — 240 с.

Поступила в редакцию 26.02.2007



ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ Ст3

Академики НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ, В. И. МАХНЕНКО,**
Н. А. ПАЩИН, канд. техн. наук, **В. П. ЛОГИНОВ**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние обработки импульсами тока образцов основного металла и сварных соединений стали Ст3 на формирование в них пластических деформаций при одноосном растяжении. Разработана экспериментальная методика, с помощью которой изучен механизм формирования полос Чернова–Людерса при одноосном растяжении в условиях электродинамического воздействия. Установлено, что при электродинамической обработке сварных соединений стали Ст3 имеет место характерное совместное формирование пластической деформации, зависящее собственно от сварочного процесса и токового воздействия.

Ключевые слова: электродинамическая обработка, пластические деформации, низкоуглеродистая сталь, полосы Чернова–Людерса, одноосное растяжение, остаточное сварочное напряжение, стыковое соединение, плоский образец лопаточного типа

Развитие современной техники вызывает необходимость поиска перспективных подходов к продлению ресурса металлических конструкций. Одним из новых направлений в этой области является создание способов обработки конструкционных материалов и их сварных соединений, базирующихся на воздействии электромагнитного поля на токопроводящие материалы [1], таковой, в частности, является электродинамическая обработка (ЭДО). Путем преобразования электрической энергии импульсов тока в энергию электромагнитного поля, инициирующего в металле деформационные процессы, можно воздействовать на механические свойства конструкционных материалов. При взаимодействии электродинамических сил с внешними нагрузками, приложенными к сварным соединениям обрабатываемого изделия, в швах и околошовной зоне (ОШЗ) могут возникать пластические деформации, влияющие на механические свойства конструкционных материалов.

Одним из факторов, снижающих работоспособность металлических конструкций, является наличие сварочных остаточных напряжений (ОН), которые негативно влияют на прочность и сопротивление усталости сварных соединений. С помощью ЭДО материалов [2] и их сварных соединений [3] в них можно инициировать процессы, которые могут снизить общий уровень напряженного состояния металлических конструкций.

Представленные в работе [3] результаты исследований свидетельствуют, что при воздей-

ствии импульсами тока в металлах и их сварных соединениях возникают местные деформации, значения которых достигают предела текучести материала σ_T . Полученные данные основывались на измерениях относительных деформаций при различных параметрах электроимпульсного воздействия и внешнего нагружения. Экспериментальные методики, реализованные в работах [3, 4], не позволяют визуально исследовать характер протекания процессов пластического деформирования при электродинамическом воздействии. Эффективный способ визуальной оценки распределения полей пластических деформаций в низкоуглеродистых сталях основывается на изучении картин распределения полос Чернова–Людерса (ПЧЛ), формирование которых обусловлено развитием местной текучести, а именно ПЧЛ возникают, когда металл имеет четко выраженный предел текучести, что характерно для низкоуглеродистых сталей. При этом концентрация напряжений способствует появлению и развитию ПЧЛ [5]. Изучение их формирования при ЭДО низкоуглеродистых сталей позволяет выявить закономерности протекания пластического деформирования материала при воздействии импульсами тока.

Целью настоящей работы является изучение закономерностей формирования полей пластических деформаций в сварных соединениях низкоуглеродистых сталей при ЭДО на основе изучения картин распределения ПЧЛ.

Для оценки влияния ЭДО на распределение ПЧЛ использовали образцы лопаточного типа из низкоуглеродистой стали Ст3 толщиной 4 мм, имеющие размер рабочей части 110×30 мм. Предварительно образцы подвергали механической шлифовке. ЭДО осуществляли сериями оди-



ночных импульсов на лабораторной установке, работающих на основе батарей конденсаторов [2]. Разряд батарей передавали посредством касания медным электродом обрабатываемой поверхности, а контактный провод закрепляли у края рабочей части образца. После завершения ЭДО проводили полировку и термообработку поверхности металла, что позволяет получать четкую картину ПЧЛ.

В настоящей работе исследовали распределение ПЧЛ в образцах из низкоуглеродистой стали Ст3 при ЭДО в условиях их продольного растяжения. Из работы [3] известно, что при обработке разрядами тока предварительно растянутых образцов в металле дискретно снижается сопротивление деформированию, которое проявляется в виде характерных сбросов нагружения на диаграмме растяжения σ – ε (здесь σ — растяжение; ε — относительная деформация).

Испытания выполняли на разрывной машине ЦДМ-10 с усилием растяжения до 100 кН при скорости деформирования 6 мм/мин. В течение всего цикла нагружения проводили непрерывную запись изменения растягивающего усилия до момента достижения образцом предела текучести (образования «шейки») или его разрушения. На различных этапах нагружения и обработки импульсами тока фиксировали картины распределения ПЧЛ на поверхности металла. С этой целью образец закрепляли в захватах испытательной машины, растягивали до заданной длины и проводили ЭДО серией импульсов тока с записью изменения деформирующего усилия и картин ПЧЛ. При импульсной обработке образцов стали Ст3 применяли следующие параметры режима ЭДО: максимальное напряжение на электроде $U_3 = 480$ В; максимальный ток на электроде $I_3 = 2500 \dots 3200$ А; длительность импульса $t_{\text{имп}} = 0,00065 \dots 0,00084$ с; емкость батареи конденсаторов $C = 4400$ мкФ.

Параметры режима ЭДО рассчитывали исходя из необходимости создания в заданном объеме материала с пределом текучести σ_T заметных пластических деформаций за счет преобразования электрической энергии в механическую. Так, энергетический разряд конденсаторной батареи мощностью около 1000 Дж создает в образце из низкоуглеродистой стали толщиной 3...4 мм пластические деформации, о наличии которых свидетельствует образование ПЧЛ. Это вполне допустимо с учетом того, что на создание в объеме стали 1 мм³ с пределом текучести σ_T деформации, равной $\sigma \sim K\sigma_T/E$, необходимо, чтобы ее потенциальная энергия составляла [4]

$$A = \frac{\sigma_T^2 \xi^2}{E}, \quad (1)$$

где $K \cong 3 \dots 5$ и $\xi > 1$ — коэффициенты, учитывающие скорости деформирования материала до значений σ_T ; E — модуль упругости материала. Приняв $\sigma_T = 280$ МПа, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $K = 5$, $\xi = 2$, получим $A = 7,84 \cdot 10^{-3}$ Дж/мм³. Соответственно при энергетических затратах в 1000 Дж с учетом коэффициента потерь η при преобразовании электрической энергии в механическую объем V пластического деформирования составляет

$$V = \frac{1000\eta}{A} = 1,27 \cdot 10^3 \eta \text{ [мм}^3\text{]}. \quad (2)$$

При толщине исследуемых образцов $\delta = 4$ мм площадь зон пластического деформирования равна

$$S = \frac{V}{\delta} = 3,2 \cdot 10^4 \eta \text{ [мм}^2\text{]}, \quad (3)$$

а линейные размеры поля пластического деформирования

$$\sqrt{S} = 180\sqrt{\eta} \text{ [мм]}, \quad (4)$$

что при разумных значениях η близко к данным, полученным нами экспериментальным путем.

Формирование картин ПЧЛ исследовали в основном металле и стыковых сварных соединениях. Сварные швы выполняли вручную с использованием покрытых электродов диаметром 4 мм марки АНО-4 на следующем режиме наплавки: напряжение на дуге $U_d = 70$ В; сварочный ток $I_{\text{св}} = 150$ А; скорость сварки $v_{\text{св}} = 5$ м/ч.

На начальном этапе исследования сопоставляли картины ПЧЛ при механическом и электродинамическом воздействии на низкоуглеродистую сталь. Для этого полированные образцы одной серии подвергали статическому нагружению посредством вдавливания шарика (проба Эриксона) [5], а другой — электродинамическому воздействию одиночным разрядом тока на указанном выше режиме (рис. 1). Для обоих видов нагружения характерно локальное приложение нагрузки, т. е. точечный контакт рабочего инструмента (шарика или электрода) с обрабатываемой поверхностью. Кроме того, в обоих случаях имеет место высокая интенсивность импульсного воздействия (механического или электрического), благодаря чему в месте контакта могут возникать зоны местной текучести, т. е. локальные зоны пластических деформаций с высоким градиентом, которые расположены вблизи места контакта рабочего инструмента с поверхностью образца.

Анализируя картины ПЧЛ, представленные на рис. 1, можно видеть, что геометрические характеристики полос при точечном механическом воздействии отличаются от наблюдаемых при ЭДО. ПЧЛ при вдавливании шарика приобретают фор-

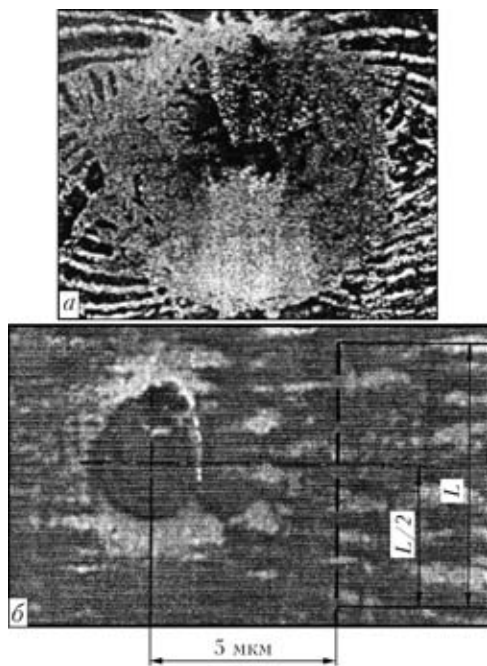


Рис. 1. Картины ПЧЛ, полученных при механическом (проба Эриксона) (а) и электродинамическом (б) воздействиях: штриховая — линия измерения профилограмм полос

му эллипсоида (рис. 1, а), диаметр которого сравним с диаметром отпечатка, что свидетельствует о высокой концентрации зон местной текучести при точечном механическом нагружении низкоуглеродистой стали.

Иная картина распределения полос наблюдается при одиночном импульсном разряде тока (рис. 1, б). В этом случае ПЧЛ представляют собой систему взаимно параллельных полос, расходящихся по обе стороны от контактного пятна. Если при надавливании шарика ПЧЛ концентрируются в зоне отпечатка, то при ЭДО они пересекают все поперечное сечение образца. Различные системы ПЧЛ, образующиеся при сварке и остывании низкоуглеродистой стали, изучены в работах [6, 7], в которых полосы, подобные представленным на рис. 1, б, классифицируются как поперечные. Нами проведены исследования по снятию профилограмм вдоль продольной оси об-

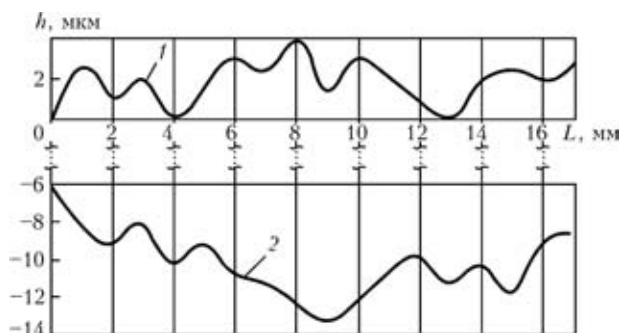


Рис. 2. Профилограммы лицевой (1) и обратной (2) поверхностей образца при ЭДО

разца на его лицевой и обратной поверхностях в зоне импульсного воздействия (контакта электрода). Измерения выполняли до и после ЭДО с использованием специализированной линейки, оснащенной индикаторной головкой с ценой деления 1 мкм. Профилограммы поверхностей образца, являющиеся разностью значений высоты полос h , полученные по показаниям прибора при ЭДО, представлены на рис. 2. Измерения показали, что остаточное формоизменение поверхностей образца в зоне обработки длиной L (рис. 1, б) приобретает характер волн. Волнообразная форма профилограмм обеих сторон образца свидетельствует о том, что осуществляли проработку импульсами тока всего поперечного сечения, а не только поверхности металла.

На первом этапе исследований особенностей формирования полей пластических деформаций при ЭДО плоские шлифованные образцы лопаточного типа из стали Ст3 ступенчато нагружали одноосным растяжением σ (рис. 3). Растяжение образцов до заданной длины выполняли поэтапно с выдержкой 12...15 мин. При этом визуально осматривали полированную поверхность металла и фиксировали появление ПЧЛ. Сопоставив картину ПЧЛ с соответствующим уровнем нагружения, можно заключить, что процесс образования ПЧЛ начинается при $\sigma = 280$ МПа (рис. 3, а) в зонах концентраторов у краев рабочей части образца. Полосы сориентированы под углом 45° к линии

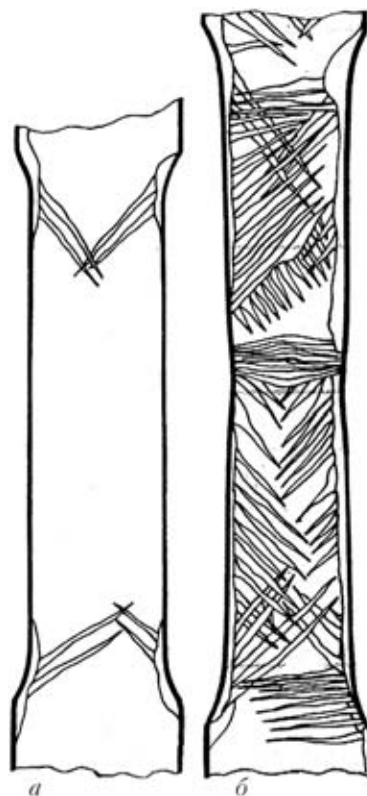


Рис. 3. Типичные картины ПЧЛ, сформировавшихся на образцах из стали Ст3 при одноосном растяжении: а — $\sigma = 290$; б — 320 МПа

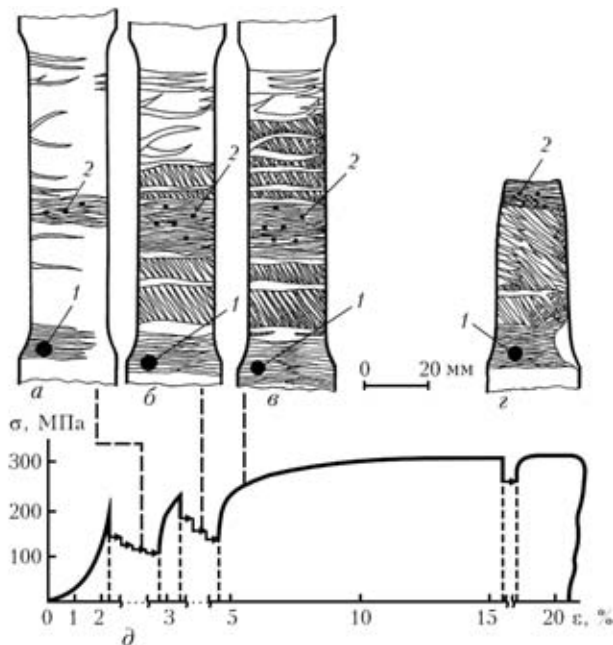


Рис. 4. Картины ПЧЛ, сформировавшихся на образцах из стали Ст3 при ЭДО в условиях одноосного растяжения: *a* — до $\sigma = 190$ МПа после трех импульсов тока; *б* — $\sigma = 230$ МПа после двух импульсов тока; *в* — до $\sigma = 250$ МПа после единичного токового воздействия; *г* — после разрушения; *д* — диаграмма σ - ϵ растяжения образцов из стали Ст3 при сопутствующей ЭДО; 1 — место крепления контактного провода; 2 — зона контакта электрода с образцом при ЭДО

нагрузки. После растяжения до $\sigma > 300$ МПа (образование «шейки») и остановки нагружения (рис. 3, *б*) происходит активное пластическое течение металла по всей рабочей части образца, что характеризуется развитой системой ПЧЛ, ориентированных под различными углами к линии нагрузки. Сопоставив картину ПЧЛ у «шейки» образца, т. е. в зоне активного пластического течения металла, соответствующего предразрушению, с полученными при ЭДО (см. рис. 1, *б*), можно видеть подобие их геометрических характеристик.

При нагружении образцов основного металла с сопутствующей ЭДО процессы формирования полей пластических деформаций начинались при более низких уровнях растяжения по сравнению с вариантом, представленным на рис. 3. Так, при растяжении образца до 190 МПа с последующей ЭДО после трех импульсов тока значения σ уменьшились до 110 МПа, а на полированной поверхности металла образовались поперечные ПЧЛ (рис. 4, *а*). При этом в зонах импульсного воздействия и крепления на образце контактного провода имело место сгущение полос, что свидетельствует об интенсивном пластическом течении металла, локализованном в зонах электрического контакта. Следует отметить, что процесс образования пластических деформаций на образцах из Ст3 без ЭДО начинается при растягивающих нагрузках, в 2 раза больших, чем при обработке импульсами

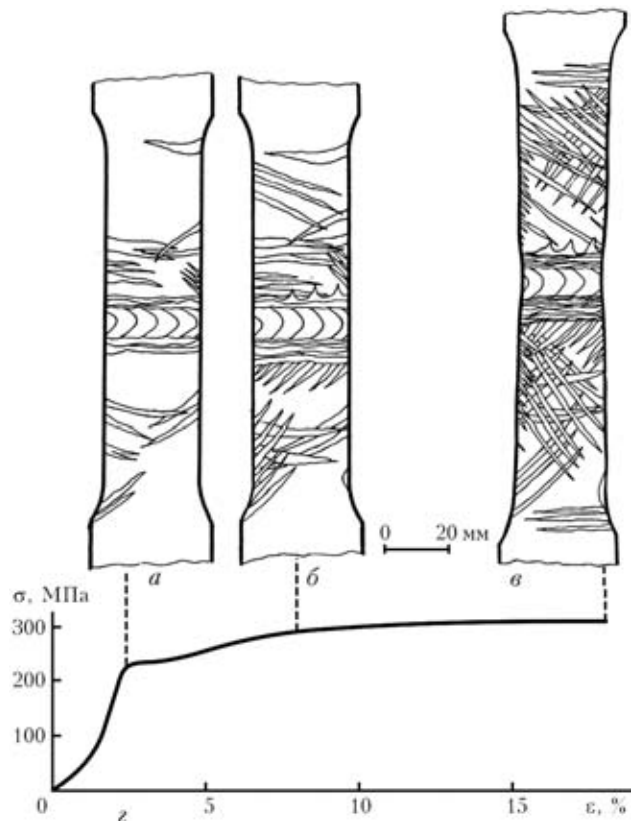


Рис. 5. Типичные картины ПЧЛ, сформировавшихся на поверхности образцов сварных соединений стали Ст3 при одноосном растяжении: *a* — $\sigma = 230$; *б* — $\sigma = 280$ МПа; *в* — область предразрушения (образование «шейки»); *г* — диаграмма σ - ϵ при растяжении образцов из стали Ст3

тока. При повторном нагружении образца до $\sigma = 230$ МПа с последующей ЭДО имеет место падение значений σ до 140 МПа, что сопровождается развитием поперечных ПЧЛ, их сгущением у зоны контакта и появлением наклонных полос, ориентированных под углом 45° к линии нагрузки (рис. 4, *б*). После ЭДО и растяжения образца до $\sigma = 250$ МПа концентрация ПЧЛ увеличивается. При этом наблюдается появление полос с различной ориентацией (рис. 4, *в*). Сравнив ПЧЛ, полученные при $\sigma = 250$ МПа (рис. 4, *в*) с сопутствующей ЭДО и представленные на рис. 3, *а* ($\sigma = 290$ МПа), можно увидеть отличие в их формировании. Если при нагружении без ЭДО до 290 МПа имеет место начальная стадия процесса образования локальных пластических деформаций (рис. 3, *а*), то в случае применения ЭДО уже при $\sigma = 200$ МПа (рис. 4, *в*) происходит развитое пластическое деформирование рабочей части образца, близкое к наблюдаемому при разрушении материала (рис. 4, *г*). Диаграмма растяжения образца σ - ϵ из стали Ст3 при ЭДО представлена на рис. 4, *д*.

Локальное пластическое течение металла при одноосном растяжении образцов сварных соединений (рис. 5, *а*) начинается при $\sigma = 230$ МПа,

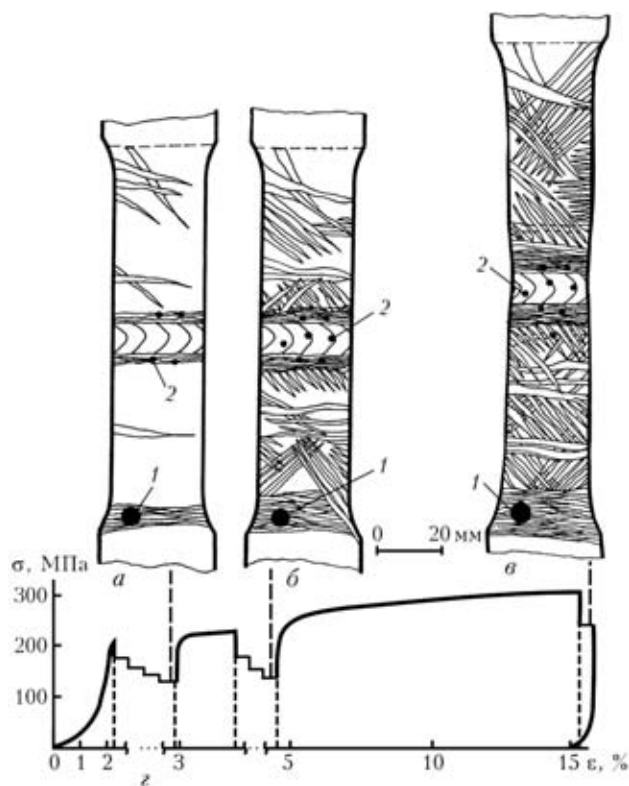


Рис. 6. Картины ПЧЛ, сформировавшихся на образцах сварных соединений стали Ст3 при ЭДО в условиях одноосного растяжения: *а* — $\sigma = 200$ МПа после четырех импульсов тока; *б* — $\sigma = 240$ МПа после трех импульсов тока; *в* — перед разрушением после одиночного импульса тока; *г* — диаграмма σ - ϵ растяжения сварных соединений стали Ст3 при сопутствующей ЭДО; 1, 2 — то же, что и на рис. 4

что на 20 % ниже, чем при нагружении основного металла (см. рис. 3, *а*). При этом процесс формирования ПЧЛ имел более интенсивный характер, а полосы — различную ориентацию по отношению к линии нагрузки. При увеличении значений σ до 270...280 МПа проходило дальнейшее развитие ПЧЛ (рис. 5, *б*), их интенсивность возрастала пропорционально росту нагрузки до образования «шейки» (рис. 5, *в*). При этом характер формирования пластических деформаций близок к имеющему место в образцах основного металла (см. рис. 3, *б*). При воздействии импульсами тока

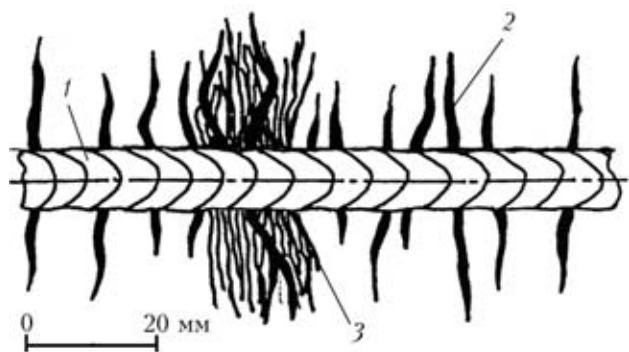


Рис. 7. Картины ПЧЛ, полученных на образцах стыкового соединения стали Ст3: 1 — шов; 2 — прилегающая к шву зона после сварки; 3 — то же + ЭДО

в образцах сварного соединения, в отличие от процессов, отображенных на рис. 5, *а*, начало пластического течения происходило при растяжении образцов в упругой области до 200 МПа и уменьшении упругости до 120 МПа после четырех импульсов тока (рис. 6, *а*). При повторном растяжении до 240 МПа и после трех импульсов тока (рис. 6, *б*) интенсивность формирования ПЧЛ намного выше, чем при тех же уровнях нагрузки, но без ЭДО (см. рис. 5, *б*). При растяжении образца до образования «шейки» и воздействием последующим одиночным импульсом тока насыщенность разнонаправленных полос на поверхности образца при ЭДО выше, чем при растяжении без обработки (соответственно рис. 6, *в* и 5, *в*).

В целом, сопоставив ПЧЛ образцов основного металла и сварных соединений стали Ст3 при ЭДО и без нее, можно выявить ряд особенностей исследуемых вариантов нагружения образцов. Так, образование ПЧЛ при растяжении без ЭДО начинается за пределом упругости стали Ст3, а при воздействии импульсами тока — в упругой области нагружения. При равных значениях σ для вариантов нагружения с применением ЭДО и без нее в случае воздействия импульсами тока интенсивность пластического течения (частота полос) выше. Это видно при сопоставлении рис. 5, *б* и 6, *б*. На стадии предразрушения, т. е. образования «шейки», при ЭДО наблюдается более интенсивное развитие ранее образовавшихся полос по сравнению с растяжением образца без воздействия током (рис. 5, *в* и 6, *в*). Таким образом, получено визуальное подтверждение того факта, что импульсы тока вызывают в сварных соединениях низкоуглеродистой стали образование зон пластического течения. Сочетание пластических деформаций, возникающих в результате ЭДО, с пластическими деформациями от сварки определяет напряженно-деформированное состояние конструкции в целом.

Для подтверждения влияния электродинамического эффекта на изменение напряженного состояния тонколистовых сварных соединений осуществляли ЭДО пластин размером 500×500×3 мм с расположенным по центру продольным стыковым швом. Для выявления ПЧЛ перед сваркой выполняли шлифование поверхности собираемых кромок образца. Ширина шлифованного слоя составляла 40 мм, что соответствует полуширине зоны пластических деформаций стыкового сварного шва.

Наличие продольных ОН определяли неразрушающим ультразвуковым методом, основанным на зависимости скорости распространения ультразвуковых волн от напряжений в металле [7]. Этот способ позволяет анализировать напряженное состояние объекта без нарушения его целостности. Продольные ОН σ_x в пластине определяли



сначала после сварки, затем после ЭДО. Измерения проводили в центральном поперечном сечении образца, а ЭДО выполняли на режиме, описанном выше.

Пластина в момент ЭДО находилась в свободном состоянии, т. е. без приложения статических нагрузок. ЭДО выполняли точечными воздействиями на металл шва по направлению от его середины к краям с шагом 90...100 мм.

На картине ПЧЛ, сформировавшихся после сварки пластины, наблюдали типичные для стыкового шва распределение полос различных систем, в том числе поперечных (рис. 7), развитие которых связано с образованием напряжений, превышающих предел текучести стали Ст3 [6]. После точечного воздействия ЭДО в зоне контакта с поверхностью металла в шве и ОШЗ сформировались локальные области развитых поперечных полос. При этом, если ПЧЛ от сварки равномерно распределены по всей длине шва, то полосы от ЭДО сконцентрированы в местах приложения воздействия импульсов тока.

Результаты измерений продольных ОН σ_x после сварки и последующей ЭДО, представленные в работе [8], свидетельствуют о том, что воздействие импульсами тока вызывает в сварных соединениях стали Ст3 снижение σ_x более чем на 50 %.

Приведенные в настоящей работе данные позволяют заключить, что при ЭДО сварных соединений низкоуглеродистой стали происходит образование локальных зон пластических деформаций высокой интенсивности, влияющих на напряженное состояние тонколистовых металлических конструкций.

Выводы

1. Разработана экспериментальная методика оценки влияния ЭДО на образование пластических деформаций в сварных соединениях стали Ст3 на основе картин ПЧЛ.

2. Установлено, что обработка последовательными импульсами тока при одноосном растя-

жении плоских образцов основного металла и сварных соединений стали Ст3 вызывает в материале падение деформирующего усилия в упругой и пластической областях нагружения, что сопровождается формированием характерных ПЧЛ.

3. Установлено, что при ЭДО в момент разряда батареи конденсаторов в образцах из стали Ст3 происходит быстротекущее преобразование электрической энергии в механическую, вызывающее в материале формирование полей пластических деформаций. Если в низкоуглеродистой стали возникают ОН, то при ЭДО происходит их взаимодействие с напряжениями от обработки по законам механики деформирования сплошных сред.

4. На полномасштабных образцах стыковых сварных соединений стали Ст3 ЭДО шва вызывает в металле шва и ОШЗ формирование местных пластических деформаций в виде поперечных ПЧЛ.

1. *Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы* / Ю. В. Баранов, О. А. Троицкий, Ю. С. Авраамов и др. — М.: МГИУ, 2001. — 844 с.
2. *Влияние электродинамической обработки на напряженно-деформированное состояние теплоустойчивых сталей* / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. Ю. Скульский и др. // Автомат. сварка. — 2006. — № 5. — С. 28–32.
3. *Изменение напряженно-деформированного состояния после электродинамической обработки сварных соединений алюминиевого сплава АМг6* / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов, В. Н. Смиленко // Там же. — 2007. — № 6. — С. 11–13.
4. *Биргер И. А., Мавлютов Р. Р.* Сопротивление материалов. — М.: Наука, 1986. — 560 с.
5. *Бернштейн М. Л., Зеймовский В. А.* Механические свойства металлов. — М.: Металлургия, 1978. — 495 с.
6. *Касаткин Б. С., Царюк А. К., Гедрович А. И.* Полосы текучести в сварном соединении // Автомат. сварка. — 1973. — № 6. — С. 1–4.
7. *Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах* / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорт, О. Н. Гуца и др. — Киев: Наук. думка, 1974. — 108 с.
8. *Влияние электродинамической обработки на напряженное состояние сварных соединений стали Ст3* / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов и др. // Автомат. сварка. — 2007. — № 7. — С. 10–12.

The effect by treatment of specimens of the St3 steel base metal and welded joints with pulses of the electric current on peculiarities of formation of macroplastic strains in the joints subjected to uniaxial tension has been studied. An experimental procedure used to investigate the mechanism of formation of Luders lines in uniaxial tension under the electrodynamic effect conditions has been developed. It is established that the characteristic formation of plastic strains induced by welding and current effect takes place in electrodynamic treatment of welded joints on steel St3.

Поступила в редакцию 14.02.2007



ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ СВАРКИ ВЗРЫВОМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

С. В. КУЗЬМИН, В. И. ЛЫСАК, доктора техн. наук,
С. В. ХАУСТОВ, Т. Ш. СИЛЬЧЕНКО, инженеры (Волгоград. гос. техн. ун-т, РФ)

Рассмотрены принципы расчета и оптимизации параметров сварки взрывом металлических слоистых композитов. В качестве универсального критериального параметра, увязывающего свойства свариваемых материалов и режимы сварки, выбрана энергия пластической деформации металла околошовной зоны при высокоскоростном соударении.

Ключевые слова: сварка взрывом, композиционные материалы, оптимизация режимов, многослойная композиция

При проектировании технологических процессов сварки взрывом двух- и многослойных композитов необходимо подбирать режимы, которые позволяют гарантированно обеспечивать получение требуемых физико-механических свойств соединений и отсутствие в них дефектов. Для этого параметры кинематической группы (v_c , v_k , γ), зависящие от установочных параметров (h , H , C , m_1 , m_2) (рис. 1), должны создавать в зоне соединения такие условия (p , τ , ϵ , T), при которых обеспечивается получение качественного сварного соединения.

Цель настоящей работы — разработка основных принципов расчета режимов сварки взрывом двух- и многослойных металлических композиционных материалов, гарантированно обеспечивающих получение прочного соединения.

К настоящему времени накоплен обширный теоретический и экспериментальный материал и установлены аналитические взаимосвязи между параметрами различных групп. Тем не менее, поставленная задача имеет ряд особенностей, обусловленных в первую очередь выбором универсального критериального параметра, который бы увязывал исходные свойства свариваемых материалов с прочностью получаемого соединения. Основателями гидродинамического подхода [2–4 и др.] в качестве такого критерия предложен критический угол соударения $\gamma_{кр}$, определяющий по сути положение нижней границы свариваемости определенной пары металлов в координатах γ – v_k . При этом для получения равнопрочного соединения необходимо выполнение условия $\gamma > \gamma_{кр}$ при $v_{к.кр} < v_k < c_0$ (здесь γ — динамический угол соединения; $v_{к.кр}$ — критическая скорость контакта; c_0 — скорость звука в металле).

По мнению ряда исследователей [5–8], для любого произвольного сочетания одно- и разнородных материалов существует некоторая критическая скорость соударения $v_{с.кр}$, зависящая от предела текучести и акустической жесткости свариваемых металлов, превышение которых обеспечивает получение прочного соединения.

Эти разные по форме, но схожие по сути критериальные подходы, не принимающие во внимание такие важные параметры, как массовые характеристики или толщина свариваемых элементов, имеют весьма ограниченное практическое применение.

По-видимому, пока единственным универсальным параметром такого рода, имеющим физический смысл, остается энергия W_2 , затрачиваемая



Рис. 1. Феноменологическая модель сварки взрывом двухслойного композита [1]: α_0 — установочный угол между свариваемыми пластинами; C — содержание аммонита в смеси; H — высота заряда ВВ; m_1 и m_2 — единичная масса соответственно метаемой и неподвижной пластин; h — установочный (сварочный) зазор; D — скорость детонации ВВ; v_c и v_k — соответственно скорость соударения и контакта; W_2 — энергия, затрачиваемая на пластическую деформацию металла околошовной зоны (ОШЗ); p , τ , T и ϵ — соответственно давление, время деформирования, температура и степень пластической деформации металла в зоне соединения; $\sigma_{с.с}$ — прочность сварного соединения



на пластическую деформацию металлов. Эта величина, с одной стороны, связывает воедино соударение и массу пластин, а с другой, четко определяет нижнюю границу свариваемости в зависимости от технологической деформируемости (критерия Астрова HB/δ — соотношение твердости металла по Бринеллю к его относительному удлинению) металлов значением критических энергозатрат $W_{2кр}$ [1, 9, 10].

Следует отметить, что наряду с W_2 и $W_{2кр}$ в качестве перспективного критериального параметра может выступать деформирующий импульс I_d [11], значения которого характеризует степень развития пластической деформации металла ОШЗ и полноту протекания активационных процессов на границе соединения. В настоящее время сдерживающим фактором для использования этого параметра является недостаточный объем экспериментального материала для взаимоувязывания $I_{д.кр}$ со свойствами широкого круга конструктивных материалов.

Итак, приняв во внимание изложенное выше, рассмотрим подробно принципиальный алгоритм вычисления режимов процесса для простейшего случая — сварки взрывом биметалла по параллельной схеме.

На первом этапе следует определить скорость точки контакта v_k , которая обычно выбирается из диапазона $(0,4...0,6)c_{0min}$ [12] (где c_{0min} — скорость звука в металле, меньшая из двух для выбранного сочетания). Как правило, v_k составляет 2000...2500 м/с, причем для ряда композиций, область свариваемости которых достаточно узка (титан + сталь, цирконий + сталь, алюминий + сталь, алюминий + медь и др.), следует стремиться к нижней границе диапазона указанных значений.

Следующим важным и ответственным этапом является выбор типа взрывчатого вещества (ВВ), подробный анализ свойств которых приведен в работах [4, 13–19 и др.]. При этом необходимо учитывать несколько обстоятельств. С позиции упрощения технологического процесса (исключением являются операции по смешиванию компонентов ВВ перед сваркой) предпочтительнее применение ВВ, которые выпускаются промышленностью, например, аммонита №6ЖВ, сварочных аммонитов типа А или АТ. Первый из них является достаточно мощным ВВ, и скорость детонации $D > 2500$ м/с реализуется уже в плоских зарядах высотой $H \approx 12...13$ мм, в связи с чем его использование оправдано при плакировании тонкими (до 1,5...2,0 мм) металлическими слоями. Два других типа аммонитов при приемлемых диапазонах скорости детонации (1200...3100 м/с) имеют весьма малый срок хранения, что сказывается на стабильности детонационных характеристик. В этой связи в большинстве случаев для решения практических задач в мировой практике используют свежепри-

готовленные смеси аммонита №6ЖВ (или его аналогов) с аммиачной селитрой, кварцевым песком, поваренной солью, тальком и другими инертными наполнителями. Эти смеси хорошо изучены, а их детонационные характеристики представлены в виде таблиц, графиков или эмпирических зависимостей, используя которые и предварительно задавшись составом смеси, определяют высоту заряда H , обеспечивающую необходимую скорость детонации $D = v_k$. Например, для смеси аммонит №6ЖВ + селитра можно использовать зависимость [1]

$$H = \left(\frac{D}{121,5C^{0,492}} \right)^{3,17} \quad (1)$$

Для выбранной смеси определяют также насыпную плотность $\rho_{ВВ}$, влияющую на скорость соударения и зависящую от состава ВВ. Для смеси аммонита с гранулированной аммиачной селитрой значение этой величины достаточно точно рассчитывают по эмпирической формуле [1]

$$\rho_{ВВ} = -1,43 \cdot 10^{-5} C^2 - 1,22 \cdot 10^{-3} C + 1. \quad (2)$$

Далее для свариваемой пары материалов определяют критическое значение энергозатрат на пластическую деформацию $W_{2кр}$ [9]

$$W_{2кр} = 0,606 + 0,184 \ln(HB/\delta) \text{ [МДж/м}^2\text{]}. \quad (3)$$

При этом из двух полученных значений выбирают меньшее, т. е. соответствующее более мягкому материалу пары, а затем минимально необходимую скорость соударения путем решения известного уравнения — слагаемого энергетического баланса сварки взрывом [20]

$$W_2 = \frac{\rho_1 \delta_1 \rho_2 \delta_2}{2(\rho_1 \delta_1 + \rho_2 \delta_2)} v_c \left[1 - \left(\frac{v_k}{c_0} \right)^2 \right] \quad (4)$$

относительно v_c и полагая $W_2 = W_{2кр}$

$$v_{с.кр} = \sqrt{\frac{2(\rho_1 \delta_1 + \rho_2 \delta_2) W_{2кр}}{\rho_1 \delta_1 \rho_2 \delta_2 [1 - (v_k/c_0)^2]}}, \quad (5)$$

где ρ_1, ρ_2 — плотность материала соответственно метаемой и неподвижной пластин; δ_1, δ_2 — толщина соответственно метаемой и неподвижной пластины пакета.

По сути полученное значение $v_{с.кр}$ определяет положение нижней (критической) границы сварки выбранной пары материалов с заданной толщиной (массой) пластин.

Учитывая то, что для большинства композиций положение верхней (предельной) границы сварки в настоящее время не определено, для оценки предельных энергозатрат $W_{2пр}$ добавляют к $W_{2кр}$ не-



которую величину ΔW_2 . Обычно для таких пар материалов, как сталь + титан, титан + медь, медь + алюминий, алюминий + сталь, алюминий + титан и некоторых других она составляет 0,3...0,5 МДж/м², а для остальных материалов, отличающихся широким диапазоном свариваемости, $\Delta W_2 = 0,8...1,0$ МДж/м².

После подстановки в (5) вместо $W_{2кр}$ значения $W_{2пр} = W_{2кр} + \Delta W_2$ рассчитывают предельную скорость соударения $v_{с.пр}$. При этом любое значение v_c из диапазона

$$v_{с.кр} < v_c < v_{с.пр} \quad (6)$$

должно обеспечивать при сварке образование равнопрочного соединения.

В идеальном случае наилучшими свойствами с точки зрения минимизации структурной и химической неоднородностей будут характеризоваться соединения, полученные при $W_{2кр}$, однако при выборе скорости соударения v_c из диапазона (6) обязательно следует иметь в виду возможные случайные отклонения установочных параметров от расчетных, обусловленные, например, кривизной свариваемых листов, неточностями сборки пакета, неравномерной плотностью ВВ и т. п. Предварительные оценки показали, в частности, что погрешности значений h и H составляют всего 10 % (при зазоре 1 мм — это 0,1 мм) и могут привести к тому, что значения W_2 окажутся меньше критических значений $W_{2кр}$ на 15...20 %. Равнопрочное соединение в этом случае не образуется. Особенно сильное влияние технологических погрешностей проявляется при малых значениях отношения h/H [21]. В связи с этим для повышения надежности процесса сварки изначально в расчеты (5) следует закладывать значение W_2 на 15...20 % больше критического.

Итак, выбрав из диапазона (6) значение v_c , нетрудно рассчитать требуемый сварочный зазор h для одномерной модели метания:

$$h = H \frac{(1 - \theta)^2}{(1 + 2\eta)\theta^2 - 1}; \quad (7)$$

$$\text{где } \theta = \frac{1 + \eta(1 - v_c/D) + \sqrt{\eta^2(1 - v_c/D)^2 - 2\eta v_c/D}}{1 + 2\eta}; \quad (8)$$

$$\eta = \frac{16}{27}r = \frac{16}{27} \frac{H\rho_{ВВ}}{\rho_1\delta_1}, \quad (9)$$

$$h = \frac{0,184H}{r \left[\frac{(\sqrt{k+1} - 1)\pi}{4 \arcsin(\frac{v_c}{2D})} - 1 \right] - 2,71}, \quad (10)$$

где k — показатель политропы продуктов детонации [2, 3].

При этом возможна ситуация, когда подкоренное выражение в (8) окажется отрицательным. Это означает, что выбранное сочетание исходных данных (состав смеси и рассчитанная для значения D высота заряда H) не обеспечивает разгон метаемой пластины до необходимой скорости соударения v_c . В этом случае следует увеличить высоту заряда (по сути η , входящую, в частности, в (8)) с одновременным разбавлением смесового ВВ инертными компонентами для обеспечения постоянства D .

В отличие от определения режимов сварки взрывом двухслойных соединений процедура их расчета для случая многослойных композиций значительно сложнее, что связано в первую очередь с нестационарностью параметров соударения на межслойных границах, а также необходимостью учета начальных участков разгона пакета после каждого i -го акта взаимодействия.

Расчет режимов непосредственно с использованием аналитических зависимостей возможен лишь в одном частном случае, а именно при допущении, что первая метаема пластина перед ее соударением со второй (промежуточной) не ускоряется продуктами детонации (ПД), т. е. остаточное давление ПД $p_{ост} \rightarrow 0$. Такая ситуация может быть реализована при достаточно больших значениях отношения h_1/H (здесь h_1 — зазор на первой межслойной границе свариваемого композита). В этом случае (после определения v_k) для каждой межслойной границы рассчитывают в зависимости от механических свойств свариваемых материалов критические и предельные энергозатраты, а в зависимости от их значений — скорость соударения первого (метаемого) слоя со вторым ($v_{cli}^{кр}$ и $v_{cli}^{пр}$), обеспечивающая выделение на произвольной i -й границе композита энергии W_{2i} , равной соответственно $W_{2икр}$ и $W_{2ипр}$ [1, 10]:

$$v_{cli}^{кр/(пр)} = \sqrt{\frac{2 \sum_{j=1}^{i+1} m_j \sum_{j=1}^i m_j W_{2икр/(пр)}}{m_1^2 m_{i+1} [1 - (v_k/c_{0i})^2]}}, \quad (11)$$

где i — индекс границы соударения [1; $n-1$]; j — индекс слоя [1; n]; m — единичная масса пластины ($\rho\delta$).

Из полученных массивов значений скорости соударения определяют максимальное значение из критических и минимальное из предельных. При этом выполнение условия «энергетической разрешимости» процесса сварки по одновременной схеме плакирования [1, 10]

$$\max(v_{cli}^{кр}) < \min(v_{cli}^{пр}) \quad (12)$$



автоматически означает, что при любом значении скорости соударения на первой границе, входящем в этот диапазон, на каждой межслойной границе композита значение энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию металла, будет превышать критический уровень энергозатрат, необходимых для образования прочного соединения.

Невыполнение же неравенства (12) означает, что при указанных исходных условиях обеспечение равнопрочности на всех границах композита проблематично, поскольку в этом случае реализуется ситуация, когда нижняя граница сварки для некоторого i -го соударения находится выше верхней границы j -го ($i \neq j$). Данную проблему можно решить двумя путями: изменить схему сварки на обратную, выбрав в качестве метаемой (верхней) пластины пакета неподвижную (нижнюю) при общей неизменной очередности слоев в композите, или скорректировать соотношения толщин слоев в пакете.

Первый путь наиболее прост в реализации, но не всегда приемлем, поскольку при изменении последовательности расположения слоев в качестве метаемого может оказаться пластина из наименее пластичного материала, что создаст дополнительные технологические трудности в плане предотвращения ее разрушения при высокоскоростном деформировании.

Улучшение энергетической ситуации в свариваемом пакете по второму пути может быть достигнуто двумя способами: либо повышением $\min(v_{cl}^{np})$ за счет увеличения толщины (массы) $i + 1$ -го слоя, либо снижением $\max(v_{cl}^{kp})$ путем уменьшения толщины $j + 1$ -го слоя композиции (в данном случае i и j — индексы границ пакета соответственно $\min(v_{cl}^{np})$ и $\max(v_{cl}^{kp})$).

По скорректированным значениям $\min^*(v_{cl}^{np})$ или $\max^*(v_{cl}^{kp})$, при которых выполняется условие (12), рассчитывают новые значения единичных масс $i + 1$ -го или $j + 1$ -го слоев [1, 10]:

$$A = \frac{W_{2ikp}}{1 - (v_k/c_{0i})^2}, \quad (13)$$

где

$$A = \frac{W_{2ikp}}{1 - (v_k/c_{0i})^2}; \quad B = \frac{W_{2inpr}}{1 - (v_k/c_{0i})^2}. \quad (14)$$

С их помощью определяют новые значения толщины соответствующих слоев композита, которые и закладывают в дальнейший расчет.

В более сложном случае, когда на поверхность свариваемого пакета после соударения первых двух пластин продолжает действовать остаточное

давление ПД, определение режимов сварки взрывом путем расчета является сложной и многоальтернативной задачей. При этом в отличие от предыдущей рассмотренной ситуации, когда давление ПД заряда к моменту соударения первой (метаемой) пластины со второй стремится к нулю, а скорость соударения на второй и последующих границах (пренебрегая стадией начального разгона) однозначно определяется значением v_{cl} , параметры соударения на каждой межслойной границе тесно связаны между собой. При этом создаваемые условия соударения на некоторой i -й межслойной границе определяется скоростью соударения и стадиями разгона на всех предыдущих. Поясним это на примере простейшего случая сварки трехслойной композиции (рис. 2).

В рассмотренном примере фиксированная скорость соударения на первой границе $v_c = 350$ м/с может быть реализована различными сочетаниями высоты заряда (соответственно и содержание аммонита в смеси C для поддержания постоянной скорости детонации) и сварочного зазора h_1 (рис. 2). При этом в зависимости от фазы разгона метаемой пластины h_1/H на второй границе могут быть достигнуты различные значения максимальной скорости соударения: в рассматриваемом примере — от 290 м/с в случае полного разгона (рис. 2, а) до 450 м/с и более при $h_1/H = 0,034$ (рис. 2, з). Иными словами, если задаться скоростью соударения на второй межслойной границе, то достичь ее в принципе можно путем различных сочетаний параметров установочной подгруппы (H, C, h_1, h_2), т. е. задача имеет множество проектных решений. Аналогично будут выглядеть рассуждения и для большего количества свариваемых по одновременной схеме слоев.

С учетом изложенного выше принципиальный алгоритм расчета установочных параметров представляется следующим образом. На первом этапе, как и для случая сварки биметалла, задаются скоростью детонации ВВ. Имея экспериментальные или расчетные зависимости $D = f(H, C)$ для выбранного типа взрывной смеси, несложно составить двумерную матрицу $2 \times n$ сочетаний H и C , соответствующих заданной D . Из технологических соображений целесообразно применять стандартные смеси (100/0, 90/10, 80/20 и т. п.).

Затем по (11) для каждой межслойной границы определяют диапазон значений критической v_{ci}^{kp} и v_{ci}^{np} предельной скорости соударения, задавшись предварительно значениями $H\delta/\delta$ для материала каждого слоя свариваемого пакета.

На следующем этапе для каждого сочетания H и C составленной ранее матрицы рассчитывают значения зазоров на первой границе, обеспечи-

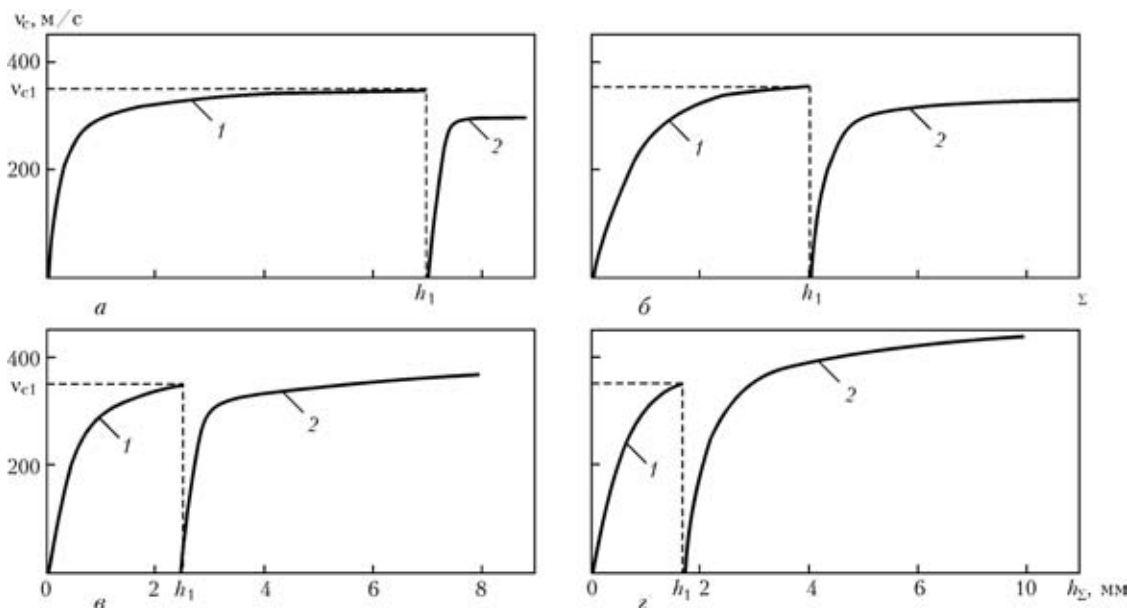


Рис. 2. Влияние фазы разгона метаемой пластины на скорость соударения на второй межслойной границе трехслойного пакета ($\rho_1 \delta_1 = 27 \text{ г/см}^2$; $\rho_2 \delta_2 = 5,4 \text{ г/см}^2$, $v_k = 2500 \text{ м/с}$) при $H = 25$ (а), 30 (б), 35 (в) и 50 (г) мм: 1, 2 — кривые разгона соответственно метаемой пластины и пакета из двух сваренных пластин

вающие реализацию на ней соответственно $v_{cl}^{кр}$ и $v_{cl}^{пр}$, определяя таким образом области допустимых значений H , C и h_1 (рис. 3). Так, для ситуации, представленной на рис. 3, приемлемыми являются смесь аммонита №6ЖВ (не более 40 об. %) с гранулированной аммиачной селитрой; для смесей 25/75, 33/67 и 40/60 критический установочный зазор на первой межслойной границе (в данном случае — между титаном $\delta = 5 \text{ мм}$ и алюминием $\delta = 2 \text{ мм}$), при котором достигается скорость соударения, соответствующая критическим энергозатратам, составляет соответственно $h_{1кр} = 3,0$; $= 4,5$ и $10,2 \text{ мм}$.

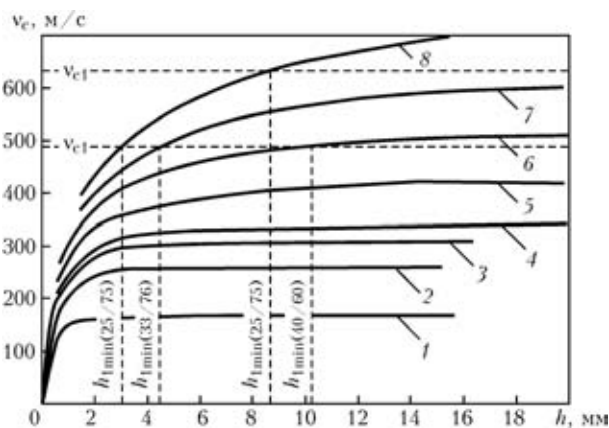


Рис. 3. Пример определения с помощью расчетов допустимых диапазонов установочных зазоров на первой границе h_1 для приемлемых составов взрывчатой смеси аммонит №6ЖВ/гранулированная аммиачная селитра (об. %) при сварке взрывом композиции титан ($\delta_1 = 5 \text{ мм}$) + алюминий ($\delta_2 = 2,0 \text{ мм}$) + АМг6: 1 — смесь 100/0; 2 — 75/25; 3 — 67/33; 4 — 60/40; 5 — 50/50; 6 — 40/60; 7 — 33/67; 8 — 25/75

Предельное же значения $h_{1пр}$, соответствующее предельным энергозатратам $W_{2пр}$ при соударении первых двух слоев, для смеси 25/75 составляет 8,7 мм (рис. 3). Для более насыщенных смесей (33/67 и 40/60 в рассматриваемом примере) рассчитать ее невозможно, поскольку метаемая пластина выходит на пологий участок разгона, и дальнейшее неограниченное увеличение h_1 не приводит к заметному росту v_{cl} . Обычно на практике из технологических соображений ограничивают установочный зазор значением 15 мм, которое и принимается в рассмотренном примере за $h_{1пр}$ для смесей 33/67 и 40/60.

Далее по методике, изложенной работе в [22], строят кривые разгона пластин пакета для второй межслойной границы $v_{c2} = f(h_2)$, используя ограниченный массив значений H , C и h_1 , полученный на предыдущем этапе расчета. Из построенных кривых разгона для дальнейшего рассмотрения оставляют лишь те, которые удовлетворяют условию (6), определяя для каждой из них соответствующие $h_{2кр}$ и $h_{2пр}$. Данные операции повторяются для последующих межслойных границ свариваемого композита.

В результате расчета по изложенному алгоритму может получиться либо множество проектных решений, либо ни одного. В первом случае из полученного массива режимов сварки технолог-разработчик, основываясь на своем опыте и квалификации, а также технологических возможностях, выбирает какой-то один. Во втором — необходимо произвести корректировку исходных условий, например, изменить сочетание толщин в композиции или перейти к последовательному плакированию.

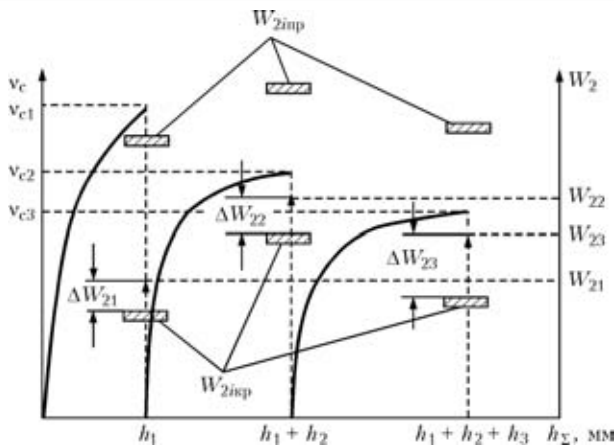


Рис. 4. Физическая модель оптимизации параметров сварки взрывом многослойных композитов [1, 10]: $v_{c1}-v_{c3}$, $W_{21}-W_{23}$ — соответственно скорость соударения и энергозатраты на пластическую деформацию металла на 1–3-й межслойных границах; W_{2ikp} и W_{2ipr} — соответственно критические и предельные энергозатраты на i -й границе; $\Delta W_{21}-\Delta W_{23}$ — разность реальных и критических энергозатрат на 1–3-й границах композита

С целью выявления из множества полученных проектных решений наилучшего следует провести оптимизацию режимов, т. е. отыскать в пространстве проектных параметров (с учетом действующих ограничений) решения, реализация которых позволит получить многослойный композит с оптимальными свойствами — максимально возможная прочность при минимальных структурной и химической неоднородностях. При оптимизации задача поиска сложной совокупности большого числа параметров исследуемого процесса в условиях существенной его нестационарности сводится к минимизации целевой функции $M(\bar{X})$. Построение алгоритмической модели данной задачи большой размерности с установленными ограничениями основывается на требовании обеспечения при каждом i -м соударении в многослойном пакете энерговложений, достаточных для образования на этой границе прочного сварного соединения.

Наиболее целесообразно организованным режимом послойного соударения в слоистых композиционных материалах, при котором энерговложение W_{2i} , реализуемое на всех границах композита, будет максимально приближено к критическим энергозатратам W_{2ikp} , характерным для этих границ (рис. 4). Очевидно, что при таких условиях энерговложения в систему соударяющихся пластин будут минимальными, что, с одной стороны, максимально уменьшает вероятность развития на межслойных границах структурной и химической неоднородностей, а, с другой, снижает расход ВВ. В такой постановке задача оптимизации сводится к отысканию минимума целевой функции $M(\bar{X})$, являющейся суммой разностей реальных и критических энергозатрат на каждой i -й границе композита:

$$M(\bar{X}) = \sum_{i=1}^{n-1} (W_{2i} - W_{2ikp}) = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta W_{2i} \rightarrow \min \quad (15)$$

при ограничениях

$$W_{2ikp} < W_{2i} < W_{2ipr} \quad (16)$$

В качестве проектных параметров $\bar{X}$ удобно принять основные технологические (установочные) h_i , H и C , в зависимости от которых на каждом этапе оптимизации в соответствии с компьютерной моделью, включающей феноменологическую и кинематическую модели, а также математический аппарат расчета параметров, определяется значение $M(\bar{X})$.

С учетом производительности современной компьютерной техники для оптимизации может быть успешно применен метод случайного поиска в n -мерном пространстве проектных параметров, являющийся разновидностью метода Монте-Карло [23]. При этом на каждом этапе оптимизации с помощью генератора случайных чисел произвольно выбирается совокупность параметров: h_i и H , по которым ведется расчет кинематических и энергетических параметров процесса, а также подсчитывается значение целевой функции $M(\bar{X})$. Первое рассчитанное значение $M(\bar{X})$ выбирается в качестве критерия минимизации M , а при последующих итерациях текущее значение целевой функции сравнивается с M . Если полученное новое значение $M(\bar{X}) < M$, то происходит переименование $M = M(\bar{X})$, иначе текущий рассчитанный вариант отсеивается. Таким образом пошагово происходит улучшение целевой функции. При достаточно большом количестве итераций, исчисляющемся сотнями тысяч, можно считать, что будет получено проектное решение, близкое к глобальному оптимуму.

Следует отметить, что перед процедурой оптимизации на пространство проектных параметров накладывается ряд ограничений, например, по критической и предельной высоте зарядов ВВ, минимально и максимально допустимым сварочным зазорам и ряду других параметров, что значительно сокращает время расчета и количество итераций.

Таким образом, рассмотренные принципы расчета и оптимизации параметров сварки взрывом слоистых композитов материалов, базирующиеся на применении энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию металла ОШЗ при высокоскоростном соударении, в качестве универсального критериального параметра, увязывающего свойства свариваемых материалов и режимы сварки, служат теоретической основой для создания компьютерной модели исследуемого про-



цесса и соответствующих программных средств, позволяющих существенно уменьшить затраты на проектирование технологических процессов изготовления композиционных материалов с гарантированным качеством соединения составляющих слоев.

1. Лысак В. И., Кузьмин С. В. Сварка взрывом. — М.: Машиностроение, 2005. — 544 с.
2. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1980. — 220 с.
3. Определение параметров соударения плоских тел, металлических ВВ, в условиях сварки взрывом / А. А. Дерибас, В. М. Кудинов, Ф. И. Матвеев, В. А. Симонов // Физ. горения и взрыва. — 1967. — 3, № 2. — С. 291–298.
4. Захаренко И. Д. Сварка металлов взрывом. — Минск: Наука и техника, 1990. — 205 с.
5. Соннов А. П. Влияние исходной прочности соединяемых металлов на режимы их сварки взрывом // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: ВолгПИ, 1989. — С. 3–7.
6. Седых В. С., Соннов А. П. Определение «нижней границы свариваемости» металлов при сварке взрывом // Там же. — Волгоград: ВолгГТУ, 1995. — С. 63–66.
7. Роман О. В., Смирнов Г. В., Ушеренко С. М. Динамика высокоскоростной деформации и кумулятивные эффекты при сварке металлов взрывом // Там же. — Волгоград: ВолгГТУ, 1998. — С. 51–64.
8. Смелянский В. Я., Рыскулов М. Т., Кожевников В. Е. К вопросу о расчете режимов сварки взрывом разнородных металлов // Там же. — Волгоград: ВолгПИ, 1986. — С. 54–62.
9. Лысак В. И., Седых В. С., Трыков Ю. П. Определение критических границ процесса сварки взрывом // Свароч. пр-во. — 1973. — № 5. — С. 6–8.
10. Lysak V. I., Kuzmin S. V. Explosive welding of metal layered composite materials. — Kiev: E. O. Paton Electric Welding Institute, 2003. — 117 p.
11. Кузьмин С. В., Чувичилов В. А., Лысак В. И. Временные условия формирования соединения при сварке взрывом // Перспектив. материалы. — 2005. — № 1. — С. 85–91.
12. Седых В. С. Классификация, оценка и связь основных параметров сварки взрывом // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: ВолгПИ, 1985. — С. 3–30.
13. Высокоскоростная деформация металлов / В. И. Беляев, В. Н. Ковалевский, Г. В. Смирнов, В. А. Чекан. — Минск: Наука и техника, 1976. — 224 с.
14. Комплексное исследование основных характеристик смесей аммонита №6ЖВ с кварцевым песком применительно к сварке взрывом / А. Д. Бабков, Ю. П. Бесшапошников, В. Е. Кожевников и др. // Физ. горения и взрыва. — 1992. — № 2. — С. 107–108.
15. Лысак В. И., Шморгул В. Г. Детонационные характеристики смесевых ВВ для сварки на основе аммонит №6ЖВ+наполнитель // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: ВолгПИ, 1987. — С. 105–114.
16. Сварка крупногабаритных биметаллических листов с использованием сварочных аммонитов типа АТ / А. В. Крупин, В. Я. Соловьев, А. Г. Кобелев и др. // Тр. Всесоюз. межвуз. науч. конф. по обработке металлов взрывом, г. Москва, 9–12 сент. 1980 г. — М.: МИСИС, 1980. — С. 79–81.
17. Аммониты для сварочных работ / Л. В. Дубнов, Н. С. Бухаревич, А. И. Романов // Физико-хим. и взрывные процессы в машиностроении: Тр. МВТУ — М., 1973. — № 168. — С. 164–169.
18. Лиуткин С. Н., Симонов В. А. Особенности детонации плоских зарядов смесевых ВВ // Тр. 4-го Междунар. симп. по применению энергии взрыва для производства металлических материалов с новыми свойствами, ЧССР, Готвальдов, 1–4 окт. 1970 г. — Готвальдов, 1979. — С. 386–397.
19. Дубнов Л. В., Бухаревич Н. С., Романов А. И. Промышленные взрывчатые вещества. — М.: Недра, 1988. — 358 с.
20. Седых В. С., Соннов А. П. Расчет энергетического баланса процесса сварки взрывом // Физ. и химия обраб. материалов. — 1970. — № 2. — С. 6–13.
21. Лысак В. И., Седых В. С., Трыков Ю. П. Об оценке факторов, определяющих надежность процесса сварки взрывом // Свароч. пр-во. — 1979. — № 3. — С. 3–6.
22. Расчет параметров соударения при сварке многослойных композиций / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, В. П. Багмутов, Т. Ш. Сильченко // Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. — 2004. — № 6, вып. 1(13). — С. 28–34.
23. Соболев А. Г., Тимохов А. В., Федоров В. В. Курс методов оптимизации. — М.: Наука, 1986. — 328 с.

The principles of calculation and optimization of the process of explosion welding of laminated metal composites are considered. The energy of plastic deformation of HAZ metal at high-speed collision was selected as a versatile criterial parameter correlating the properties of the materials being welded and welding modes.

Поступила в редакцию 16.10.2006,
в окончательном варианте 19.10.2006



ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОЙ СТРУКТУРЫ И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОШКА НА СТРУКТУРУ МЕТАЛЛА 10P6M5, НАПЛАВЛЕННОГО ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВЫМ СПОСОБОМ

И. А. РЯБЦЕВ, Е. Ф. ПЕРЕПЛЕТЧИКОВ, И. В. МИЦ, кандидаты техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
И. А. БАРТЕНЕВ, канд. техн. наук (Политехн. ин-т, г. Караганда, Казахстан)

Исследовано влияние исходной структуры и гранулометрического состава присадочного порошка ПГ-10P6M5 на структурное состояние наплавленного металла, полученного плазменно-порошковой наплавкой с применением указанного порошка. Показано, что при наплавке прослеживается эффект наследования наплавленным металлом структуры порошка ПГ-10P6M5: чем больше в нем содержание α -фазы, тем больше ее в наплавленном металле при соответствующем уменьшении содержания γ -фазы.

Ключевые слова: плазменно-порошковая наплавка, быстрорежущая сталь, присадочный порошок, микроструктура, гранулометрический состав, наплавленный металл, структурная наследственность

Структурная наследственность в системе наплавочный материал–сварочная ванна–наплавленный металл может оказывать двойственное влияние на свойства наплавленного металла [1]. Благодаря структурной наследственности можно от наплавочных материалов передавать наплавленному металлу такие положительные качества, как мелкозернистость структуры, равномерное распределение упрочняющей фазы (карбидов, карбонитридов, боридов, карбоборидов), определенную направленность дендритов и пр. В то же время при наплавке проявляется и отрицательная сторона структурной наследственности: вредные примеси и неметаллические включения из наплавочных материалов могут переходить в наплавленный металл и ухудшать его структуру и свойства.

В наибольшей степени влияние структурной наследственности проявляется при тех способах наплавки, в которых наплавочные материалы не являются токоведущими и отсутствует жесткая связь между током дуги и производительностью расплавления наплавочного материала. Одним из таких способов является плазменно-порошковая наплавка. Значительная неравномерность нагрева порошка (дискретных частиц) в плазменной дуге и возможность поступления в сварочную ванну нерасплавившихся частиц порошка должны влиять на ее размеры, массу и температуру [2, 3], а также на характер кристаллизации, структуру и эксплуатационные свойства наплавленного металла.

Структурной наследственностью можно управлять путем изменения состава, структуры и формы наплавочных материалов, а также теплового, кинетического и шлакового (в тех способах наплавки, где используется флюс) режимов наплавки.

Цель настоящей работы — исследовать влияние присадочного порошка ПГ-10P6M5 различных фракций на структуру наплавленного металла, полученного плазменно-порошковым способом наплавки. Для исследований выбран порошок ПГ-10P6M5 как один из наиболее распространенных материалов, применяемых при плазменной наплавке порошков на железной основе.

В зависимости от конструкции плазматрона для наплавки применяют присадочные порошки с размером частиц 40...315 мкм (реже до 400 мкм), получаемые, как правило, путем распыления жидкого металла инертным газом или водой.

Исследована структура порошка ПГ-10P6M5 фракции минимального 40...50 (рис. 1) и максимального 250...315 мкм (рис. 2) размеров. Установлено, что фракция порошка 40...50 мкм, которая кристаллизуется с большей скоростью, имеет очень мелкую структуру и с трудом идентифицируется даже при увеличении 2000 (рис. 1, а). При таком увеличении в структуре порошка видны дендриты, ориентированные в основном к центру частицы порошка, и эвтектическая составляющая по границам зерен.

Структура порошка ПГ-10P6M5 фракции 200...315 мкм отличается от предыдущей более крупными разориентированными зернами (рис. 2, б) и по своему характеру приближается к структуре литой быстрорежущей стали 10P6M5 [4]. При

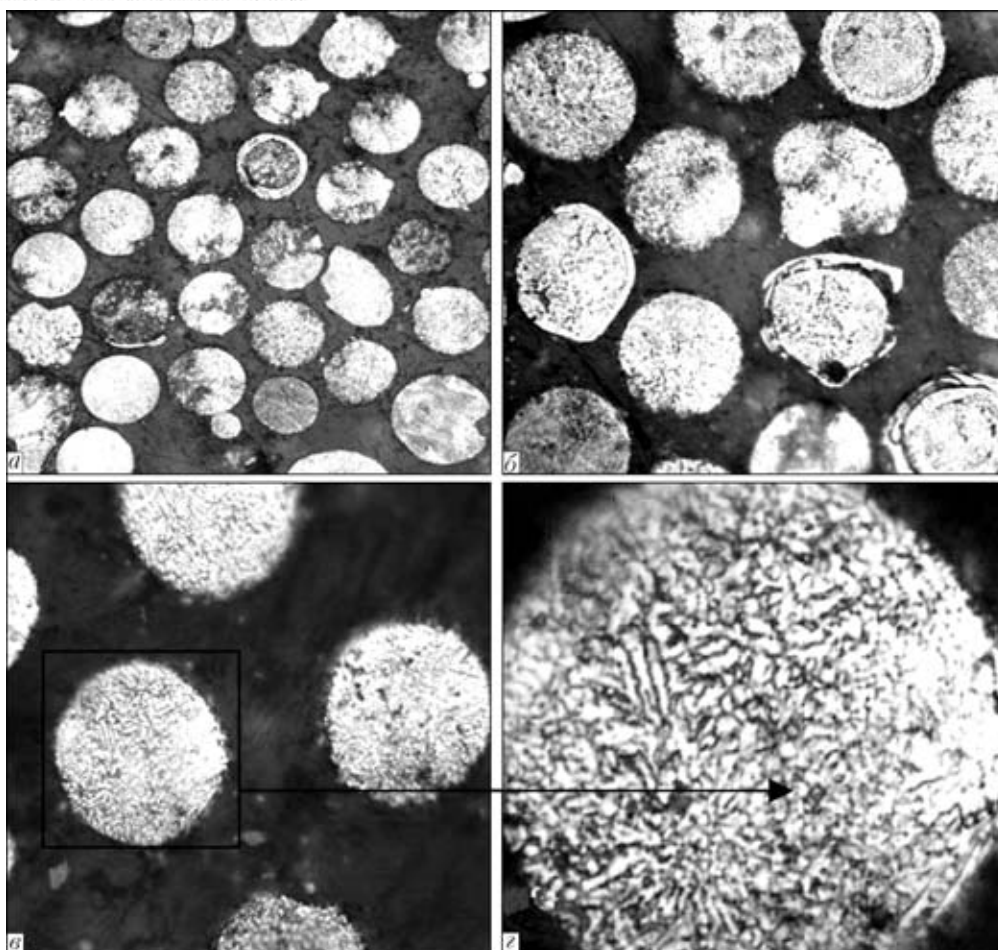


Рис. 1. Микроструктура частиц порошка ПГ-10Р6М5 диаметром 50 мкм: а — $\times 200$; б — $\times 400$; в — $\times 630$; г — $\times 2000$ (травление в растворе $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$ + глицерин)

Т а б л и ц а 1. Результаты рентгеноструктурного анализа порошка ПГ-10Р6М5 различных фракций и наплавленного металла, полученного с использованием этого порошка*

Исследуемый материал	Фракция, мкм	Фазовый состав, мас. % (а, нм)		Содержание карбидов Mo_2C , мас. % (а; с, нм)
		α -фаза	γ -фаза	
Порошок ПГ-10Р6М5	40...50	40,12 (0,2885)	59,88 (0,3626)	—
Наплавленный металл — сталь 10Р6М5	40...50	51,57 (0,2882)	43,36 (0,3610)	5,07 (0,2939; 0,4645)
Порошок ПГ-10Р6М5	250...315	55,14 (0,2897)	44,86 (0,3624)	—
Наплавленный металл — сталь 10Р6М5	250...315	62,83 (0,2892)	34,45 (0,3623)	2,72 (0,2959; 0,4665)

Примечание. а и с — параметры решетки.

большом увеличении (рис. 2, в) по границам зерен наблюдаются выделения эвтектической составляющей, а внутри зерен — мартенситные иглы и остаточный аустенит.

Для определения фазового состава проведен рентгеноструктурный анализ порошка ПГ-10Р6М5 различных фракций и металла, полученного плазменно-порошковой наплавкой с использованием указанного порошка (табл. 1). Если в структуре порошка мелкой фракции превалирует γ -фаза

(59,88 %), то в порошках крупной фракции, наоборот, содержится больше α -фазы (55,14 %), состоящей из мартенсита и феррита. В структуре порошка обеих фракций отсутствуют карбидные включения. Преимущество структуры порошка наплавленным металлом иллюстрирует рис. 3, где приведены рентгенограммы порошка фракции 40...50 мкм и металла, наплавленного этим порошком.

В наплавленном металле увеличивается содержание α -фазы, но поскольку ее содержание выше в порошке крупной фракции, то соответственно и в наплавленном металле, полученном с приме-

* Рентгеноструктурные исследования выполнены канд. техн. наук М. В. Карпецом (ИПМ им. Францевича НАН Украины) и инж. Л. Т. Еремеевой (ИЭС им. Е. О. Патона).

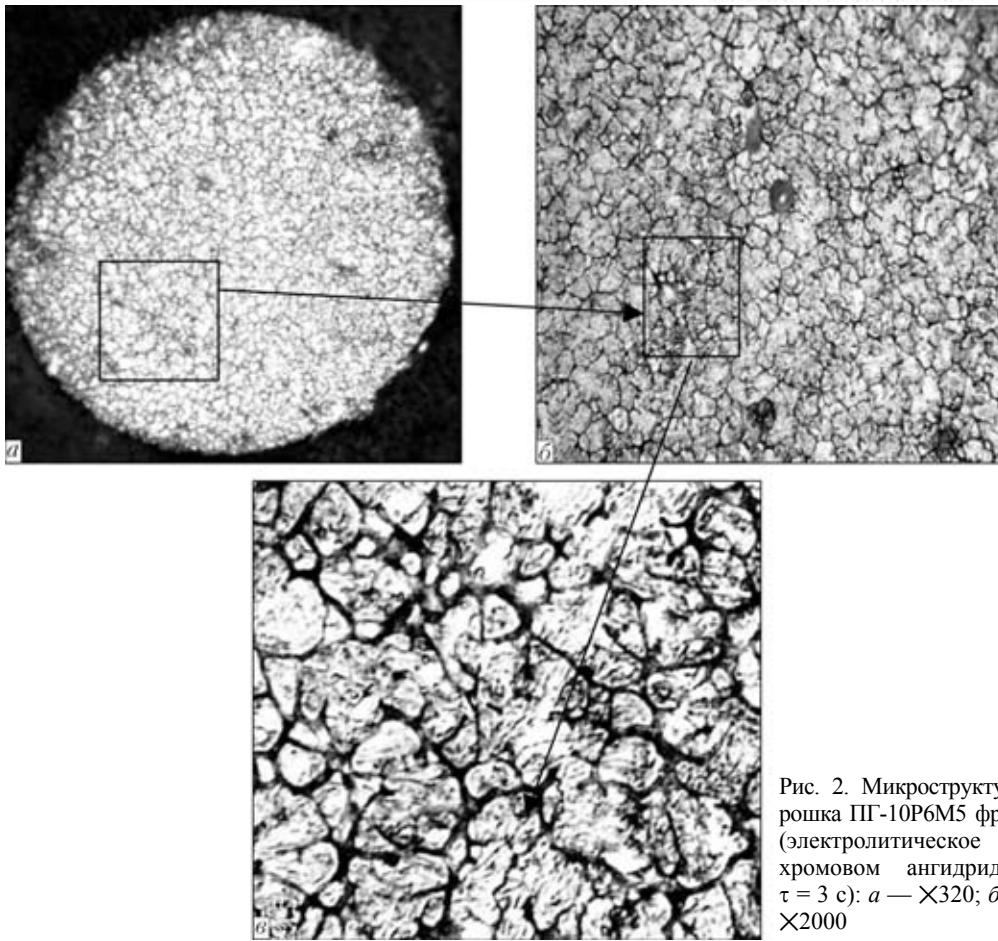


Рис. 2. Микроструктура частиц порошка ПГ-10Р6М5 фракции 200 мкм (электролитическое травление в хромовом ангидриде, $U = 7$ В, $\tau = 3$ с): а — $\times 320$; б — $\times 800$; в — $\times 2000$

нением этого порошка, содержание α -фазы также повышается, появляются карбидные включения и их количество также разное: больше карбидных включений в наплавленном металле, полученном с применением порошка мелких фракций.

Если исходить из содержания α - и γ -фазы, то при плазменно-порошковой наплавке прослеживается определенное наследование структуры порошка наплавленным металлом: чем больше α -фазы в порошке, тем больше ее в наплавленном металле, аналогично в нем уменьшается содержание γ -фазы.

Количество порошка, которое может подаваться в плазменную дугу и расплавляться в ней и сварочной ванне, хотя и зависит от режима наплавки, но не напрямую, как, например, при дуговой наплавке плавящимся электродом. Проведены эксперименты по оценке влияния режима плазменной наплавки на плавление присадочного порошка быстрорежущей стали ПГ-10Р6М5 различного фракционного состава, которые показали, что увеличение доли крупных фракций в присадочном порошке вызывает необходимость повышения тока наплавки (рис. 4). Кривая I на этом рисунке получена для порошков следующих фракций: 40...63 мкм (средний диаметр частиц $d_{cp} = 50$ мкм); 80...125 мкм ($d_{cp} = 100$ мкм); 125...160 мкм ($d_{cp} = 140$ мкм); 160...200 мкм

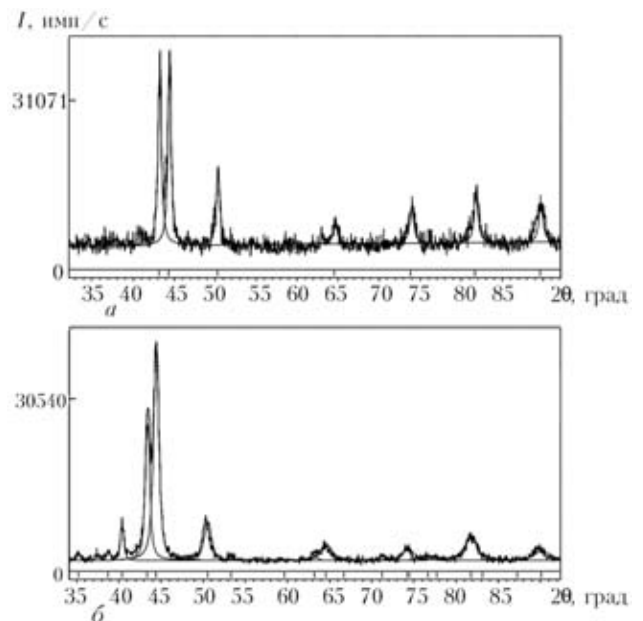


Рис. 3. Зависимость интенсивности I рентгеновского излучения от угла отражения линий θ , характерных для указанных структурных фаз в порошке ПГ-10Р6М5 (фракция частиц 40...50 мкм) (а) и металле, полученном плазменно-порошковой наплавкой с применением указанного порошка (б)

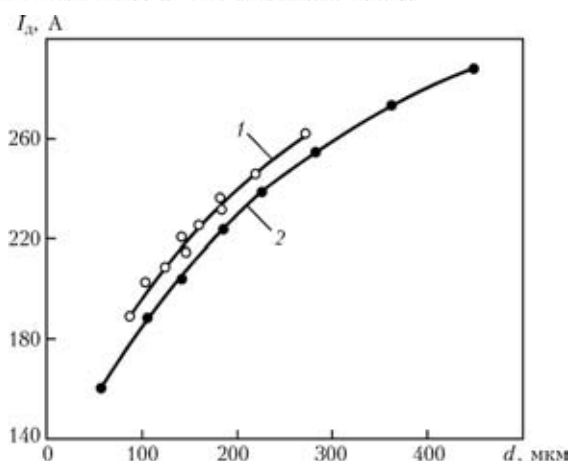


Рис. 4. Зависимость тока дуги I_d плазменно-порошковой наплавки от диаметра d расплавляемых в дуге частиц порошка: 1, 2 — см. в тексте

($d_{cp} = 180$ мкм); 200...250 мкм ($d_{cp} = 225$ мкм); 250...315 мкм ($d_{cp} = 280$ мкм); 315...400 мкм ($d_{cp} = 360$ мкм). Кривая 2 соответствует смеси порошков различных фракций — мелкой ($d_{cp} = 100$ мкм) и крупной ($d_{cp} = 280$ мкм) фракций, взятых в различном соотношении.

Порошки крупных фракций ($d_{cp} \geq 360$ мкм) использовать нежелательно, поскольку для их полного расплавления необходим ток дуги $I_d > 400$ А, при котором происходит излишнее проплавление основного металла, что отрицательно сказывается на свойствах наплавленного металла. В случае использования порошков крупных фракций при недостаточно большом токе в наплавленном металле могут оставаться нерасплавившиеся частицы.

Для смесей порошков с гранулометрическим составом широкого диапазона для полного расплавления всего порошка требуется значительно больший ток дуги, чем для порошков с узким диапазоном гранулометрического состава (кривая 2, рис. 4).

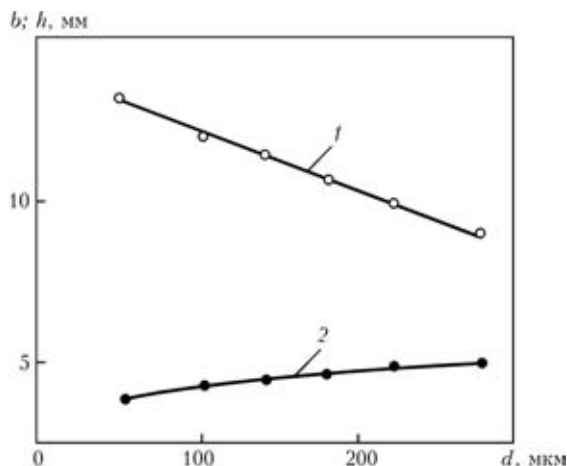


Рис. 5. Влияние гранулометрического состава порошка на ширину b (1) и высоту h (2) наплавленного валика

Выполнена экспериментальная оценка влияния гранулометрического состава порошка на форму наплавляемого валика (рис. 5) при режиме наплавки: ток дуги 240 А; скорость наплавки 12 м/ч; скорость подачи порошка 4,2 кг/ч. С увеличением размеров частиц порошка при одном и том же токе дуги ширина валика уменьшается, а его высота увеличивается, т. е. валик получается узким и высоким, что нежелательно для наплавки.

Для исследования влияния гранулометрического состава порошка на структуру наплавленного металла выполнена плазменная наплавка образцов из быстрорежущей стали порошком ПГ-10Р6М5 (скорость наплавки 12 м/ч, скорость подачи порошка 4,2 кг/ч). Присадочный порошок состоит из смеси мелких (40...125 мкм) и более крупных фракций, взятых в различном соотношении (табл. 2).

Добавка к мелкозернистому порошку 15 % порошка более крупных фракций особых изменений в его структуре не вызывает (рис. 6, а). При содержании крупных фракций 200...250 или 315...400 мкм около 30 % (поз. 3 и 6 табл. 2)

Т а б л и ц а 2. Влияние добавок крупных фракций порошка на структуру металла наплавленных валиков (основная фракция — 40...125 мкм)

№ п/п	Массовая доля добавки (%) с фракцией		I_d , А	Характерные особенности структуры
	200...250 мкм	315...400 мкм		
1	—	—	205...210	Дендриты разной длины, ориентированные в одном направлении
2	15	—	210...215	То же
3	30	—	215...220	Разориентированные мелкие дендриты и тонкая сетка карбидов по границам зерен
4	45	—	220...225	Небольшие и крупные дендриты, ориентированные к центру кристаллизации
5	—	15	215...220	Дендриты разной длины, ориентированные в одном направлении
6	—	30	220...225	Разориентированные мелкие дендриты и тонкая сетка карбидов по границам зерен
7	—	45	225...230	Небольшие и крупные дендриты, ориентированные к центру кристаллизации

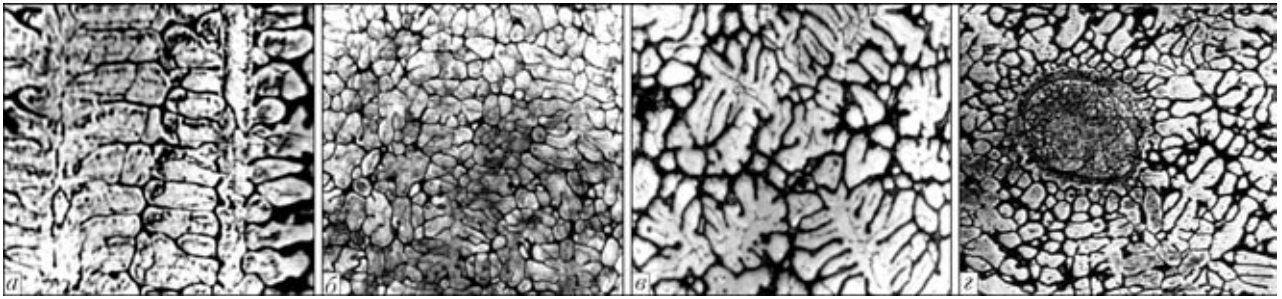


Рис. 6. Микроструктура наплавленного металла 10P6M5 ($\times 400$), полученная при введении порошка крупных фракций в мелкий присадочный порошок: а — смесь № 2; б — № 3; в — № 4 (см. табл. 2); з — нерасплавившееся включение

структура наплавленного металла заметно измельчается, а карбидная сетка становится достаточно тонкой (рис. 6, б).

При дальнейшем увеличении содержания указанных фракций до 45 % сохраняется в основном разориентированный характер структуры порошка, но появляются более крупные дендриты, растущие к центрам кристаллизации, в качестве последних выступают крупные частицы порошка, которые окончательно расплавляются в сварочной ванне (рис. 6, в). Если такие частицы не успевают полностью расплавиться, то они также выступают в качестве центров кристаллизации (рис. 6, з).

Характер влияния на структуру наплавленного металла обеих крупных фракций порошка примерно одинаковый. Однако при большом (≥ 45 мас. %) содержании фракции 315...400 мкм в структуре наплавленного металла значительно чаще остаются нерасплавленные частицы порошка.

Таким образом, проведенные металлографические исследования показали, что при плазменно-порошковой наплавке крупные частицы присадочного порошка могут стать дополнительными центрами кристаллизации. Их влияние аналогично действию добавочного присадочного материала в форме гранул, который вводят в сварочную ванну при сварке под флюсом.

Выводы

1. Рентгеноструктурный анализ показал, что при плазменно-порошковой наплавке прослеживается эффект структурной наследственности исходной структуры наплавленным металлом, полученного с использованием присадочного порошка ПГ-10P6M5: чем больше содержание α -фазы в по-

рошке, тем больше ее в наплавленном металле, в соответствующей пропорции также уменьшается содержание γ -фазы.

2. При наплавке с использованием смесей порошков с широким диапазоном гранулометрического состава для их полного расплавления в плазменной дуге требуется значительно больший ток, чем при использовании порошков с узким диапазоном гранулометрического состава.

3. Металлографические исследования показали, что при плазменной наплавке порошков мелкой фракции (40...125 мкм) структура наплавленного металла состоит из крупных дендритов, ориентированных в направлении теплоотвода. Добавка к мелкой фракции порошка ПГ-10P6M5 30 мас. % порошка крупных (200...250 или 315...400 мкм) фракций приводит к образованию дополнительных центров кристаллизации и измельчению структуры наплавленного металла, при увеличении массовой доли крупных фракций до 45 мас. % в структуре наплавленного металла могут оставаться нерасплавленные частицы присадочного порошка.

1. Рябцев И. А. Структурная наследственность в системе исходные материалы–металлический расплав–твердый металл // Автомат. сварка. — 2006. — № 11. — С. 11–16.
2. Гладкий П. В., Павленко А. В., Зельниченко А. Т. Математическое моделирование нагрева порошка в дуге при плазменной наплавке // Там же. — 1989. — № 11. — С. 17–21, 54.
3. Гладкий П. В., Павленко А. В., Переплетчиков Е. Ф. Температура и геометрические размеры сварочной ванны при плазменно-порошковой наплавке // Там же. — 2006. — № 6. — С. 15–19.
4. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. — М.: Металлургия, 1975. — 584 с.

The influence of structure and granulometric composition of PG-10R6M5 filler powder on structure of the deposited metal produced by plasma-powder surfacing with application of the above powder was studied. It is shown that the effect of the deposited metal inheriting the structure of PG-10R6M5 powder is traceable in surfacing: the higher the content of α -phase in it, the larger its amount in the deposited metal at the respective lowering of the content of γ -phase.

Поступила в редакцию 31.01.2007



ПРОИЗВОДСТВО СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СНГ (по материалам IV Международной конференции по сварочным материалам стран СНГ)

П. В. ИГНАТЧЕНКО, инж. (Ассоциация «Электрод» предприятий стран СНГ)

18–21 июня 2007 г. Ассоциация «Электрод» предприятий стран СНГ совместно с НПЦ «Сварочные материалы» (г. Краснодар) провели IV Международную конференцию «Сварочные материалы. Разработка. Технология. Производство. Качество. Конкурентоспособность» на базе санатория «Автотранспортник России» (пос. Агой, Краснодарский край).

В работе конференции приняли участие руководители предприятий и акционерных обществ, ведущие ученые, технологи, конструкторы. Всего 71 человек. По роду деятельности участники конференции из России и Украины представляли разработчиков, производителей, потребителей сварочных материалов и технологического оборудования, а также поставщиков сырьевых компонентов. Среди участников были пять докторов наук, академик МАРЭ и семь кандидатов наук. Вел конференцию И. М. Лившиц, президент Ассоциации «Электрод» (ООО «Инстрэл», г. С.-Петербург).

Представленные на конференции доклады вошли в сборник, который был издан к началу ее работы и распространен среди участников.

Со словами приветствия к участникам конференции обратился генеральный директор ООО НПЦ «Сварочные материалы» В. М. Дзюба, представитель Администрации Краснодарского края Н. Н. Макрушан, президент РНТСО О. И. Стеклов, директор Московского отделения РНТСО В. К. Беляев. Были зачитаны также приветствия от коллектива сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона и его директора академика Б. Е. Патона, а также генерального директора ЦНИИ КМ «Прометей» академика И. В. Горынина. В приветствиях отмечалась постоянная забота ассоциации о совершенствовании отечественного производства сварочных материалов в условиях острой конкуренции и экспансии импортной продукции. Ассоциация вносит консолидирующее начало во взаимодействие специалистов стран СНГ в области сварочных материалов, инициирует обсуждение актуальных научных и производственных проблем, помогает решать многие злободневные вопросы.

Исполнительный директор ассоциации П. В. Игнатченко проанализировал состояние производства сварочных материалов в странах СНГ в 2006 г. и отметил, что входящие в нее предприятия обеспечивают львиную долю производимых в СНГ сварочных материалов. На сегодня практически решены проблемы упаковки

сварочных электродов, проволок сплошного сечения и порошковых проволок. Налажен промышленный выпуск легированной омедненной проволоки с рядной намоткой на кассеты различной массы, осуществляется штучная маркировка электродов. Дирекция ассоциации в канун нынешней конференции предприняла очередную попытку собрать сведения от предприятий-потребителей сварочных материалов с претензиями к поставщикам тех или иных, как правило, сертифицированных материалов. К сожалению, ответа не последовало. Далее П. В. Игнатченко остановился на объемах производства материалов.

В 2006 г. в странах СНГ произведено 120 млн т стали, 99 млн т проката (в России произведено 71 млн т стали, 58 млн т проката). Увеличение по сравнению с 2005 г. составило: по стали 9,4, по прокату 6,6 %. Украина выпустила 41,0 млн т стали, 34 млн т проката. Увеличение составило: по стали 6,2, по прокату 3,8 %.

Общий объем производства покрытых сварочных электродов в 2006 г. в странах СНГ составил 324,7 тыс. т. Из них 78,6 % приходится на предприятия Российской Федерации, 16,8 % на Украину и 4,6 % на остальные страны СНГ. В прошлом году общий объем производства электродов увеличился по сравнению с 2005 г. на 6,1 %, в том числе в Российской Федерации на 6, а в Украине на 4,4 %. Объем производства электродов по типу покрытия составил с рутил-ильменито-



вым покрытием 183,4 тыс. т, с основным 118,7 тыс. т. Выпуск электродов специального назначения для сварки высоколегированных сталей и цветных металлов составил 22,6 тыс. т. Всего в Российской Федерации изготовлено электродов 255,6 тыс. т, в том числе с рутил-ильменитовым покрытием — 128,9 тыс. т, с основным — 104,8 тыс. т, специальных электродов — 21,9 тыс. т. В Украине — 53,9 тыс. т, из них с рутил-ильменитовым покрытием — 41,4 тыс. т, с основным — 11,8 тыс. т, специальных электродов — 0,70 тыс. т.

Наметилась положительная тенденция увеличения производства электродов малого и среднего диаметра (2,6...4,0 мм). Их выпуск суммарно составил 278,4 тыс. т, увеличение по сравнению с 2005 г. составило 3 %. Изготовлено электродов диаметром 5,0 и 6,0 мм соответственно 46,1 и 1,2 тыс. т. Таким образом, электродов диаметром до 5,0 мм произведено 85 %. Общий объем выпуска легированной сварочной проволоки диаметром до 2,0 мм для механизированной сварки в защитных газах составил 46,4 тыс. т, из них диаметром 0,8...1,4 мм — 27,7 тыс. т. В Российской Федерации изготовлено 35,1 тыс. т, из нее диаметром 0,8...1,4 мм — 22,4 тыс. т, а в Украине 11,3 тыс. т, из них диаметром 0,8...1,4 мм — 5,3 тыс. т.

По сравнению с 2005 г. общий объем выпуска сварочной проволоки увеличился на 2,6 %, в том числе в Российской Федерации на 5 %, а в Украине остался на уровне прошлого года. Следует особенно подчеркнуть положительный рост производства сварочной омедненной проволоки, которая по качеству соответствует материалам ведущих зарубежных фирм и поставляется в нужном количестве на шпулях и катушках с рядной наметкой массой от 3 до 15 кг и более. Основными поставщиками такой проволоки являются предприятия — члены ассоциации: ОАО «Межгосметиз-Мценск», ОАО «ММК-Метиз», Череповецкий, Орловский и Волгоградский заводы, ОАО «Северсталь-Метиз» и ООО «Арксэл».

Сварочной и наплавочной порошковых проволок в 2006 г. изготовлено 5953,8 т, из них сварочной 1961,8 т, наплавочной 3992 т, в том числе 200 т порошковой ленты. По сравнению с 2005 г. рост составил 35 %. Объем производства порошковой проволоки в Российской Федерации составил 4784,6, сварочной 1602,6 т, а наплавочной 3182 т. В Украине произведено 1169,2 т порошковой проволоки: сварочной 359,2 т, 610 т наплавочной и ленты 200 т. Увеличение производства порошковой проволоки в России по сравнению с 2005 г. составило 61 %, а в Украине, наоборот, уменьшилось на 16 %.

Сварочных флюсов произведено в 2006 г. 38,7 тыс. т, в том числе в Российской Федерации

10,3 тыс. т, из нее 6082,8 керамического флюса, в Украине — 28,4 тыс. т. Общий объем производства сварочного флюса по сравнению с 2005 г. увеличился на 2,3 %. Объем производства сварочного флюса по сравнению с 2005 г. в России уменьшился на 12, а в Украине на 12 % увеличился.

В 2006 г. общий объем производства сварочных материалов составил 415,7 тыс. т, в том числе для механизированной сварки 91,0 тыс. т. На долю выпуска сварочных материалов для механизированной сварки приходится 22 % общего выпуска.

Из приведенных данных видно, что по-прежнему основную долю сварочных работ в странах СНГ осуществляют покрытыми электродами. Несмотря на существующий низкий уровень использования механизированной сварки на сегодня ситуация постепенно изменяется в лучшую сторону.

В целом в России и Украине имеется достаточно производственных мощностей по производству сварочных материалов как для ручной, так и механизированной сварки. Однако по причине медленного роста производства промышленной продукции существующие мощности не загружены. По этой причине, к сожалению, прекратил существование крупный электродный цех (на 60 тыс. т) на Череповецком заводе ОАО «Северсталь-Метиз». Производство электродов передано Орловскому заводу ОАО «Северсталь-Метиз». Парадоксально, но несмотря на недогрузку существующих мощностей продолжают создаваться новые производства по изготовлению электродов.

Всего на конференции было заслушано около 50 докладов и сообщений, отражающих результаты научных и инженерных работ по созданию новых марок сварочных материалов, образцов технологического оборудования, совершенствованию производства материалов, повышению их качества и конкурентоспособности, состоянию вопросов сертификации продукции и управления качеством, переоснащения существующих мощностей современным оборудованием. Доклады были представлены от ОАО «АО Спецэлектрод», ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», Ижорского филиала «Инстрэл», ООО НПЦ «Сварочные материалы», ОАО «Стройтрансгаз», Донского ГТУ, ЗАО НПФ «ИТС», ОАО «Межгосметиз-Мценск, ООО «Технопром», ЗАО «Ферросплав», ООО «Институт ВНИИСТ», ООО «Сычевский электродный завод», ООО «Созим», ЗАО «Кубаньгазстрой», ОАО «ММК-Метиз», ЗАО «ЭЛЗ», ЗАО «Свама», ООО «Ротекс», Орловского завода ЗАО «Северсталь-Метиз» (Россия), ИЭС им. Е. О. Патона, ОАО «Электромашиностроительный завод фирма «СЭЛМА», ООО «Велма», ГП ОЗСМ ИЭС им. Е. О. Патона, ТМ «Велтек» (Украина).



Среди докладов, не вошедших в сборник, следует отметить следующие.

Н. Б. Кораблев, инженер ОАО «Северсталь-Метиз», рассказал об изменениях, произошедших в деятельности компании за последние годы. Компания создана в 2004 г. путем слияния трех заводов: ОАО «ЧСПЗ» (г. Череповец), ОАО «ОСПАЗ» (г. Орел) и ООО «Волга-Метиз» (г. Волгоград). В 2006 г. она получила международный статус благодаря заключению сделок по приобретению акций украинского предприятия «Днепрометиз» (г. Днепропетровск) и британской компании «Carrington Wire Limited». Сегодня «Северсталь-Метиз» занимает лидирующее положение в российской отрасли (около 30 % рынка), является крупнейшим экспортером металлоизделий из России в страны Европы (порядка 53 % общего объема экспорта).

Ю. В. Кусков, председатель Совета директоров ОАО «АО Спецэлектрод», рассказал о концептуальных направлениях в деятельности предприятия за последние годы. Первое из них связано с разработкой и освоением производства электродов-аналогов западных производителей. Так поступает в России ЭСАБ. Он, производя электроды в России, широко использует отечественные товарные знаки и марки. ОАО «АО Спецэлектрод» намерен поступать также и уже зарегистрировал такие товарные знаки, как ОБ и ОК. Во-вторых, имеются планы по созданию новых марок электродов с принципиально новым качеством, которые трудно продублировать. И здесь «Спецэлектрод» опирается на имеющиеся мощности по производству специальных сталей. Разработаны новые электроды серии ОЗЛ-300, отличающиеся высокой рентабельностью. В-третьих, учитывается, что рынок сварочного оборудования менее конкурентоспособен, чем рынок сварочных материалов. Поэтому используются собственные машиностроительные мощности, объединение компании «Спецэлектрод» загружает их производством сварочного оборудования, прежде всего источников питания широкой номенклатуры. Заказчику предлагается комплексный товар «источник+материалы». В планах освоение новых типов оборудования, включая инверторную технику.

На ОАО «АО Спецэлектрод» уделяют должное внимание также участию своих специалистов в качестве экспертов в работе ряда комиссий МИС и ЕФС. Это позволяет более целенаправленно работать в части гармонизации свойств выпускаемых материалов к требованиям западного рынка. Учитывая перспективу вступления во ВТО вопросы качества и цены приобретают особую актуальность. За последние годы ОАО «Спецэлектрод» удалось найти резервы по существенному снижению затрат на производство электродов и

повысить норму прибыли. В частности, сокращено число работающих на предприятии с 1,5 до 1,1 тыс. человек. Предлагается дальнейшее сокращение персонала при одновременном повышении производительности труда.

Объединением накоплен опыт по созданию торговых сетей. Широкая служба маркетинга и впредь будет развиваться. Будет сделан упор на плавный переход к развитию сети представительств «Спецэлектрода» и дилеров по всем регионам России и СНГ. Осуществлена легализация прав акционеров ОАО «АО Спецэлектрод» на собственность. Имеется ввиду оформление документов на приватизацию зданий, сооружений всех четырех предприятий, а также выкуп земли, на которой они размещены. Это позволило резко капитализировать собственность компании, благодаря чему появилась возможность кредитования на десятки миллионов долларов. В планах эмиссия акций для привлечения капитала и дальнейшей реконструкции предприятий. Рост финансовой мощи и привлечение больших финансовых инвестиций особенно важны в период вступления во ВТО.

П. Н. Погребной, начальник электродного производства ОАО «Сумское НПО им. М. Ф. Фрунзе», рассказал об энергосберегающих технологиях, используемых на предприятии при производстве покрытых электродов. В объединении традиционно предъявляются высокие требования к качеству сварочных материалов, что обусловлено номенклатурой производимого оборудования (для атомных электростанций, объектов нефте- и газодобычи, химической промышленности, магистральных газо- и нефтепроводов).

Сегодня электродное производство объединения представляет собой современный производственный модуль с замкнутым технологическим циклом по классической схеме. Основные единицы оборудования были поставлены в конце 1980-х годов швейцарской фирмой «Манса Судаж». Аналогичное оборудование примерно в то же время было поставлено этой же фирмой в Волгодонск, Ижору, Казахстан, а немного позже в Сычевку, Смоленской обл. Из-за резкого подорожания энергоносителей за последние два года пришлось серьезно заниматься проблемой их экономики. Прежде всего для создания нормального температурного режима 80% наружного остекления заменили утепленными панелями «сэндвич», произвели капитальный ремонт оставшегося остекления. Кроме того, для создания необходимого микроклимата на базе серийно выпускаемых в объединении бытовых газовых котлов созданы индивидуальные автономные системы обогрева с регулированием температуры в широких диапазонах. Эти системы применяют для термостатирования жидкого стекла, обогрева помещений оп-

рессовки, сушки электродов и термоконстантного склада готовой продукции. Камера предварительной сушки (проявления) разработана специалистами объединения и построена над камерными печами для термообработки электродов. Камера имеет перфорированный пол, что позволяет использовать вторичное тепло от прокалочных печей и таким образом, экономить энергоресурсы. Камера оборудована автономной системой обогрева, действующей круглый год, и дополнительно подключена зимой к центральной отопительной системе. Для удаления влаги из камеры смонтирована специально разработанная система вентиляции, исключающая образование турбулентных потоков воздуха.

Для хранения электродов, предназначенных для сварки ответственных конструкций, был построен термоконстантный склад с автономной и центральной системами отопления, где постоянно поддерживается температура не менее 25...30 °C и влажность не более 50 %. Такие условия хранения в сочетании с надежной упаковкой обеспечивают неизменное качество электродов в течение длительного времени их хранения. Внедрение индивидуальных систем обогрева на самых ответственных производственных участках, постройка термоконстантного склада хранения электродов и камеры проявления, утепление здания цеха панелями «сэндвич» позволили в два раза снизить затраты на обогрев помещения цеха.

Пересмотрены были также технологические режимы варки и доводки жидкого стекла. Силикатная глыба перед разваркой тщательно моется, что позволяет потом снизить затраты энергии при ее фильтрации, а оптимально подобранные режи-

мы, а именно давление пара, время разварки, масса загружаемой в автоклав силикатной глыбы и очищенной воды позволяют получить стекло с заданными параметрами и значительно экономить энергоресурсы при его доводке.

Термообработка — основная статья расхода электроэнергии при производстве электродов с основным покрытием. Печи на предприятии камерные, поставлены фирмой «Манса Судаж» вместе с основными единицами оборудования производства электродов. Здесь, помимо использования вторичного тепла, для проявления электродов применяется: строгая наладка работы всех зон печи, в том числе нагревателей и вентиляторов; оптимальная загрузка печей применительно к каждому диаметру электродов; оптимальные режимы термообработки.

С целью экономии энергоресурсов при прокатке электродов перед их непосредственным использованием, сохранения качества электродов при транспортировке и хранении в складовых с соответствующим климатом, удобства применения в монтажных условиях разработана технология и внедрена вакуумная упаковка электродов в специальные многобарьерные полимерные пленки. Широкие промышленные испытания электродов в вакуумной упаковке в течение трех месяцев в действующих цехах, на монтаже в климатических условиях Тюмени, Казахстана, Туркмении и Ирана дали положительные результаты. При этом только затраты на повторную прокатку электродов перед применением превышают затраты на вакуумную упаковку. Испытание электродов в вакуумной упаковке, помещенных на 2





месяца в аквариум с водой, показали, что их влажность остается неизменной.

Таким образом, внедрение перечисленных выше мероприятий позволило электродному производству ОАО «Сумскому НПО им. М. В. Фрунзе» при той же производственной программе снизить потребление электроэнергии на 30, газа на 40 %, теплоэнергии в 2 раза.

А. А. Чуларис, проф., д-р техн. наук Донского ГТУ, рассказал об особенностях сертификации и оценке качества сварочных электродов. В этой части возникают проблемы организационно-методического характера. Их много, но выступающий остановился на некоторых, наиболее явных.

Сложности возникают при аттестации материалов разных производителей. Это обусловлено тем, что обычно прокатку электродов делают в соответствии с рекомендациями производителей. Но, если проанализировать нормативную документацию различных объектов, подведомственных Ростехнадзору, то обнаруживается, что нельзя аттестовать разных производителей в одинаковых условиях, ибо, если это котельно-энергетическое оборудование — там одни межпрокаточные сроки и температурно-временные условия, а у нефтяников и газовиков — другие. Некоторые ведомственные нормативы допускают увеличение количества прокаток, что может вызвать снижение прочности покрытия за счет разрыхления его поверхности. Назрела необходимость создания методического подхода. И здесь свое слово могут сказать потребители сварочных материалов совместно с производителями. Необходим тот оптимум, который действительно даст возможность объективно оценить этот параметр.

Относительно разнотолщинности покрытий, то есть намерения обеспечить точность измерения до 0,01 мм, однако нет соответствующей методики. Оценка импортных электродов разных ведущих поставщиков (КБ СТИЛ, Бёллер, Тиссен, ЭСАБ, Линкольн) показывает, что после удаления черепка покрытия остаточная толщина покрытия на стержнях совершенно разная, и она имеет больший диапазон. Поэтому необходима разработка более объективных методик с использованием емкостных либо индуктивных датчиков.

Методика оценки прочности покрытия устарела. При опускании электрода плашмя на плиту не удастся избежать эффекта косо́го соударения на участке перехода к свободному концу электрода (токоподводу). Для электродов разного диаметра имеет место различная кинетическая энергия соударения. Необходимо совершенствование методики с учетом того, что электрод с покрытием при сварке используется в статических условиях.

Что касается оценки сварочно-технологических свойств, то в существующей методике, описанной в РД 03613 (2003 г.), применяется балльная

оценка, учитывающая легкость возбуждения дуги, горения дуги и т. д. и т. п. Известно, что дугу можно возбуждать клевком, чирканием, в то же время в большинстве документов оговорено именно чиркание. И это имеет основание, поскольку реальная поверхность изделия имеет шероховатость и при чиркании возникает множество коротких замыканий и более короткий переход к естественному горению дуги. Важен также тип источника (на переменный или постоянный ток). Для испытания большинства рутиловых электродов может быть использован любой тип источника, а для электродов основного вида — обычно источник постоянного тока. Необходим учет напряжения холостого хода источника. Ведь есть обоснования в необходимости учета соотношения $U_d/U_{xx} = 1/1,8...1/2,5$. Следует учитывать также вольт-амперную характеристику источника, интенсивность нарастания тока после короткого замыкания, а также индуктивность сварочной цепи. Поэтому необходимы четкие методические указания по конкретным границам параметров источника питания при проведении испытаний сварочно-технологических свойств электродов.

Относительно учета содержания водорода также существует неопределенность. Нигде не описаны требования: для каких электродных материалов следует проводить испытания на содержание водорода в наплавленном металле.

В прениях на конференции выступили д-р техн. наук В. Н. Шлепаков, канд. техн. наук И. Р. Явдошин (ИЭС им. Е. О. Патона), Н. Н. Махрушан (Администрация Краснодарского края), д-р техн. наук А. А. Чуларис (Донской ГТУ), П. И. Моисеенко (Орловский завод «Северсталь-Метиз»), В. Г. Лозовой, В. М. Дзюба (ООО «НТЦ «Сварочные материалы»). Они отметили состоявшуюся конференцию как успешную благодаря ее деловитости, конструктивному характеру и конкретике. Вместе с тем был высказан ряд пожеланий на будущее в работе ассоциации. Желательно структурировать доклады, выносимые на конференцию, по отдельным проблемам. Кроме того, если они присутствуют на бумажном носителе, в выступлениях их следует подавать тезисно, что позволит больше времени уделить обсуждению основных результатов. Ассоциации следует искать такие принципы подготовки и проведения конференция, которые обеспечат откровенный обмен информацией для выработки новых технологических решений. Важно активное участие ассоциации в совершенствовании нормативно-технологической базы в области сварочных материалов и их сертификации. Ассоциация накопила положительный опыт работы и назрела необходимость создания своего сайта для оперативного размещения материала по текущим техническим и организационным вопросам разных направле-

ний. Полезно организовать также издание информационного листка, например, с разделами: сырьевые материалы—оборудование—новые разработки материалов.

Участники с удовлетворением отметили полезность состоявшегося обмена мнениями по проблемам, изложенным в докладах и одобрили большую работу, выполненную бывшим президентом ассоциации (А. И. Бугаев), исполнительным директором ассоциации (П. В. Игнатченко), генеральным директором (В.М. Дзюбой), зам. директора (В. Г. Лозовым), главным бухгалтером (О. М. Дзюба, Ю. М. Бориевой) ООО НПП «Сварочные материалы» по организации и проведению конференции, а также изданию сборника докладов. Был подчеркнут весомый вклад ассоциации в развитие производства сварочных материалов стран СНГ, создание и оснащение производств технологическим оборудованием, внедрение новых технологических процессов по их изготовлению, развитие сырьевой базы, осуществление

сертификации продукции, систем управления качеством, технических регламентов. Все это положительно отразилось на состоянии сварочного производства стран СНГ. Отмечена важность и полезность представленных на конференции докладов и сообщений, которые рекомендованы производителям сварочных материалов для практического использования в своей повседневной деятельности. Ассоциация «Электрод» в ближайшие годы намечает разработку новых конкурентоспособных сварочных материалов, соответствующих уровню ведущих зарубежных фирм, которые будут разрабатываться двумя путями: индивидуально собственными силами с привлечением сторонних организаций или совместно двумя-тремя предприятиями-изготовителями сварочных материалов. Важнейшим направлением деятельности предприятий производителей сварочных материалов является доведение качества выпускаемых ими материалов до уровня, соответствующего требованиям ВТО.

Поступила в редакцию 22.08.2007



МЕЖОТРАСЛЕВОЙ УЧЕБНО-АТТЕСТАЦИОННЫЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТА ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ

Межотраслевой учебно-аттестационный центр Института электросварки им. Е. О. Патона организует цикл тематических семинаров на тему
«Стандарты, Правила и Нормы в области сварочного производства»

Основные направления работы:

1. Процесс пересмотра межгосударственных стандартов (ГОСТ) и разработка национальных стандартов путем гармонизации международных и европейских норм.

2. Презентация новых национальных гармонизированных стандартов по:

- аттестации персонала сварочного производства;
- аттестации технологических процессов по сварке;
- классификации свариваемых материалов;
- сертификации производства сварных конструкций;
- оборудованию для сварки;
- неразрушающему контролю сварных соединений.

3. Правила, нормы и другие нормативно-правовые акты, регламентирующие производство сварочных работ на объектах повышенной опасности.

Семинары ориентированы на специалистов, занятых изготовлением и эксплуатацией сварных конструкций. Каждый слушатель будет обеспечен комплектом информационных материалов.

Заявки на участие просим направлять по адресу:

**Украина, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11
тел. (+380 44) 456-63-30, 456-10-74; факс (+380 44) 456-48-94
E-mail: paton_muac@ukr.net**



АРГОНОДУГОВАЯ СВАРКА ЗАГОТОВОК ВАЛОВ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В. М. КУЛИК, канд. техн. наук, **М. М. САВИЦКИЙ**, д-р техн. наук, **А. Ф. ЛУПАН**,
Л. А. ЧЕРТОРЫЛЬСКИЙ, **В. Э. СУХОЯРСКИЙ**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом заготовок валов. Применение активирующего флюса (сварка А-ТИГ) позволяет уменьшить глубину разделки кромок стыка, которая затем заполняется присадочным металлом в процессе сварки ТИГ. Показано, что термоциклирование и автоподогрев при многослойной сварке способствуют снижению скорости охлаждения, получению более равновесных структур и предотвращению образования холодных трещин. В состоянии после сварки металл соединения отличается повышенными по сравнению с основным металлом твердостью и микротвердостью, после комплексной термической обработки свойства соединения и основного металла становятся близкими.

Ключевые слова: аргонодуговая сварка, заготовки валов, низколегированные стали, кольцевой стык, проплавление, шов, ЗТВ, скорость охлаждения, структура, свойства соединения

В металлургическом оборудовании используются термоупрочненные шлицевые и шарнирные валы диаметром 150...320 мм и длиной 1...2 м с утолщенными в 1,5...2,5 раза концевыми частями. Местные увеличения диаметра обуславливают большие потери металла в стружку при изготовлении валов, повышенные энерго- и трудозатраты. Улучшение работоспособности таких валов достигается путем снижения их массы за счет пустотелости, применения сварки частей вала разного диаметра из разных сталей (рис. 1) и термоупрочнения. Участки, испытывающие контактный износ, подвергают цементации. Для уменьшения продавливания цементованного слоя при больших удельных нагрузках целесообразно увеличение его толщины, прочности и твердости стали. Облегченные валы изготавливают из легированных сталей 20Х и 18ХГТ, в которых наличие хрома и марганца способствует увеличению толщины цементованного слоя, существенному сокращению длительности цементации и расхода энергии [1], а наличие титана задерживает рост аустенитного зерна. С учетом стоимости и других факторов для менее нагружаемых частей допускается замена стали 20Х на углеродистую сталь 20.

Используемые стали 20Х и 18ХГТ, имеющие коэффициент эквивалентности по углероду соответственно 0,40...0,57 и 0,50...0,67, потенциально склонны к образованию холодных трещин при сварке (в отличие от стали 20 с $C_{\text{экв}} = 0,23...0,35\% < 0,45\%$). Применение подогрева и послесварочной термообработки изделия обычно устраняет трещинообразование, однако усложняет технологический процесс. Использование

высоколегированных сварочных материалов применительно к термоупрочняемым валам малопримемлемо вследствие возникновения структурно-механической неоднородности в зоне сплавления разнородных сталей и резкого снижения эксплуатационной надежности сварного соединения.

Более оправданно осуществление автоподогрева и самоотпуска при многослойной сварке кольцевого соединения. Так, автоподогрев и сопутствующая термообработка соединений закаливающихся сталей реализованы в технологиях сварки корпусов электроустановок с толщиной стенки 22 мм и восстановления наплавкой массивных роторов без применения предварительного подогрева и последующей термической обработки [2, 3].

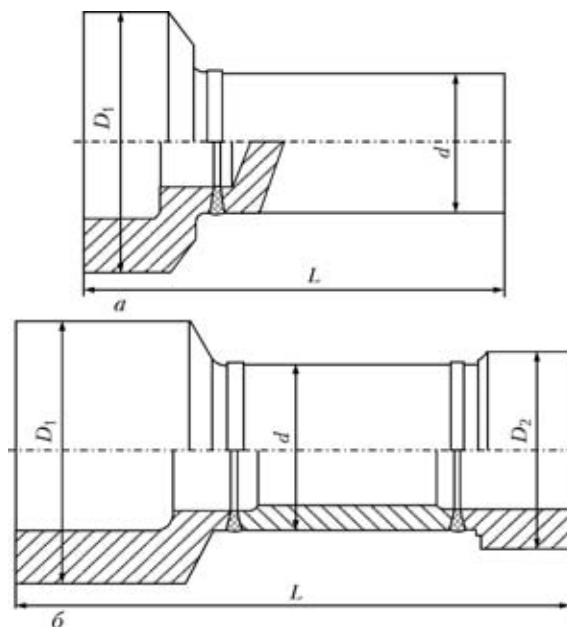


Рис. 1. Схемы сварных заготовок шлицевого (а) и шарнирного (б) валов

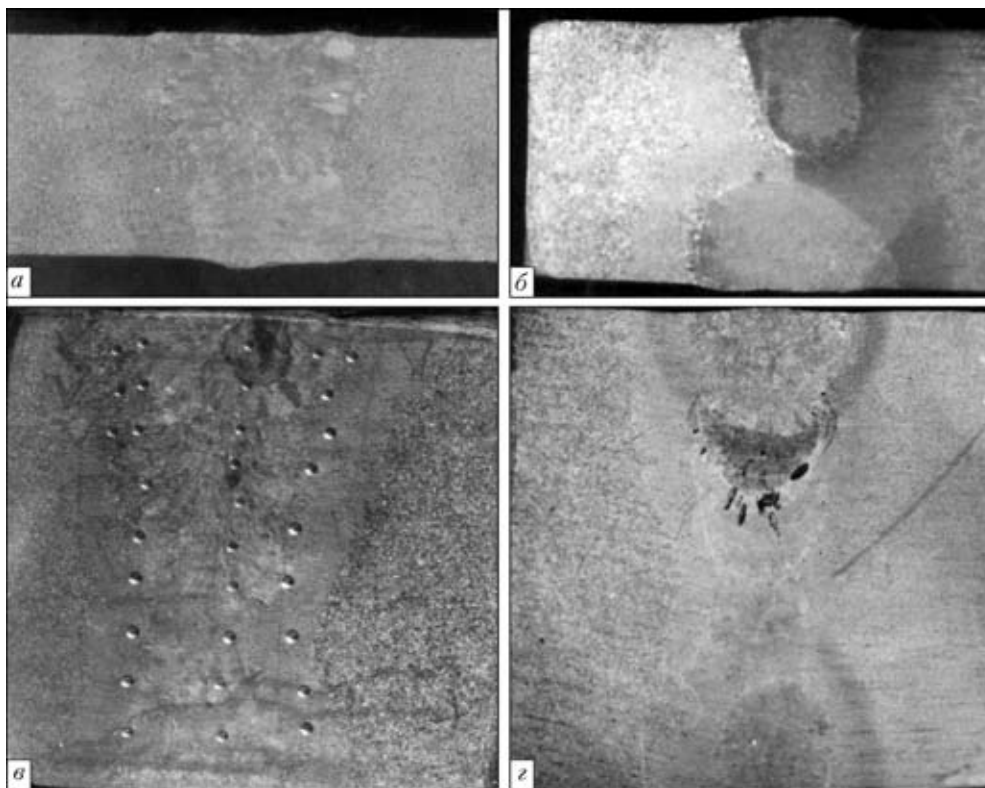


Рис. 2. Макрошлифы кольцевых соединений толщиной 14 (а), 18 мм (б) без разделки кромок и 33 мм (в, з) с разделкой кромок (з — с порами в шве с присадочным металлом типа 08МД)

Наличие повышенных концентраций напряжений, остаточных напряжений и неоднородности механических свойств вызывает понижение усталостной долговечности сварных соединений стали относительно основного металла [4]. Наименьшие концентрации напряжений отмечаются в стыковых соединениях, выполненных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом. Повышение циклической трещиностойкости швов высокопрочных сталей до показателей основного металла достигается также закалкой и отпусками [5].

Цель настоящей работы — разработка технологии сварки стыковыми швами заготовок валов, применяемых для эксплуатации в условиях металлургического производства.

Отработку техники и режимов многослойной аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом заготовок валов разных типоразмеров осуществляли на полых цилиндрических образцах наружным диаметром 108...192 мм с толщиной стенки 14, 18 и 33 мм. Сварку снаружи и внутри выполняли с глубоким проплавлением на первых проходах с каждой стороны после нанесения на поверхность активирующего флюса ВС-2Э (сварка А-ТИГ) [6, 7], чем достигается уменьшение глубины разделки кромок, количества проходов сварки, расхода сварочных материалов и электроэнергии. При последующих проходах без применения активирующего флюса (сварка ТИГ) наружная U-образная разделка кромок заполняется

присадочным металлом (сварочные проволоки Св-10Г2М, Св-10Х2МД, Св-08Х3Г2М, Св-20Х4ГМА, Св-08МД). Последние выбраны с учетом повышения порога усталости шва при снижении содержания углерода от 0,3 до 0,15 % [5]. При сварке комплексно использовали установку АРК-1, выпрямители ВСВУ-315 и ВДУ-504, манипулятор ОБ-631.

Часть сваренных образцов подвергали высокотемпературным нагревам, закалке в воде и низкотемпературному отпуску (как при химико-термической и термической обработках валов). Исследовали химический состав, макро- и микроструктуру, распределение твердости *HRB*, *HRC* и микротвердости, оценивали прочность соединения. Выполняли ультразвуковой контроль кольцевых стыков заготовок валов.

При сварке А-ТИГ кольцевых образцов толщиной 14, 18 и 33 мм максимальная глубина проплавления составляет соответственно до 11, 10 и 8 мм. В первом случае при сварке с обеих сторон без разделки кромок обеспечивается сплошность шва по всей толщине (рис. 2, а), во втором и третьем имеют место непровары в середине соединения (особенно при смещении проплавлений от стыка) и резкое снижение его циклической долговечности (рис. 2, б). Перекрытие проплавлений при сварке А-ТИГ и сплошность таких соединений по всей толщине обеспечиваются в результате разделки кромок соответственно на глубину 2...3 и 19...21 мм с при-



туплением 15...16 и 12...14 мм и заполнения ее присадочным металлом при последующих проходах сварки ТИГ (рис. 2, в).

Глубокое проплавление при сварке А-ТИГ с коэффициентом формы 1,0...1,5 обуславливает формирование в металле шва столбчатых, ориентированных к центру и разориентированных, измельченных в центре кристаллитов. На участке, сформированном сваркой ТИГ с расплавлением присадочного металла, появляется вертикальная составляющая ориентации кристаллитов от ранее выполненного слоя. В многослойном шве кристаллиты растут от основного металла в виде пространственных кривых тел, изгибающихся вверх с превалированием вертикальной составляющей в центральной части шва. В стыковом соединении выявляется визуально зона термического влияния (ЗТВ) шириной до 3...5 мм, которая увеличивается от первых проплавлений при сварке А-ТИГ к наружной поверхности стыка.

Химический состав металла шва при сварке А-ТИГ является промежуточным между свариваемыми сталями и изменяется в пределах их марочного состава, а состав металла при сварке ТИГ близок присадочным проволокам, в том числе при совместном введении их в зону сварки (табл. 1). При этом содержание углерода в шве может уменьшаться в 1,3...2 раза, а изменение марки проволоки в процессе сварки влечет за собой соответствующее изменение химического состава металла следующего слоя и управляемое дифференцирование твердости по высоте шва (табл. 2). В шве, образованном с расплавлением проволоки Св-08МД, содержащей небольшое количество раскислителей, могут образовываться поры (рис. 2, з).

Скорость охлаждения при сварке, от которой зависит формирование структуры металла соединения, рассчитываемое по схеме плоского слоя [8], когда распределение температур по толщине является неравномерным, определяли по формуле

$$W = \omega 2\pi\lambda \frac{(T - T_0)^2}{q/v}, \quad (1)$$

где $\lambda = 0,38$ Вт/(см·град) — коэффициент теплопроводности стали; T_0 , T — соответственно исходная и текущая температуры при охлаждении металла; q — погонная энергия; v — скорость сварки.

Параметр ω зависит от безразмерного критерия

$$\frac{1}{\theta} = \frac{2q/v}{\pi\delta^2 c_p (T - T_0)}, \quad (2)$$

где δ — толщина стыка; $c_p = 4,8$ Дж/(см³·град) — теплоемкость стали.

При температурах низкой устойчивости аустенита 500...600 °С скорость охлаждения $w_{6/5}$ соединения толщиной 14...33 мм на первом проходе сварки с $q/v = 24290...25846$ Дж/см может быть 5,5...25,2 °С/с, увеличение толщины стыка в приведенных пределах вызывает повышение $w_{6/5}$ в 4,6 раза. Автоподогрев в процессе сварки до 100 и 200 °С, наоборот, приводит к снижению скорости охлаждения соответственно в 1,43...1,65 и 2,52...3,91 раза.

Согласно диаграммам распада переохлажденного аустенита [9] при сварочных скоростях охлаждения сталей 20, 20Х и 18 ХГТ происходит диффузионное, промежуточное, а также бездиффузионное превращения. Повторные тепловые воздействия при многослойной сварке, вызывающие общее повышение температуры и снижение скорости последующего охлаждения, способствуют уменьшению количества образующегося мартенсита (вплоть до предотвращения его образования) в структуре, существенному увеличению длительности самоотпуска первично и повторно закалившегося металла [10, 11]. Термоциклирование с нагревами выше A_{c3} измельчает аустенитное зерно, нагревы ниже A_{c3} обеспечивают от-

Таблица 1. Химический состав металла шва, сваренного без и с применением присадочных проволок

№ п/п	Стали кольцевого стыка	Присадочный металл	Массовая доля элементов, %				
			C	Si	Mn	Cr	Mo
1	20+20Х	—	0,18	0,27	0,71	0,71	<0,03
2	20Х+18ХГТ	—	0,08...0,012	0,29...0,33	0,60...0,77	0,98...1,20	—
3*		—	0,18	0,26	0,76	1,08	<0,03
4		10Г2М	0,08	0,18	1,26	0,78	0,05
5		08ХЗГ2М	0,06	0,44	1,43	1,60	0,16
6*		10Х2МД	0,07	0,37	1,92	0,98	0,07
7		20Х4ГМ	0,24	0,32	0,68	1,70	0,15
8		10Г2М+20Х4ГМ	0,09	0,11	1,05	0,57	0,05
9*		08ХЗГ2М+20Х4ГМ	0,08	0,46	1,36	1,73	0,18

* — в зону спектрального анализа частично попадает основной металл.

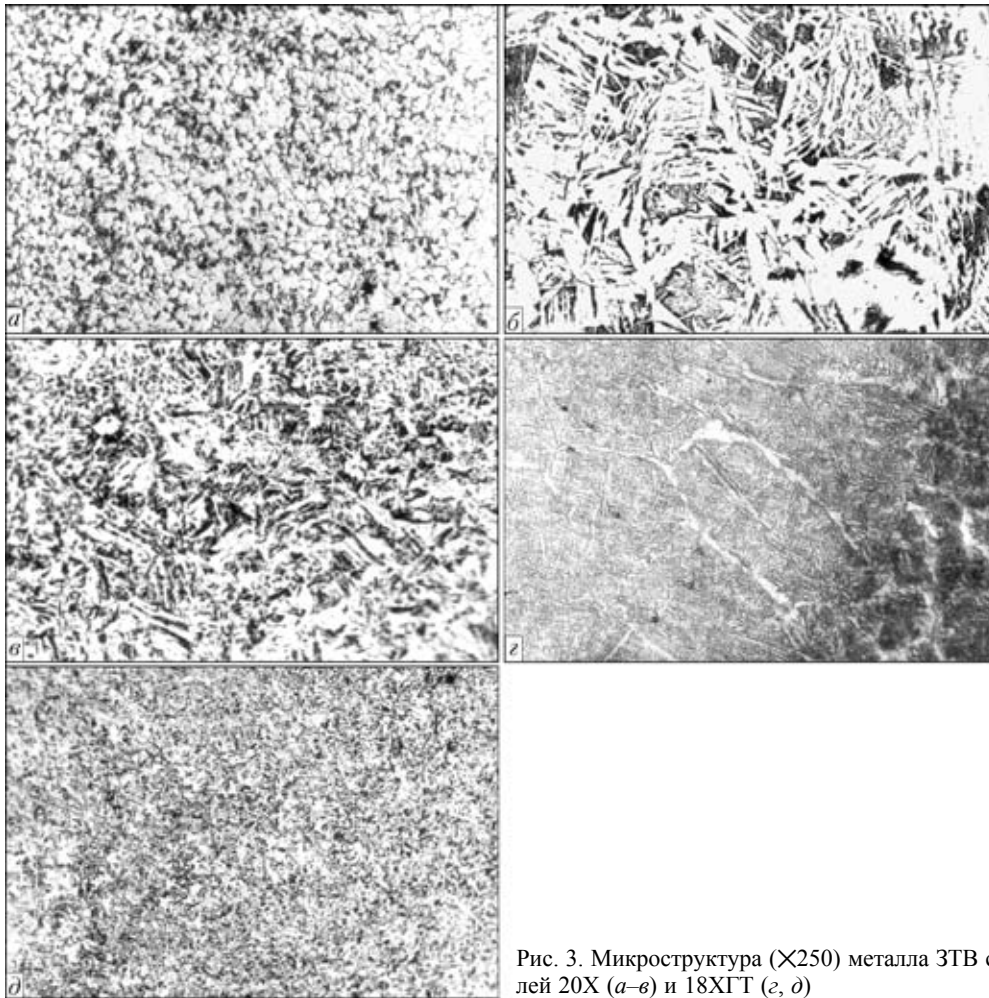


Рис. 3. Микроструктура (X250) металла 3ТВ сталей 20X (а–г) и 18ХГТ (г, д)

пуск закалившегося металла. Следствием этого является формирование различных сочетаний структурных составляющих (феррита, перлита, бейнита, мартенсита) в соединениях разных марок сталей, толщин на разных участках, в частности в металле 3ТВ (рис. 3). В стали 20X мартенсит не обнаруживается, в стали 18ХГТ содержание его визуально значительно ниже критического $M_{кр} \geq 50...78\%$ для легированных сталей с $0,15...0,30\%$ углерода [10, 12]. Это в сочетании с измельчением аустенитного зерна и сопутствующим отпуском предотвращает склонность к замедленному разрушению и образованию холодных трещин в сварных соединениях.

Металл 3ТВ соединения толщиной 18 мм стали 20 имеет микротвердость $HV_{0,2} = 130...180$, стали 20X $HV_{0,2} = 160...190$, стали 18ХГТ $HV_{0,2} = 165...200$. Меньшие значения микротвердости отмечаются на участках, сформированных в последнюю очередь, где вследствие уменьшения скорости охлаждения образуется более равновесная структура. Участки швов сталей 20+20X и 20X+18ХГТ, сформированные без присадочного металла, имеют микротвердость $HV_{0,2} = 125...185$. В первом слое, особенно со стороны третьего слоя, где нагретый выше A_{c3} металл охлаждается

замедленно, она понижена. Повышенное легирование присадочного металла способствует повышению микротвердости шва до $HV_{0,2} = 200$ и $HV_{0,2} = 200...230$ при использовании проволок Св-10Х2МД и Св-20Х4ГМА. Более высокая микротвердость $HV_{0,2} = 210...310$ и $HV_{0,2} = 305...375$ шва сталей 20X+18ХГТ на участках, сформированных соответственно без и с присадочным металлом 08Х3Г2М, наблюдается в стыке толщиной 33 мм, охлаждающемся с большей скоростью.

Шов и участки перегрева металла 3ТВ имеют повышенную по сравнению с основным металлом твердость по Роквеллу, которая в шве обычно выше, чем в металле 3ТВ, по крайней мере одной из сваренных сталей (табл. 2). Она изменяется как по высоте, так и поперек соединения и зависит от толщины стыка, очередности выполнения слоев, химического состава исследуемого металла. Повышенные твердость и соответственно прочность обуславливают разрушение испытуемых сварных образцов разнотвердотных сталей 20X+18ХГТ по менее легированной стали 20X при $\sigma_b = 603,5...605,1$ МПа.

После термической обработки, включающей имитацию условий цементации, закалку и низкий

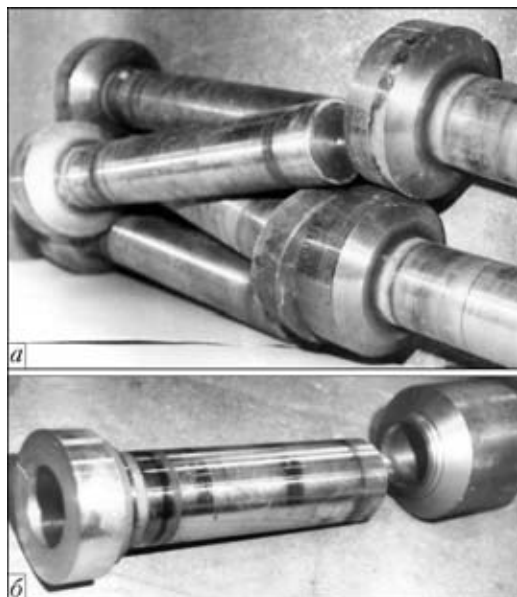


Рис. 4. Сварные заготовки шлицевого (а) и шарнирного (б) валов

отпуск, сталь 20Х и ее металл ЗТВ приобретают твердость $HRC\ 34,0...46,0$, сталь 18ХГТ и ее металл ЗТВ — соответственно $HRC\ 41,5...47,0$. Твердость участка шва, сформированного расплавлением сталей без присадочного металла, повышается до $HRC\ 36,0...45,0$ и становится промежуточной относительно свариваемых сталей. Металл шва типа 10Г2М приобретает твердость $HRC\ 33,5...40,0$; 10Х2МД — $HRC\ 41,0...46,0$; 08Х3Г2М — $HRC\ 33,5...40,0$. Комплексная термическая обработка обеспечивает измельчение структуры металла, общее упрочнение сварного изделия и получение близких значений свойств сварного соединения по сравнению с основным металлом. Сварные образцы внутренней (без присадочного металла) и наружной (с присадочным металлом) частей кольцевого стыка после закалки и низкого отпуска приобретают $\sigma_B = 1356,7...1369,6$ МПа и разрушаются при испытании по основному металлу с сужением. Такие же образцы, подвергнутые также предварительной нормализации и нагреву, имитирующему условия цементации, имеют

Т а б л и ц а 2. Твердость металла соединений разных толщин и марок свариваемых сталей и присадочного металла

№ п/п	Свариваемые стали		№ слоя	Присадочный металл	Твердость $HRB\ (HRC)$		
	марка	толщина, мм			ЗТВ	шов	ЗТВ
1	20+20Х	14	1	—	—	92...94	91...94
			2	10Г2М	—	83...84	94
			3	—	—	95...97	88...90
2	20+20Х	14	1	—	—	90...95	90...93
			2	—	—	94...95	88...93
			3	10Г2М	—	84...89	81...84
3	20Х+18ХГТ	18	1	—	97...99	97...98	—
			2	20Х4ГМ	—	(36)	(21...22)
			3	—	(23...24)	(25,5...26)	(25)
4	20Х+18ХГТ	18	1	—	97...98	97	98...99
			2	—	(22,5...24,5)	(23...26)	97...100
			3	20Х4ГМ	(20,5...22)	(35...35,5)	98...102
5	20Х+18ХГТ	18	1	—	94...98	98...99	94
			2	—	97...98	(24...24,5)	98...99
			3, 4	20Х4ГМ	99...101	(35...38)	99
6	20Х+18ХГТ	33	1	—	(23,0)	(25,5)	(24,5)
			2	—	(20,0)	(23,5)	(20,5)
			3, 4	08МД	88...90	86...88	89...93
7	20Х+18ХГТ	33	5...7	10Х2МД	90...98	(26,5)	(24,0...25,5)
			1	—	91	98	95
			2	—	85	89	90
8	20Х+18ХГТ	33	3...6	10Г2М	87...98	85...93	86...100
			1	—	88...90	98	97
			2	—	85...87	99	89...92
9	20Х+18ХГТ	33	3...6	08Х3Г2М	90...101	99...102	90...102
			1	—	85	95	94
			2	—	90	95	100
10	20Х+18ХГТ	33	3...6	10Г2М+20Х4ГМ	85...95	91...95	94...100
			1	—	86	(26)	92
			2	—	90	(26)	101
		33	3...6	08Х3Г2М+20Х4ГМ	86...91	(26...27)	92...101

Примечание. Сталь 20 — в состоянии поставки, $HRB\ 84...86$; 20Х — $HRB\ 88...90$; 18ХГТ — $HRB\ 89...90$.

Таблица 3. Габаритные размеры сварных заготовок валов

№ п/п	Тип вала	D_1	D_2	d_3	L
1	Шарнирный	250	205	108	1410
2	Шлицевой	250	—	160	1150
3	Шарнирный	320	250	192	1045
4	Шлицевой	320	—	166	1016

$\sigma_b = 1104,0 \dots 1255,1$ МПа и могут разрушаться при испытании как по основному металлу, так и по шву.

С учетом результатов исследований разработаны технологии аргонодуговой сварки без послесварочного отпуска пустотелых и частично пустотелых цилиндрических заготовок валов (рис. 4). В соответствии с типоразмерами заготовок валов, режимами и особенностями многослойной сварки охлаждение соединений после сварки до 100°C происходит в течение одного–четырех часов без образования холодных трещин. Плоскостные и объемные, протяженные и непротяженные внутренние дефекты в кольцевых соединениях заготовок ультразвуковым контролем не выявляются. По разработанным технологиям изготовлены четыре промышленные партии шлицевых и шарнирных валов с применением нормализации, цементации, закалки и отпуска (табл. 3).

В заключение можно отметить, что изготовление валов с использованием рационального вида проката (труб), сочетание с помощью технологии сварки круглых заготовок разных диаметров и исключение послесварочного печного отпуска из технологического процесса обеспечи-

вают существенное снижение расхода энергии, металла и труда. Облегченные валы способствуют улучшению эксплуатационных характеристик металлургического оборудования.

1. Самохацкий А. И. Технология термической обработки металлов. — М.: Машгиз, 1962. — 427 с.
2. Технология аргонодуговой сварки корпусов электробуров из стали 40Х / М. М. Савицкий, Ю. А. Стеренбоген, А. Ф. Лупан и др. // Автомат. сварка. — 1990. — № 5. — С. 45–48.
3. Восстановление роторов из высокопрочной стали / В. М. Кулик, М. М. Савицкий, А. Ф. Лупан, Г. М. Мельничук // Там же. — 1995. — № 5. — С. 52–54.
4. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / Под ред. В. И. Труфякова. — Киев: Наук. думка, 1990. — 256 с.
5. Циклическая трещиностойкость сварных соединений высокопрочных сталей / О. П. Остап, А. В. Куповский, В. Е. Лазько и др. // Автомат. сварка. — 1990. — № 7. — С. 8–12.
6. Пат. України 55385. Спосіб зварювання металів і сплавів у середовищі захисних газів / М. М. Савицький, В. М. Кулик, А. П. Лупан, Г. М. Мельничук. — 2003, Бюл. № 4.
7. Пат. України 74936. Спосіб дугового двохпрохідного зварювання кільцевого стику труб / В. М. Кулик, М. М. Савицький, А. П. Лупан та ін. — 2006, Бюл. № 2.
8. Теоретические основы сварки / Под ред. В. В. Фролова. — М.: Высш. шк., 1970. — 592 с.
9. Попов А. А., Попова Л. Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита: Справочник. — М.: Металлургия, 1965. — 495 с.
10. Кулик В. М., Васильев В. Г. Изменение структуры и свойств металла ЗТВ соединений стали 30ХГСА при дуговой обработке // Автомат. сварка. — 2006. — № 7. — С. 19–25.
11. Фазовые и структурные превращения при сварке и дуговой обработке соединений стали 30ХГСА / В. М. Кулик, В. Г. Васильев, Г. М. Григоренко и др. // Там же. — 2007. — № 9. — С. 10–15.
12. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 248 с.

Peculiarities of argon-arc tungsten-electrode welding of shaft billets are considered. Application of an activating flux (A-TIG welding) makes it possible to decrease the depth of the weld groove, which is then filled up with filler metal during the TIG process. It is shown that thermal cycling and auto-heating in multilayer welding lead to decrease in the cooling rate, formation of more equilibrium structures, and prevention of cold cracking. In the as-welded condition, the weld metal has increased hardness and microhardness, compared with the base metal, and after comprehensive heat treatment the welded joint has properties close to those of the base metal.

Поступила в редакцию 27.03.2007



МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ БАНДАЖЕЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ (Обзор)

С. М. КОЗУЛИН, инж., И. И. ЛЫЧКО, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
М. Г. КОЗУЛИН, канд. техн. наук (Тольяттинский гос. ун-т, Россия)

Приведен анализ причин выхода из строя бандажей вращающихся печей в процессе эксплуатации. Рассмотрены существующие методы ремонта сквозных трещин в бандажах без их демонтажа с корпуса печи. Дан сравнительный анализ эффективности выполнения ремонтных работ с применением электродуговой и электрошлаковой сварки.

Ключевые слова: вращающиеся печи, бандажи, трещины, методы ремонта, монтажные условия, сварка электродуговая, автоматическая, электрошлаковая, многослойная электрошлаковая сварка

Основными элементами технологических линий по производству цемента, обжига сырьевых материалов в металлургической, химической промышленности и других являются такие металлоемкие крупногабаритные агрегаты, как вращающиеся печи диаметром 3,6... 7 м и длиной 75...230 м (рис. 1) [1]. В печах, эксплуатируемых в непрерывном режиме, для получения цементного клинкера, извести, гипса, глинозема, металлургических окатышей и др., проводят высокотемпературную обработку сырья. В зависимости от типоразмера номинальная часовая производительность, например, цементных печей составляет 22...125 т клинкера. Поэтому аварийная остановка цементной печи диаметром 5×185 м (только от недовыпуска продукции) приводит к убыткам предприятия, достигающим 75 т клинкера за каждый час простоя.

Корпус вращающейся печи [1] представляет собой относительно тонкостенную ($S = 16...30$ мм) цилиндрическую оболочку с утолщенными подбандажными обечайками ($S = 40...100$ мм), нагруженную по длине усилиями от собственного веса, веса футеровки и веса перерабатываемого материала, и в то же время нагруженную сосредоточенными силами, действующими на площадках контакта между корпусом и бандажами. Сосредоточенные силы вызывают наибольшие напряжения в корпусе и узлах печи в районе опор. В зависимости от длины печи на ее корпусе установлено от четырех до девяти опорных бандажей. В печах диаметром 5 и более метров (в местах установки бандажей) на корпус передается опорная реакция, достигающая 4000 кН и более [2].

Наиболее тяжело нагруженными и аварийноопасными деталями вращающихся печей являются опорные бандажи сплошного прямоугольного сечения, надеваемые на корпус печи с опреде-

ленным радиальным зазором, а также бандажи сплошного фигурного сечения, ввариваемые в корпус печи [3].

Для печей диаметром более 4,5 м широко используются негабаритные бандажи, изготовленные из двух окончательно обработанных литых половин с применением электрошлаковой сварки (ЭШС) на месте монтажа печей [4]. Большинство бандажей изготавливают из среднеуглеродистых сталей 35Л, 30ГСЛ и 34Л-ЭШ. Размеры поперечных сечений сварнолитых бандажей составляют $(355...500) \times (900...1350)$ мм.

К настоящему времени накоплен большой опыт изготовления сварнолитых бандажей в производственных и монтажных условиях из сталей 30Л, 35Л, 25ГСЛ и 30ГСЛ. Оптимальной является технология сборки и сварки окончательно обра-



Рис. 1. Вращающиеся обжиговые печи диаметром 5×185 м с бандажами прямоугольного сечения, установленными на корпусе печи с радиальным зазором (а), и вварными бандажами фигурного сечения (б)



Рис. 2. Типичное разрушение бандажа вращающейся печи в результате образования сквозной поперечной трещины

ботанных половин бандажа в точный размер [5]. Оба стыка бандажа одновременно заваривают ЭШС, после чего осуществляют местную термическую обработку сварных швов с помощью переносных электрических печей.

Полный средний срок службы бандажей должен составлять не менее 21 года при количестве оборотов 0,6...2,0 об/мин и не менее 19 лет при количестве оборотов 2,1...3,5 об/мин [2]. Однако на практике не все бандажи вырабатывают нормативный срок эксплуатации из-за разрушения по поперечному сечению, чрезмерного износа и выкрашивания металла поверхности катания и др.

Многолетняя практика показала, что основной причиной длительного простоя указанных технологических линий является образование сквозных поперечных трещин в бандажах вращающихся печей (рис. 2).

Учитывая, что в странах СНГ насчитывается более 100 цементных заводов, на каждом из которых эксплуатируется две и более технологические линии непрерывного цикла производства, на вращающихся печах в постоянной работе находится более 1200 сварнолитых бандажей. Согласно анкетным данным бюро надежности ЗАО «Волгоцеммаш», являющимся в течение сорока лет головным предприятием по выпуску вращающихся печей, в целом только по цементной отрасли в результате появления трещин ежегодно выходит из строя от трех до семи бандажей, причем в 86 % случаев образуются сквозные трещины [6].

Проведенный статистический анализ показал, что большинство разрушений бандажей наблюдалось на цементных заводах, оснащенных наиболее крупными печами длиной 95 м и диаметром 6,4/7,0 м (около 70 %) для сухого способа про-

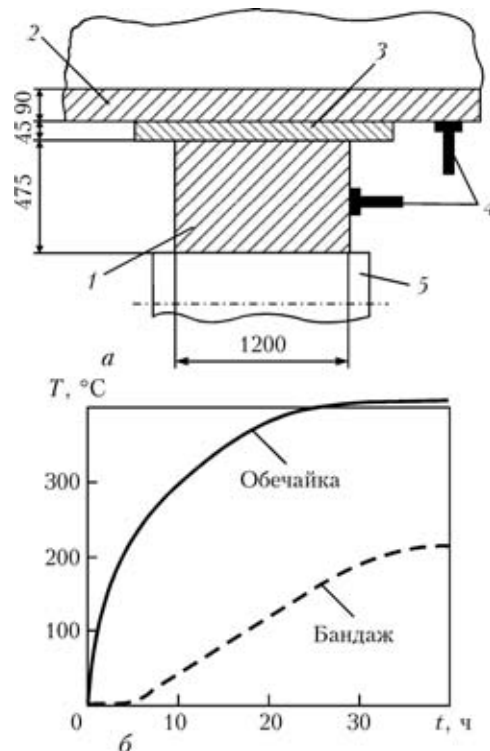


Рис. 3. Схема расположения температурных датчиков (а) и график нагрева (б) бандажа и подбандажной обечайки горячего конца вращающейся печи диаметром 6,4/7×95 м в пусковой период: 1 — бандаж; 2, 3 — соответственно подбандажная обечайка и накладка; 4 — термометры; 5 — ролик подбандажный

изводства цемента. Характерной особенностью эксплуатации этих печей является ускоренный разогрев горячей зоны в пусковой период, что приводит к образованию большой разности температур нагрева подбандажной обечайки и бандажа. При этом в начальный момент (6 ч) в результате нагрева подбандажной обечайки (230 °C) и увеличения ее диаметра ликвидируется заданный радиальный (тепловой) зазор (с 7,5 до 0 мм) между бандажом и обечайкой (рис. 3). С этого момента наступает состояние распора бандажа силами, создаваемыми температурными напряжениями в подбандажной обечайке и наличием собственных напряжений в бандаже от перепада температур по его толщине. Вторым фактором, влияющим на несущую способность бандажей, являются поперечные деформации изгиба от реакций роlikоопор и условия перераспределения механических нагрузок на опорах печи в связи с искажением ее геометрической формы в процессе работы (рис. 4).

Косвенную оценку деформаций изгиба бандажей осуществляют путем измерения поперечных деформаций корпуса печи в районе установки бандажей. Для этого на корпус печи устанавливают механический портативный прибор (деформациограф Д9-А) с магнитным креплением [7], содержащий самопишущее устройство, позволяющее получать в масштабе 100:1 геометрически

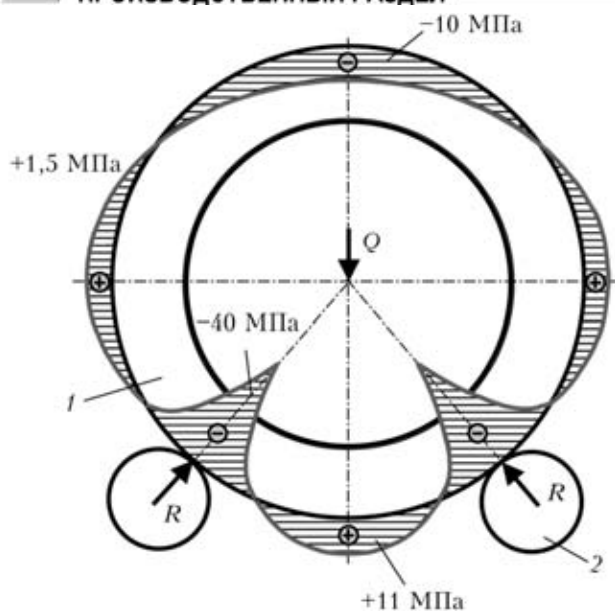


Рис. 4. Эпюра напряжений в наружных слоях бандажа вращающейся печи от реакций роlikоопор (без учета момента вращения): 1 — бандаж; 2 — опорный ролик ($Q = 7,2$ МН; $R = 4,16$ МН)

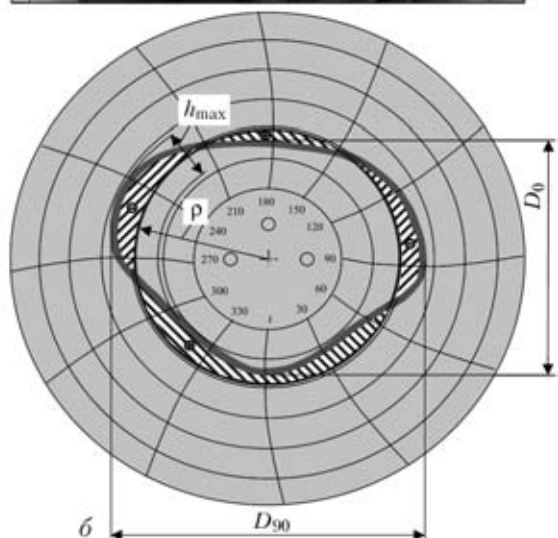


Рис. 5. Фрагмент проведения измерения деформаций (а) и иллюстрация деформациограммы (б) фактического состояния прогиба подбандажной обечайки вращающейся печи диаметром 5,6/5,0×185 м: 1 — бандаж; 2 — подбандажная обечайка; 3 — деформациограф Д-9А; $h_{\max}$ — разность максимальных прогибов; D_0 и D_{90} — вертикальный и горизонтальный размеры деформациограммы (масштаб записи 100:1), мм; r — радиус нейтральной окружности, мм

подобные картины деформаций корпуса в процессе вращения печи (рис. 5, а).

Деформации записывают в поперечных сечениях корпуса, расположенных на расстоянии половины диаметра корпуса печи с обеих сторон от среднего сечения бандажа [7]. В каждом поперечном сечении деформации записывают в трех точках, расположенных равноудаленно на наружной окружности корпуса печи. При этом точки замеров в различных поперечных сечениях располагают на одной и той же образующей корпуса печи (см. рис. 5).

Измерения поперечных деформаций корпусов печей диаметром 5 м и более показали, что наибольшие перегрузки опор, превышающие средние значения более чем в 1,5 раза и приводящие к значительным изгибным напряжениям в бандажах, установленных на подбандажных обечайках с радиальным зазором, возникают на вторых опорах с холодного конца и предпоследних на горячем конце [7].

Измерения прямолинейности корпуса печи выявили значительные искривления ее продольной оси, что повлекло за собой неравномерное распределение нагрузок по опорам [8]. Установлено, что перегрузки опор, возникающие вследствие местного искривления геометрической оси печи в период ее работы, в 2...3 раза превышают расчетные нагрузки.

Очевидно, что при совпадении перегрузок опор и превышении допустимых прогибов возможно развитие трещин, которое в дальнейшем может привести к полному разрушению бандажа. Анализ разрушений бандажей показал, что наиболее часто аварии происходят именно на вторых с краю опорах, а также соседних с ними [7, 9]. Замеры (с участием одного из авторов настоящей статьи) поперечных деформаций корпуса печи диаметром 5×185 м в ПО «Новоросцемент», на которой в горячей зоне установлены сварные бандажи, изготовленные методом ЭШЛ, показали, что деформации данного типа практически отсутствуют, что объяснимо существенным увеличением жесткости корпуса в районе опор. Установка сварных бандажей позволила значительно повысить стойкость футеровки печи. Однако такая конструкция бандажа создает сечение с большим моментом инерции, что неблагоприятно влияет на работоспособность пролетных обечайек. Повышенная жесткость корпуса печи в районе установки сварных бандажей и погрешности установки роlikоопор также часто приводят к перегрузкам опор (наблюдаются отрывы поверхности катания бандажей от роlikоопор), а это к разрушению сварных бандажей. При этом изначально трещины зарождаются в обечайках, к которым приварен бандаж, а затем поражают тело бандажа.

Таким образом, из всего многообразия факторов, отрицательно влияющих на несущую способность бандажей вращающихся печей, в качестве основных можно выделить следующие (рис. 6):

неравномерные температурные нагрузки в результате быстрого нагрева корпуса в пусковой период вращающихся печей диаметром более 5 м и ликвидации радиального (теплого) зазора между бандажом и подбандажной обечайкой;

неравномерное распределение механических нагрузок на опорах вращающихся печей диаметром 5 м и более, вызывающих высокие изгибные напряжения;

ослабление поперечного сечения бандажей в результате наличия скрытых металлургических дефектов в литье и дефектов сварных соединений таких, как неоднородность механических свойств, усадочные раковины, флокены, трубчатые поры, непровары, трещины в сварном шве и др.

Влияние первого фактора уменьшают путем совершенствования технологии эксплуатации обжиговых агрегатов, второго — изменением конструкции опорного узла печи (например, с помощью установки роликоопор на пневмоподушки конструкции ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины) [9], третьего — путем улучшения качества литья заготовок, технологии их сварки, термообработки и совершенствования методов контроля качества при изготовлении бандажей.

Однако и в настоящее время вопрос проведения ремонтных работ вышедшего из строя оборудования на месте его эксплуатации не теряет своей актуальности.

Ремонт таких крупных деталей, как бандажи вращающихся печей, практически невозможен без применения сварки. Восстановительные работы с использованием сварочных процессов всегда были актуальными при ликвидации аварий в технологических линиях с непрерывным циклом производства. В практике известны и применяются два варианта ликвидации последствий образования разрушений в бандажах:

замена разрушившегося бандажа новым [10];
ремонт трещины в бандаже непосредственно на корпусе печи различными способами сварки плавлением (таблица) [11].

Производство работ по первому варианту включает разрезание корпуса печи, снятие бандажа с подбандажной обечайкой, а в ряде случаев — дополнительно снятие двух смежных обечаек, установку новой подбандажной обечайки с новым бандажом и приварку ее к корпусу печи [10]. Этим мероприятиям предшествуют работы по удалению огнеупорной футеровки печи и последующее ее восстановление. В зависимости от готовности и организации работ такой ремонт может длиться от 12 до 60 сут и является наиболее трудоемким и дорогостоящим (таблица, п.1).

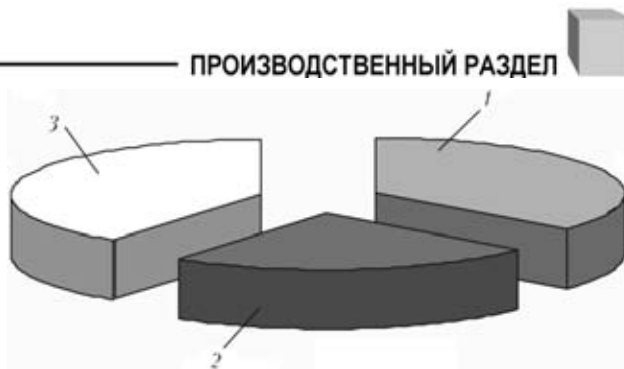


Рис. 6. Диаграмма результатов статистического анализа причин разрушения бандажей вращающихся обжиговых печей: 1 — дефекты сварных швов (36 %); 2 — дефекты литья при изготовлении бандажей (24 %); 3 — нарушения правил эксплуатации печей (40 %)

Известен также метод замены изношенных бандажей, исключаящий разрезание корпуса печи [12]. На одном из цементных заводов США изношенные бандажи вращающихся печей заменяли новыми, выполненными из двух половин. Дефектный бандаж разрезали в горизонтальной плоскости на две части и демонтировали половины. На подбандажную обечайку надевали поочередно две половины нового бандажа, которые временно скрепляли фиксирующим кольцом. Затем обе половины бандажа скрепляли стяжными болтами. После замены фиксирующего кольца стяжные болты заменяли стальными стержнями, которые приваривали изнутри и снаружи. Фиксирующие кольца приваривали к подбандажным пластинам. Вся операция замены изношенного бандажа новым занимала двое суток. Такая технология ремонта применима для печей малого диаметра, где используют бандажи несплошного сечения, однако на практике ни в Украине, ни в СНГ применение бандажей такой конструкции неизвестны.

В большинстве случаев ремонт трещин выполняют по второму варианту, т. е. производят заварку трещин, не снимая бандаж с корпуса печи. Для этого бандаж поворотом корпуса печи устанавливают аварийным местом строго в верхнее положение. Для размещения сварочного оборудования на корпусе печи монтируют площадку с деревянным настилом и брезентовым шатром, изготавливают двухмаршевую лестницу.

Чаще всего трещины в бандаже исправляют с помощью ручной электродуговой сварки покрытыми электродами [13]. В таких случаях разделку трещин производят газопламенной резкой с приданием разделке V или X-образной формы (таблица, п. 2, 3). Для обеспечения провара корня шва применяют медные подкладные пластины толщиной 8 мм. Сварку осуществляют известным способом «горка» от середины стыка к торцам бандажа. Формирование шва по торцам разделки свободное. Сварку выполняют непрерывно и одновременно два сварщика с проковкой каждого слоя шва. Для сварки применяют электроды марки УОНИ-13/55 диаметром 5 мм. Общая длитель-



Способы ремонта трещин в бандажах без их демонтажа с корпуса вращающихся печей

№ п/п	Предприятие, размеры вращающейся печи	Место расположения трещины	Свариваемое сечение, мм	Форма разделки кромок	Объем разделки кромок, см ³	Способ заварки трещины	Машинное время сварки, ч	Масса наплавленного металла, кг	Способ подогрева и термообработки	Общее время ремонта, ч
1	ПО «Вольскцемент», Ø5×185 м	Сварной шов	-	Замена дефектного бандажа новым путем демонтажа бандажного блока с корпуса печи						276...1440
2	ПО «Мордовцемент», Ø5,6/5,0×185 м	Основной металл	1000×400		26000	Ручная сварка покрытыми электродами	105	225	Газовые горелки	290
3	ПО «Акмынцemente», Ø5×185 м	Сварное соединение	1000×400		22000	То же	91	172	Коксовая печь	170
4	Топкинский цементзавод, Ø5×185 м	Околошовная зона	1000×400		24000	Механизированная сварка порошковой проволокой	76	187	То же	126
5	Себряковский цементзавод, Ø5×185 м	Сварной шов	1000×400		30000	То же	106	270	Газовые горелки	291
6	ОАО «Полтавский ГОК», Ø6×60 м	Основной металл, сварное соединение	1118×500		72670	Автоматическая сварка под флюсом	288	567	То же	384
7	Ачинский глиноземный комбинат, Ø5×185 м	То же	1000×450		101250...202500	Автоматическая двухдуговая сварка под флюсом	183...367	790...1580	Электрическая накидная печь	255...440
8	Навоицкий цементзавод, Ø6,4/7,0×95 м	Сварное соединение	1200×475		75600	Автоматическая сварка под флюсом	240	650	То же	864
9	«Tilden Mining Co., USA Ø7,5×48 м	Сварной шов	1016×508		38400	То же	336	306	— " —	504
10	ПО «Брянскцемент», Ø5×185 м	Основной металл	1000×310		12170	Многослойная ЭШС глухих отверстий	16	95	Газовые горелки	72
11	Ново-Спасский цементзавод, Ø6,4/7,0×95 м, Ульяновский цементзавод, Ø5/5,6×170 м	Сварной шов, основной металл	1200×475 1000×450		31350 25030	Однопроходная ЭШС плавящимся электродом	4 2,5	245 196	Электрическая накидная печь	96 96

ность ремонта сквозной трещины в бандаже вращающейся печи диаметром 5×185 м с применением ручной сварки составляет 7...12 сут.

Известен опыт заварки трещин в бандажах с применением механизированной дуговой сварки порошковыми проволоками (табл. 2, п. 4, 5). В этих случаях подварку корня шва производят ручной электродуговой сваркой. При использовании Х-образной формы разделки кромок возникает необходимость вырезки окна в подбандажной обечайке, которую осуществляют после разборки футеровки. Сварку выполняют так же, как и в предыдущем случае, два сварщика одновременно, но в два этапа. Вначале заваривают наружную часть разделки (со стороны поверхности катания бандажа), затем корпус печи поворачивают на 180° и производят заварку оставшейся части разделки внутри корпуса печи через вырезанное окно.

Учитывая, что бандажи изготавливают из углеродистых сталей, а также высокую жесткость закрепления кромок, проведение ремонта требует

предварительного подогрева стыка перед сваркой до температуры 150...200 °С с последующей местной термической обработкой (высокий отпуск для снятия остаточных сварочных напряжений).

Известны способы ремонта трещин в бандажах с применением автоматической сварки под флюсом [14]. Разделку кромок трапециевидной формы производят газокислородной резкой (таблица, п. 6–8). При этом размеры разделки выбирают в зависимости от отклонения трещины от образующей поверхности катания бандажа, а также в радиальной плоскости. Эти отклонения могут достигать 150...300 мм. Кромки зачищают наждачным камнем, затем приваривают выводные планки. Корень шва заваривают ручной сваркой на высоту 20 мм по медной подкладной пластине, которую заводят в зазор между бандажом и корпусом печи, либо вваривают стальную остающуюся пластину. Автоматическую сварку под флюсом выполняли одной дугой с возвратно-поступательным движением аппаратами типа АВС, ТС-

17МУ или одновременно двумя дугами с помощью аппарата А1412. В качестве сварочных материалов используют сварочную проволоку Св-08А и флюс АН-348А. Местную термообработку заваренных швов проводят с помощью нестандартных накидных электропечей или мощных газовых горелок. Общее время восстановительных работ составляет от 11 до 36 сут.

В США для ремонта сквозной трещины, обнаруженной в бандаже обжиговой печи на заводе «Tilden Mining Co.» по производству железных окатышей, использовали технологию и оборудование для сварки в узкий зазор [15] (таблица, п. 9). Трещину вырезали двумя параллельными резами, установив на корпусе печи станок, имеющий дисковую пилу большого диаметра. Размеры прямоугольной разделки кромок следующие: ширина — 76,2 мм, длина — 1016 мм, глубина — 508 мм. Посередине глубины разделки варят стальную пластину толщиной 12 мм. Автоматическую сварку верхней части разделки осуществляли сварочным трактором, снабженным головкой для выполнения сварки в узкий зазор. Внутреннюю часть разделки заваривали одной проволокой марки Lincoln L-61 диаметром 2,72 мм через окно, вырезанное в корпусе печи. Всего потребовалось наложить 900 слоев сварного шва. Перед началом сварки осуществляли предварительный подогрев стыка до температуры 150 °С, а после сварки произвели высокий отпуск при температуре 620 °С с выдержкой в течение 10 ч. Машинное время заварки разделки составило 14 сут, а общее время восстановительных работ — 21 сут.

Приведенные технологические приемы исправления разрушившихся бандажей вращающихся печей имеют следующие существенные недостатки:

- низкая производительность сварочных работ;
- большие трудовые и материальные затраты;
- сложность ведения процесса сварки;
- не всегда обеспечивается стабильное качество металла сварного соединения;
- неудовлетворительные (особоотяжелые) условия гигиены труда исполнителей.

Устранить перечисленные недостатки можно прежде всего, используя для выполнения ремонтных работ ЭШС, которая нашла достаточно широкое распространение при исправлении трещин в крупногабаритных толстостенных металлоконструкциях и деталях машин металлургического, машиностроительного, горно-обогатительного, кузнечно-прессового, прокатного и другого оборудования [16,17]. Например, с применением ЭШС плавящимся мундштуком был успешно произведен ремонт таких уникальных изделий, как цилиндр пресса усилием 9000 т и массой 28 т, изготовленного из стали 35Л, валок листогибочной машины диаметром 750 мм и длиной 11500 мм, разрушившаяся боковина станины па-

кетир-пресса, коленчатый вал привода рабочей клетки стана ХПТ-4,5 и др. [17].

В приведенных примерах применяли каноническую ЭШС плавящимся мундштуком с использованием многоэлектродного специализированного оборудования и мощных источников питания, рассчитанных на работу на токах до 9000 А. При этом проводили демонтаж агрегата и извлечение разрушившейся детали для транспортирования ее частей на производственный участок, имеющий необходимое сварочное оборудование и сборочно-сварочный стенд под ЭШС восстанавливаемых элементов. Такой метод является очень эффективным при выполнении ремонтных работ, проводимых непосредственно на территории машиностроительных заводов. Для ремонта бандажей вращающихся печей на месте их эксплуатации, т. е. в монтажных (практически полевых) условиях, он оказался малоприменимым.

Известны примеры ремонта сквозных трещин в бандажах без их демонтажа с корпуса печи с помощью ЭШС плавящимся мундштуком за один проход [18] (таблица, п. 11). Для осуществления такого метода ремонта потребовалось применение трех аппаратов А-1304 с мощными трансформаторами, что в монтажных условиях вызывает серьезные затруднения в плане организации работ, необходимости подведения сети электропитания большой установленной мощности, а также по технике выполнения ЭШС.

Основными причинами, сдерживающими применение традиционной ЭШС при ремонте бандажей на месте их эксплуатации без демонтажа последних с корпуса вращающейся печи являются:

- отсутствие специализированного малогабаритного оборудования для ЭШС на предприятиях, эксплуатирующих вращающиеся печи;

- отсутствие мобильных бригад, имеющих опыт эффективного проведения ремонтно-восстановительных работ и оснащенных необходимым сварочным оборудованием;

- большие затраты времени и средств на доставку крупногабаритного оборудования для ЭШС; сложности размещения и монтажа многоэлектродного оборудования на большой высоте (более 20 м);

- трудности в обеспечении гарантированного сплавления нижних кромок бандаж из-за конструктивного наклона корпуса печи к горизонту (4...5 %).

По нашему мнению, для проведения ремонтных работ в таких условиях наиболее перспективны способы ЭШС, при которых свариваемый металл по толщине соединяют не за один проход, а путем выполнения нескольких вертикальных слоев в определенной последовательности [19]. Этими способами, несмотря на увеличение машинного времени сварки (по сравнению с тра-

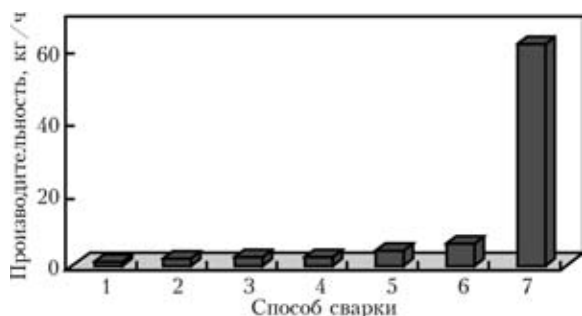


Рис. 7. Зависимость производительности ремонта сквозных трещин в бандажах вращающихся печей от применяемых способов сварки: 1 — автоматическая сварка под флюсом в узкий зазор; 2 — ручная сварка покрытыми электродами; 3 — механизированная сварка порошковой проволокой; 4 — автоматическая сварка под флюсом; 5 — автоматическая сварка под флюсом двумя дугами; 6 — МЭШС пробковыми швами; 7 — ЭШС плавящимся мундштуком

диционной ЭШС за один проход), легче обеспечить гарантированное сплавление нижних кромок. Появляется возможность повысить механические свойства металла сварного соединения за счет эффекта автотермообработки предыдущих слоев последующими [19]. Кроме того, важным является и то, что при многослойной электрошлаковой сварке (МЭШС) можно использовать несложное мобильное малогабаритное оборудование и сварочные источники питания малой мощности, имеющиеся практически на всех предприятиях, эксплуатирующих крупные машины и механизмы.

Известны примеры применения ЭШС в несколько проходов при ремонте крупных изделий в производственных условиях [20–24]. В Германии разработан способ «канальной» ЭШС [20], при котором разделку трещины производили в виде ряда прямоугольных отверстий размером 70×32 мм, образованных пазами на стыкуемых кромках с перегородками из основного металла между ними толщиной 10 мм. Сварку выполняли плавящимся или неплавящимся трубчатым мундштуком с применением электродной проволоки диаметром 2,5 мм. Этим способом была заварена сквозная трещина в бабе молота. Перед началом сварки был осуществлен общий подогрев последней до температуры 400 °С, а затем выполнена последовательная заварка 20 каналов электрошлаковым способом. Известен способ ЭШС [21], при котором разделку трещины на всю глубину производят путем сверления отверстий диаметром 40 мм, оставляя перемычки из основного металла толщиной 10 мм. Известен также прием, когда сварку каждого отверстия производят вращающимся трубчатым плавящимся мундштуком, по которому эксцентрично его оси подают сварочную проволоку [22]. Разработан способ МЭШС по методу «колодцев» [23], при котором разделку трещины осуществляют сверлением отверстий диаметром 50...75 мм, оставляя перемычки толщи-

ной 20...25 мм, а заварку отверстий производят трубчатым плавящимся мундштуком, через который подают три электродные проволоки. С помощью этого метода на Северском трубном заводе была восстановлена станина прокатного стана, в боковой стойке и основании которой образовались две сквозные трещины.

Известен способ [24], при котором разделку трещины производят сверлением отверстий диаметром 50 мм с шагом 0,8...0,9 диаметра, а сварку выполняют удлиненным неплавящимся мундштуком с подачей одной сварочной проволоки диаметром 5 мм. Этот метод был успешно использован для ремонта несквозной трещины в бандаже без его снятия с корпуса вращающейся печи [25] (табл. 2, п. 10). Трещину разделали путем сверления отверстий на всю глубину ее залегания с шагом между осями отверстий 52...53 мм. Для сверления использовали мощный радиально-сверлильный станок, который установили на корпусе печи на специально приваренных тумбах. Стык перед началом сварки нагрели газовыми горелками до температуры 300...350 °С. Для удержания шлаковой ванны в каждое отверстие, смежное свариваемому, устанавливали водоохлаждаемое медное устройство. Производительность ремонта в этом случае повысилась в 3 раза по сравнению с ручной сваркой, показатели ударной вязкости возросли в 2...3 раза за счет эффекта автотермообработки предыдущих слоев последующими, уменьшился объем наплавленного металла [26].

Однако приведенные способы МЭШС, отличающиеся значительными преимуществами перед электродуговыми способами сварки, имеют определенные недостатки, ограничивающие область их применения в монтажных условиях.

Широкого распространения для ремонта сквозных трещин в бандажах вращающихся печей перечисленные выше способы не получили по следующим причинам:

низкая стойкость слоев сварного шва к образованию кристаллизационных трещин, особенно при заварке отверстий глубиной более 100 мм;

сложность разделки трещин механическим путем непосредственно на корпусе печи;

при значительном отклонении трещины от радиального направления, в процессе ее разделки путем сверления отверстий практически невозможно охватить всю область залегания трещины;

трудность исправления сильно разветвленных трещин, а также широкой сетки трещин.

Сравнительный анализ эффективности способов исправления сквозных трещин в бандажах вращающихся печей (рис. 7) показал, что наиболее перспективным технологическим процессом для ремонта разрушившихся бандажей непосредственно на месте их эксплуатации является ЭШС. Однако ее применение сдерживается

рядом приведенных выше причин. Для решения указанной задачи необходима разработка способа ремонта, свободного от указанных недостатков.

Выводы

1. Образованию сквозных трещин в бандажах вращающихся печей способствуют высокие напряжения, вызванные деформациями изгиба, неравномерные температурные нагрузки, нарушения правил эксплуатации вращающихся печей, наличие скрытых дефектов металлургического характера в основном металле, а также дефекты в сварных соединениях.

2. Разрушившиеся бандажи вращающихся печей восстанавливают на месте их эксплуатации различными способами сварки плавлением. Однако способы ремонта сквозных трещин в бандажах электродуговыми способами сварки, как правило, малопроизводительны и не всегда обеспечивают получение качественных сварных соединений, а также требуемых условий гигиены труда. Применение известных способов ЭШС для этих целей более предпочтительно, однако ограничено рядом технических и технологических трудностей.

3. Проблема ремонта сквозных трещин в бандажах вращающихся печей может быть решена с помощью разработки комплекса технологических приемов, включающих эффективный способ подготовки кромок, технику качественной заварки трещин и др., обеспечивающих возможность исправления трещин с большой степенью разветвления.

1. Боганов А. И. Вращающиеся печи цементной промышленности / Под ред. П. В. Левченко, К. А. Долганова. — М.: Машиностроение, 1965. — 319 с.
2. ТУ 22-170-87. Бандажи вращающихся печей. — М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1987. — 27 с.
3. Наседкин И. В. Конструкции бандажей вращающихся печей // Цемент. — 1980. — № 5. — С. 23.
4. Электрошлаковая сварка негабаритных бандажей цементных печей из стали 35 Л / О. О. Розенберг, Л. Н. Коломиец, И. И. Сушук-Слюсаренко и др. // Внедрение новых способов сварки в промышленность. — Киев: Гостехиздат УССР, 1960. — С. 176–193.
5. Сушук-Слюсаренко И. И. Метод получения точных размеров изделий при электрошлаковой сварке. — Киев: УкрНИИТИ, 1969. — 42 с.
6. Козулин М. Г., Сушук-Слюсаренко И. И., Козулин С. М. Многослойная электрошлаковая сварка при ремонте трещин крупногабаритных изделий // Материалы науч. техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Вторые Бенардосовские чтения). — Иваново, 1985. — С. 25–26.

7. Рояк Д. А., Михалев М. Ф., Мурзин А. Ф. Исследование деформированного состояния корпусов вращающихся печей // Тр. Гипроцемента. — 1969. — Вып. 34. — С. 126–174.
8. Билецкий С. М. и др. Искривление оси корпуса вращающейся печи в процессе эксплуатации // Цемент. — 1973. — № 3. — С. 14.
9. Опыт эксплуатации печи размером 5×185 м с опорами на пневмоподушках / С. М. Билецкий, К. Ф. Матвиенко, В. А. Чурюмов и др. // Там же. — 1976. — № 2. — С. 14–15.
10. Дроздов И. Е. Эксплуатация, ремонт и испытание оборудования предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. — М.: Высш. шк., 1979. — 224 с.
11. Козулин М. Г., Сушук-Слюсаренко И. И., Козулин С. М. Технология ремонта трещин в бандажах вращающихся печей // Сб. науч. тр. ВНИИЦЕММАШа. Исследование и создание нового оборудования для производства цемента. — Тольятти. — 1986. — Вып. XXIX. — С. 54–69.
12. Caldwell P. H. Replacing a worn kiln tire is a big job // Rock Products. — 1976. — № 3. — P. 64–66.
13. Кукакин П. А. Заварка трещин на бандаже вращающейся действующей печи размером 4,5×170 м // Свароч. пр-во. — 1968. — № 12. — С. 33–34.
14. Талдыкин Ю. А., Порукевич В. М. Опыт заварки трещин бандажей трубчатых вращающихся печей // Там же. — 1977. — № 10. — С. 40.
15. A Narrow-groove process proves robust in a massive repair. The narrow — groove submerged arc welding process is used to repair a kiln tire / D. Dennis, P. Harwig, V. Fallara et al. // Welding J. — 1999. — № 1. — P. 45–48.
16. Электрошлаковая сварка и наплавка / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1980. — 511 с.
17. Электрошлаковая сварка и наплавка в ремонтных работах / И. И. Сушук-Слюсаренко, И. И. Лычко, М. Г. Козулин, В. М. Семенов. — Киев: Наук. думка, 1989. — 112 с.
18. Козулин М. Г. Технологии ремонта трещин в бандажах вращающихся обжиговых печей // Сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. — Пермь, 2004. — Т. 3. — С. 133–138.
19. Сушук-Слюсаренко И. И. Электрошлаковая сварка и наплавка. — М.: ВИНТИ, 1977. — 81 с. — (Итоги науки и техники; Сер. сварка; Т. 9).
20. Pat. 22086 DDR. Verfahren zum Verhweissen von großen Querschnitten mittels ElektroSchlacke-Schweißung / W. Anders, Maushake W. — Veroeff. 06.10.61.
21. Irausch R., Huttenes K., Becken O. Instandsetzung eines gebrochenen Hammerbaeren mit Hilfe des Kanalschweißverfahrens // Reinstahl-Technik. — 1969. — № 3. — S. 124–133.
22. Brenner W. Fertigungstechnologie beim partiellen Elektro-Schweißverfahren // ZIS-Mitteilungen. — 1965. — № 4. — S. 637–644.
23. Сушук-Слюсаренко И. И., Вергела А. Г., Шевченко Н. Т. Электрошлаковая заварка трещин // Автомат. сварка. — 1969. — № 4. — С. 72–73.
24. А. с. 721288 СССР. Способ электрошлаковой сварки / Д. И. Фильченков, М. Г. Козулин // Открытия. Изобретения. — 1980. — № 10.
25. Козулин М. Г., Фильченков Д. И. Восстановление бандажа вращающейся печи с применением электрошлаковой сварки // Автомат. сварка. — 1977. — № 3. — С. 64–65.
26. Фильченков Д. И., Козулин М. Г., Сушук-Слюсаренко И. И. Исправление дефектов отливок из стали 30ГСЛ многослойной электрошлаковой сваркой // Свароч. пр-во. — 1982. — № 9. — С. 19–20.

The causes for failure of the bands of rotary furnaces in operation are analyzed. The existing methods of repair of the through-thickness cracks in the bands without their dismantling from the furnace body are considered. Comparative analysis of the effectiveness of repair operations with application of arc and electroslag welding is given.

Поступила в редакцию 25.06.2007



ИМПУЛЬСНО-ДУГОВАЯ СВАРКА ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ (Обзор)

А. М. ЖЕРНОСЕКОВ, В. В. АНДРЕЕВ, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлен анализ области применения импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом различных материалов, а также рассмотрены особенности, тенденции и перспективы развития этого процесса сварки. Показано, что указанный способ сварки характеризуется определенными технологическими преимуществами перед другими способами сварки плавящимся электродом в защитных газах и активно применяется в современных высокопроизводительных технологиях.

Ключевые слова: импульсно-дуговая сварка, плавящийся электрод, защитные газы, алюминиевые сплавы, углеродистые стали, легированные стали, комбинированные технологии

В последние годы за рубежом в различных отраслях промышленности значительно возрос объем применения сварки плавящимся электродом в защитных газах. Дальнейшее развитие получил также способ импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом (ИДСПЭ). Первоначально ИДСПЭ в основном применяли для соединения алюминиевых сплавов, в том числе при изготовлении изделий ответственного назначения. В связи с этим у отечественных специалистов-сварщиков сложилось мнение об ограниченном использовании ИДСПЭ для соединения других материалов. Следует отметить, что этот способ сварки качественно отличается от других процессов дуговой сварки плавящимся электродом, например, модулированным током или в углекислом газе с короткими замыканиями дугового промежутка, и применяется прежде всего для управления процессами плавления и переноса металла электрода в различных пространственных положениях в инертных защитных газах или смесях на их основе. При ИДСПЭ рекомендуется использовать сварочный ток средних значений $I_{св} = 50...350$ А, при котором возможен мелкокапельный управляемый перенос металла на сварочном токе докритических значений. Необходимый диапазон частоты импульсов тока, как правило, составляет 30...300 Гц. Существуют две концепции построения источников питания дуги для ИДСПЭ. Одна из них основана на плавлении металла электрода во время прохождения базового тока и переноса образовавшейся капли в момент подачи импульса. Согласно другой базовый ток только поддерживает горение дуги, а импульсный — плавит и переносит электродный металл.

Особенностям технологии ИДСПЭ, а также сварочного оборудования, с помощью которого реализуется этот процесс, посвящено много публикаций, в том числе сотрудников Института электросварки им. Е. О. Патона [1–3]. Цель настоящей работы — провести краткий анализ областей и особенностей применения ИДСПЭ различных материалов, а также тенденций и перспектив дальнейшего развития этого способа сварки.

При ИДСПЭ алюминиевых сплавов разрушение оксидной пленки происходит более полно по сравнению с аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом, а также отсутствуют вольфрамовые включения. Такие преимущества ИДСПЭ, как возможность сварки во всех пространственных положениях при выполнении монтажных швов (управляемый капельный перенос металла электрода), уменьшение тепловложения в металл сварного шва за счет низкого значения среднего тока сварки, а также увеличение скорости сварки, позволили активно внедрять указанный способ для изготовления алюминиевых конструкций различного назначения.

В работе [2] отмечается, что применение ИДСПЭ при изготовлении судовых надстроек из сплава АМг6 толщиной 4...25 мм по сравнению со сваркой неплавящимся электродом позволяет заметно повысить производительность процесса за счет увеличения скорости сварки. При этом имеет место также измельчение микроструктуры металла швов и повышение ее однородности по сравнению со сваркой без импульсов тока. Авторы указывают на возможность получения швов с малыми катетами и увеличения скорости сварки, что приводит к уменьшению деформаций конструкций.

Обеспечиваются высокие показатели качества сварных соединений, полученных ИДСПЭ в инертных газах, кузовов автомобилей из алюминиевых сплавов AlZn5Mg1, АМг3 [4] и полуавтоматической ИДСПЭ автомобильных полуприцепов-минераловозов грузоподъемностью 14 т с кузовом зак-

рытого типа длиной 6,5 м, каркас которого обшит листами из сплава АМгЗ [5].

Эффективно также применение ИДСПЭ алюминиевых сплавов например, сплава АМг6 большой толщины (16, 20, 26, 30 и 50 мм) с узкой разделкой кромок в конструкциях ответственного назначения [6]. ИДСПЭ позволяет избежать явления блуждания катодного пятна по стенкам щелевой разделки (из-за проявления пинч-эффекта импульсная дуга пространственно устойчива) по сравнению со сваркой на постоянном токе. Обеспечивается также равномерное сплавление валиков с боковыми стенками и предыдущим слоем. Авторы работы [6] определили, что при ИДСПЭ вследствие уменьшения погонной энергии, а также сокращения времени контакта жидкой и твердой фаз в зоне сплавления за счет большей скорости сварки образуется значительно меньшее содержание хрупких составляющих, что повышает работоспособность сварных соединений. При ИДСПЭ сплава АМг6 удельная энергия разрушения сварных образцов с острым надрезом по зоне сплавления в 1,5...2,0 раза выше по сравнению с образцами, полученными сваркой трехфазной дугой [6].

Накоплен и используется положительный опыт освоения и внедрения промышленной технологии ИДСПЭ алюминиевых сплавов АМг6 и 1201 на базе разработок Института электросварки им. Е. О. Патона на российских предприятиях ОАО «НПО Композит», ПО «Стрела», ГК НПЦ им. М. В. Хруничева. Благодаря использованию ИДСПЭ существенно уменьшилось количество дефектов на кольцевых и продольных швах, выполненных на конструкциях ответственного назначения.

Применение ИДСПЭ для получения замковых соединений ответственного назначения сплава АМг6 обеспечивает формирование стыка без канавки, что значительно упрощает механическую обработку кромок и их подготовку под сварку [7]. При ИДСПЭ в аргоне и гелии стыковых соединений сплава 1201 толщиной (4 + 4) мм на съемной подкладке, (4 + 10) мм в замок и свыше 50 мм в щелевую разделку достигается образование минимальной зоны термического влияния [8]. При этом расширяется диапазон рабочих токов сварки и обеспечивается необходимое проплавление металла с сохранением постоянной ширины шва и усиления.

Способ ИДСПЭ широко применяется для изготовления топливных баков летательных аппаратов из сплава 1201 и заготовок шпангоутов из сплава АМг6 [9]. Внедрение технологии ИДСПЭ днищ топливных баков летательных аппаратов из алюминиевого сплава АМг6 толщиной 70 мм в гелии вместо ручной аргонодуговой сварки обеспечило снижение дефектов в сварных швах на

30...40 % и увеличение производительности сварочных работ в 4...5 раз. В указанной технологии использовали источник импульсного тока дуги, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона, реализующий концепцию двухступенчатого импульсного тока [10]. Ступень низкого тока импульса с амплитудой I_n и длительностью t_n позволяет расплавлять заданный объем металла на торце электрода, а ступень высокого тока импульса с амплитудой I_b и длительностью t_b дает возможность переносить расплавившуюся каплю во всех пространственных положениях (рис. 1). Базовый ток I_6 поддерживает горение дуги, а плавная регулировка сварочного тока происходит за счет изменения частоты импульсов $f = 1/T$ (где T — период импульсов) (рис. 1).

Известно, что при сварке углеродистых и низколегированных сталей разбрызгивание металла является одним из важных показателей процесса. При сварке в углекислом газе (в зависимости от динамических характеристик источника питания дуги, диаметра электродной проволоки и тока сварки) диапазон потерь электродного металла на угар и разбрызгивание составляет 4,5...12,0 %. При сварке на постоянном токе в смеси на основе аргона, например 82 % Ar + 18 % CO₂, этот показатель снижается до 2,5...6,5 %, а при ИДСПЭ в той же смеси потери еще ниже (1,0...1,5 %). Разбрызгивание металла при таком способе сварки не зависит от сварочного тока и диаметра электродной проволоки, и при оптимальных для данного режима параметрах импульсов сохраняется минимальным во всем диапазоне сварочных токов [11]. В работе [12] отмечается, что ИДСПЭ можно рекомендовать для сварки металлоконструкций из низколегированных сталей, на которых не допускается наличие приваренных брызг электродного металла, тонколистового металла и выполнения швов малого сечения, а также для сварки и наплавки, если необходимо обеспечить небольшую долю основного металла в металле шва. Высокий уровень механических свойств металла швов, выполненных на сталях типа 09Г2С и 15Г2АФ, достигается за счет незначительного содержания неметаллических включений и формирования бла-

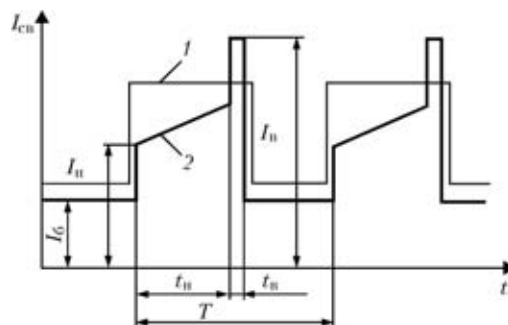


Рис. 1. Импульсы сварочного тока (текущее значение) при ИДСПЭ: 1 — прямоугольные; 2 — двухступенчатые



гоприятной структуры с преобладанием игольчатого феррита. При этом формируется более мелкозернистая микроструктура металла шва, чем при сварке стационарной дугой, а также отмечаются высокие значения ударной вязкости металла шва при отрицательных температурах [13]. В работе [14] указывается на эффективное применение автоматической ИДСПЭ в смеси 82 % Ar + 18 % CO₂ проволокой диаметром 1 мм для изготовления деталей редукторов.

ИДСПЭ позволяет улучшить сварку легированных сталей в вертикальном и потолочном положениях. Благодаря повышению стабильности процесса сварки и мелкокапельному переносу металла можно выполнять качественную сварку на токах, имеющих значения ниже критического, что позволяет соединять тонкий металл проволоками диаметром 1,6 и 2,0 мм. Установлено, что при ИДСПЭ склонность металла швов, выполненных на стали X18Ni10T, к образованию пор и шлаковых включений меньше, чем при обычной аргонодуговой сварке неплавящимся электродом [15]. Микроструктура металла шва измельчена по сравнению с полученной обычной сваркой, наблюдается уменьшение зоны термического влияния. При этом механические свойства металла швов находятся на уровне швов, выполненных сваркой неплавящимся электродом.

Как известно, образование горячих трещин на сталях может быть снижено за счет использования режимов с минимальным выделением теплоты [16]. Поскольку при ИДСПЭ средние значения сварочного тока ниже, чем при сварке на постоянном токе, и возможно использование проволок большего диаметра, то опасность образования горячих трещин уменьшается. Эффективна полуавтоматическая ИДСПЭ легированных сталей, чувствительных к образованию горячих трещин, особенно при большой толщине изделий. В работе [17] приведен пример использования ИДСПЭ для получения сварных соединений сталей G-X5CrNi 174 (17 % Cr и 4 % Ni) и TTSt E 355 без горячих трещин на спиральном корпусе турбины насоса высокого давления. Здесь же описаны технологические особенности и преимущества ИДСПЭ разгрузочного шнека из хромоникелевой стали, а также элементов лопастей крупногабаритной мешалки из стали X10CrNiMoTi 1810. Отмечено, что ИДСПЭ применяется во всех пространственных положениях несущих конструкций из хромоникелевых сплавов толщиной 10...40 мм.

Оборудование и технология ИДСПЭ используются для соединения сплавов на основе меди и титана. ИДСПЭ в аргоне применяли при заварке трещин и раковин на деталях судовых устройств из сплавов меди без демонтажа. В работе [18] отмечено, что при ИДСПЭ в аргоне латуни ЛМцЖ55-3-1 и бронзы Бр.АМц9-2 толщиной

16...24 мм в вертикальном и потолочном положениях улучшается формирование швов, уменьшается вероятность появления несплавов, а также измельчается микроструктура металла швов.

Мелкокапельный перенос металла и снижение критического тока сварки при ИДСПЭ приобретают особое значение при получении соединений титана для обеспечения надежной защиты зоны сварки [19]. С увеличением скорости сварки сокращаются ширина зоны разогрева металла и время его пребывания при высоких температурах, что приводит к снижению сварочных деформаций и улучшению условий защиты от окисления металла шва и обратной стороны сварного соединения. В работе [20] авторы указывают, что при ИДСПЭ титановых листов толщиной 6 мм, к которым в свободном состоянии приваривали ребра с V-образной несимметричной разделкой кромок, повышается производительность и значительно уменьшаются угловые деформации (в 2 раза по сравнению с ручной сваркой неплавящимся электродом). Механические свойства сварных соединений не уступают соединениям, полученным аргонодуговой сваркой. ИДСПЭ позволяет осуществлять сварку титановых сплавов в монтажных условиях в разных пространственных положениях, стабилизировать проплавление, практически устранить разбрызгивание, обеспечить высокие показатели пластичности, прочности и ударной вязкости [21, 22].

Развитие трубопроводного транспорта наряду с высокими показателями механических свойств сварных соединений и увеличением производительности сварочных работ требует применения прогрессивных высокотехнологичных способов сварки. В Канадском институте сварки разработана ИДСПЭ с системой контроля длины дуги [23]. В работах [24, 25] сообщается, что при сооружении магистрального трубопровода при сварке неповоротных стыков для укладки шва, следующего за корневым швом, применение ИДСПЭ с запатентованной функцией контроля дуги позволило уменьшить количество дефектов типа несплавов благодаря улучшению характеристик переноса металла и повысить вязкость металла швов при критическом раскрытии вершины трещины.

В работе [26] предложена ИДСПЭ корневых швов порошковой проволокой с металлическим сердечником в смесях 80 % Ar + 20 % CO₂ или 85 % Ar + 15 % CO₂, а также Ar + 1...5 % O₂. Такая технология позволяет избежать возникновения дефектов типа несплавов и дает возможность сварщику управлять длиной дуги. В отличие от электродной проволоки сплошного сечения порошковая проволока с металлическим порошком способствует получению более широкой свароч-

ной дуги, при этом увеличивается сплавление и эффективно используются преимущества управляемого капельного переноса металла.

Известен опыт применения ИДСПЭ совместно с чередующейся подачей защитных газов [27, 28]. Такой способ сварки низколегированной стали, например 09Г2, позволяет по сравнению с только ИДСПЭ или со сваркой на постоянном токе уменьшить размер зерна на участке перегрева и увеличить содержание игольчатого феррита [27]. Схема такого процесса представлена на (рис. 2). При этом частота подачи защитных газов в зону сварки составляет 1...5 Гц.

В последнее время для сварки в защитных газах активно внедряется так называемая двухдуговая ИДСПЭ [29, 30]. Фирма «Fronius» является одной из передовых в реализации технологии двухдуговой импульсной сварки на установке «Time Twin Digital». Рекомендуемыми областями применения такой установки являются не только автомобильная промышленность и сооружение трубопроводов, но и судостроение, включая работы в открытом море.

В Кренфильдском университете (Великобритания) разработана автоматизированная сварка трубопроводов в сложных условиях окружающей среды, а также при низких температурах. Отмечается, что использование импульсов с соответствующими параметрами позволяет повысить производительность сварки неповоротных стыков при строительстве трубопроводов [30].

В работе [31] исследуется процесс импульсной двухдуговой сварки алюминиевых сплавов и на основании полученных результатов сделан вывод о целесообразном его использовании при односторонней сварке стыковых, замковых, тавровых и нахлесточных тонколистовых соединений, когда необходимо получать швы с большими катетами.

Пока не существует единого мнения о способах стабилизации импульсных дуг при двухдуговой сварке. Предлагаются различные варианты, например, режимы в противофазе, очень малое фазовое смещение или его отсутствие. В работах [32, 33] описан способ синхронизации импульсов с запаздыванием около 0,5 мс импульсного тока задней дуги относительно передней. При этом управление длиной передней дуги выполняется системой частотно-импульсной модуляции, а длиной задней дуги — системой задержки амплитуды импульса. Обращено внимание на такие важные факторы, как расстояние между дугами и допустимое содержание углекислого газа в смеси на основе аргона. В работе [34] установлено, что при двухдуговой сварке импульсными дугами низкоуглеродистой и нержавеющей сталей для обеспечения стабильности процесса необходим незначительный (до 1 мс) фазовый сдвиг между дугами.

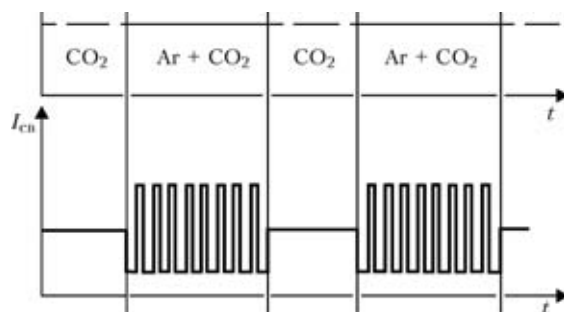


Рис. 2. Схема ИДСПЭ с модуляцией по току и виду защитных газов

В настоящее время развивается способ лазерно-дуговой сварки, который позволяет по сравнению с обычной сваркой в защитных газах достигать высоких скоростей сварки, получать более глубокое проплавление и хорошие механические свойства сварных соединений. При этом использование дугового процесса снижает мощность пучка лазера, что приводит к уменьшению стоимости всей установки. Такие технологии находят применение в автомобильной промышленности [35]. Из-за низкого разбрызгивания, характерного для ИДСПЭ, использование этого способа в указанных технологиях предпочтительнее, поскольку исключается загрязнение оптической системы лазера. Существует опыт применения высокоскоростной сварки (двухдуговая ИДСПЭ + импульсная дуга-лазер) листов большой толщины. В этой технологии используются уже три импульсные дуги с плавящимся электродом [36].

Таким образом, обзор областей и масштабов применения ИДСПЭ доказывает высокую эффективность применения этого способа для соединения различных материалов, когда необходимо обеспечить управляемый перенос металла электрода во всех пространственных положениях с небольшими потерями на разбрызгивание. Актуальность применения данного способа сварки подтверждается современным развитием технологии и сварочного оборудования, базирующихся на нем.

1. Патон Б. Е., Потапьевский А. Г., Подола Н. В. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с программным регулированием процесса // Автомат. сварка. — 1964. — № 1. — С. 1–6.
2. Потапьевский А. Г., Лапчинский В. Ф., Вайнерман А. Е. Импульсно-дуговая сварка алюминиевых сплавов. Сер. Прогрессивное формообразование. — Л.: Об-во «Знание», 1966. — 46 с.
3. Воронай Н. М., Илюшенко В. М., Ланкин Ю. Н. Особенности импульсно-дуговой сварки с синергетическим управлением параметрами режимов // Автомат. сварка. — 1999. — № 6. — С. 26–32.
4. Kiesche M. Einsatz des MIG-Impulsschweißverfahrens beim Schweißen von Fahrzeugaufbauten aus Aluminiumlegierungen // ZIS-Mitteilungen. — 1982. — 24, № 6. — S. 669–674.
5. Сварной алюминиевый кузов автомобильного полуприцепа-минераловоза / В. Г. Игнатъев, Ю. Г. Каплуненко, М. П. Пашуля и др. // Сварка цветных металлов. — Киев: Наук. думка, 1989. — С. 39–42.



6. Барабохин Н. С., Шиганов Н. В., Иванов В. Я. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом сплава АМг6 больших толщин // Свароч. пр-во. — 1973. — № 3. — С. 16–18.
7. Импульснодуговая сварка плавящимся электродом замковых соединений из сплава АМг6 / В. В. Слюсаревский, Д. Г. Луцай, В. К. Лайков и др. // Автомат. сварка. — 1981. — № 7. — С. 49–50.
8. Сварка плавящимся электродом сплава 1201 / Ю. А. Рябец, В. И. Завируха, В. А. Остапов и др. // Сварка цветных металлов. — Киев: Наук. думка, 1989. — С. 28–32.
9. Сварка конструкций летательных аппаратов из алюминиевых сплавов больших толщин / О. Н. Кудряшов, О. М. Новиков, И. В. Алексеев и др. // Свароч. пр-во. — 2001. — № 12. — С. 31–33.
10. А. с. 4696750/27 СССР, МКП⁵ В 23 К 9/09. Источник тока для импульсно-дуговой сварки / В. М. Павшук, П. П. Шейко. — Оpubл. 07.10.91, Бюл. № 37.
11. Killing R. Schutzgase zum Lichtbogenschweißen — schweißtechnische Eigenschaften // Praktiker. — 1993. — № 8. — S. 448–455.
12. Импульснодуговая сварка низколегированных сталей плавящимся электродом в смеси аргона с углекислым газом / С. Т. Римский, В. Г. Свечинский, П. П. Шейко и др. // Автомат. сварка. — 1993. — № 2. — С. 38–41.
13. Бучинский В. Н., Вороний Н. М. Особенности импульснодуговой сварки сталей в смеси аргона с углекислым газом // Там же. — 1978. — № 3. — С. 42–45.
14. Bouandel M. Getriebeteil vollmechanisch metall-aktievogeschweißt // Praktiker. — 1991. — 43, № 11. — S. 612, 614.
15. Потапьевский А. Г., Бучинский В. Н. Импульсно-дуговая сварка нержавеющей стали X18H10T // Автомат. сварка. — 1965. — № 9. — С. 30–33.
16. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
17. Aichele G. Die Anwendung der Impulstechnik — Metall-Aktivgasschweißen // Praktiker. — 1989. — 41, № 4. — S. 174, 177, 178.
18. Импульсно-дуговая сварка сплавов меди / Л. А. Агарков, А. Г. Потапьевский, А. А. Будаи, А. П. Таран // Судостроение. — 1968. — № 9. — С. 63–66.
19. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / Под ред. В. Н. Замкова. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
20. Полуавтоматическая импульсно-дуговая сварка титановых сплавов плавящимся электродом / Б. В. Кудояров, А. А. Николаев, В. М. Поляков, Э. И. Явно // Свароч. пр-во. — 1970. — № 11. — С. 17–19.
21. Гуревич С. М. Справочник по сварке цветных металлов / Отв. ред. В. Н. Замков. — Киев: Наук. думка, 1990. — 512 с.
22. Блащук В. Е., Шеленков Г. М. Сварка плавлением титана и его сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2005. — № 2. — С. 38–46.
23. The development and application of pulsed FM-GMA welding / A. Ditschun, D. Dorling, A. Glover et al. // First Intern. conf. on advanced welding systems, London, 19–21 Nov., 1985. — Abington, 1987. — P. 301–309.
24. Dorling D. Applying pulsed GMA welding to pipeline construction // Welding J. — 1992. — 71, № 10. — P. 39–44.
25. Gas metal arc welding used on mainline 80 ksi pipeline in Canada / D. V. Dorling, A. Loyer, A. N. Russell, T. S. Thompson // Ibid. — 1992. — 71, № 5. — P. 55–61.
26. Sol A. M. Pulsed MIG metal-cored wire welding replaces TIG root pass // Joining and Materials. — 1989. — № 7. — P. 372–376.
27. Шейко П. П., Жерносеков А. М., Шевчук С. А. Технологические особенности сварки плавящимся электродом низколегированных сталей с чередующейся подачей защитных газов // Автомат. сварка. — 1997. — № 8. — С. 32–36.
28. Kusch M. Metall-Innertgasschweißen von Aluminium mit gepulster Schutzgaszufuhr // Schweißen und Schneiden. — 2006. — 56, № 1. — S. 19–22.
29. Martin M. MAG-Tandemschweißen fuer die Plattierung aus Alloy B2 // Praktiker. — 2002. — № 11. — S. 404–407.
30. Автоматизированная сварка трубопроводов: Сварка за рубежом // Автомат. сварка. — 2005. — № 1. — С. 52–56.
31. Иценко А. Я., Машин В. С., Паулюс М. П. Технологические особенности двухдуговой импульсной сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов // Там же. — 2005. — № 1. — С. 14–18.
32. Occurrence of arc interference and interruption in tandem pulsed GMA welding-study of arc stability in tandem pulsed GMA welding (Rep. 1) / T. Ueyama, T. Ohnawa, M. Tanaka, K. Nakata // Quarterly J. of Japan Welding Soc. — 2005. — 23, № 4. — P. 515–525.
33. Solution to problem of arc interruption and stable arc length control in tandem pulsed GMA welding-study of arc stability in tandem pulsed GMA welding (Rep. 2) / T. Ueyama, T. Ohnawa, T. Uezono et al. // Ibid. — 2005. — 23, № 4. — P. 526–535.
34. Tandem MIG/MAG welding / S. Goecke, J. Xedegard, M. Lundin, H. Kaufmann // Svetsaren. — 2001. — 56, № 2/3. — P. 24–28.
35. Штайнфер Х., Хакль Х. Лазерно-дуговая сварка в автомобильной промышленности // Автомат. сварка. — 2001. — № 12. — С. 29–32.
36. Stauffer H., Ruehrnoeßl M. Fuer große Blechdicken und hohe Schweißgeschwindigkeiten: Laserhybrid- + Tandemschweißen // Praktiker. — 2006. — № 10. — S. 300–302.

Analysis of the field and peculiarities of application of pulsed-arc metal-electrode welding of different materials is described, and trends and prospects of its development are considered. It is shown that this welding method is characterised by certain technological advantages over other gas-shielded metal-electrode welding methods, and is extensively applied in modern high-productivity technologies.

Поступила в редакцию 10.05.2007

СОВРЕМЕННЫЙ РЫНОК ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ СВАРКИ И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

В. Н. БЕРНАДСКИЙ, В. Д. ШЕЛЯГИН, кандидаты техн. наук, **О. К. МАКОВЕЦКАЯ**, канд. экон. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены современное состояние и уровень производства промышленных лазеров и лазерных систем для обработки материалов, объем мирового и региональных рынков лазерного оборудования, а также рынка лазерного сварочного оборудования.

Ключевые слова: промышленные лазеры, лазерные системы, производство, рынок, сварочное оборудование

■ Лазерная техника и лазерные технологии — это современное и динамично развивающееся научно-технологическое направление, во многом определяющее уровень различных областей применения, включая медицину, информатику, телекоммуникации и обработку материалов. Лазерные технологии стали основой инновационного развития многих наукоемких отраслей производства, например, автомобилестроения, а современная микроэлектроника вообще невозможна без лазерных технологий. Иными словами, применение лазера и лазерных систем при обработке и соединении материалов привело к возникновению в ряде случаев безальтернативных областей их технологического применения и создала условия для реализации принципиально новых конструктивно-технических решений.

Универсальность лазерного излучения как технологического инструмента проявляется в том, что его можно применять для выполнения целого перечня технологических процессов — резки, сварки, термообработки, поверхностного легирования, прошивки отверстий, очистки поверхностей, наплавки, маркировки и др. Применение волоконной оптики для транспортировки луча значительно расширяет технико-технологические возможности лазерных систем [1].

Лазерная техника и технологии обработки материалов обеспечивают высокую производительность труда и качество, экономию энергии и материалов, расширяют возможности применения в конструкциях труднообрабатываемых материалов при одновременной гарантии экологической чистоты производства. Эти и другие факторы способствовали тому, что технологические лазеры и лазерные системы нашли широкую и эффективную сферу применения и в сварочном производстве.

■ Современная лазерная техника на мировом и региональном рынках представлена двумя большими группами — лазерами и лазерными системами [2]. Они предназначены непосредственно для обработки материалов и классифицируются как промышленные или технологические лазеры и лазерные системы. В свою очередь, промышленные лазерные системы разделяются на два класса: лазерные системы для макрообработки материалов, к которым отнесены системы для сварки, резки, маркировки, гравировки, обработки, упрочнения и обработки поверхности материала; лазерные системы для микрообработки, которые включают системы, используемые в полупроводниковой промышленности, производстве микроэлектроники и печатных плат, а также системы на эксимерных лазерах для микролитографии.

В 2006 г. общемировой объем продаж лазеров и лазерных систем составил около 50 млрд евро. Сектор промышленных лазеров и лазерных систем для обработки материалов на мировом рынке лазеров сравнительно невелик и составляет около 15 % (табл. 1), но темпы его ежегодного роста достаточно велики. Так, за прошедшие 10 лет

Таблица 1. Структура мирового рынка лазеров и лазерных систем по областям их применения, 2006 г. [2]

Области применения	Лазеры, млрд евро	Лазерные системы, млрд евро
Телекоммуникации	1,21	9,5
Обработка материалов	2,0*	5,8**
Микролитография	—	5,1
Информационные технологии (офисная и бытовая техника)	1,29	21,0
Медицина	0,54	1,3
Научные исследования и разработки	0,41	2,0
Всего	5,45	44,7

* Включая микролитографию.

** Не включены лазеры, лазерные системы для микролитографии.

**Таблица 2. Мировой рынок промышленных лазеров и лазерных систем [3]**

Наименование	2005	2005/2004, %	2006	2006/2005, %	2007*	2007/2006, %
Количество, шт.	35 165	12	37 525	6	39 955	6
Лазеры, млн дол.	1 241	6	1 322	6	1 405	6
Лазерные системы, млн дол.	4 318	16	4 710	9	5 150	9
* Прогнозная оценка.						

Таблица 3. Мировой объем производства промышленных лазеров, шт. [3]

Тип лазера	2005	2006	2006/2005, %	2007*	2007/2006, %
СО ₂ -лазер	19 940	21 800	9	23 320	7
Твердотельный	11 275	9 725	-14	9 285	-4
Волоконный	3 475	5 450	57	6 750	31
Другие	475	550	16	600	9
Всего	35 165	37 525	7	39 955	6
* Прогнозная оценка.					

объем продаж возрос на 180 %. Общая структура мирового рынка лазеров и лазерных систем по областям их технологического применения представлена в табл. 1.

Достаточно полное и достоверное представление о нынешнем состоянии мирового рынка промышленных лазеров и лазерных систем дали результаты маркетинговых исследований, выполненных по инициативе журналов «Industrial Laser Solution» [3] и «Laser Focus World»*. Согласно данным этих исследований, в 2006 г. на мировом рынке было продано 37 525 ед. промышленных лазеров и лазерных систем на сумму более 6 млрд дол. В табл. 2 представлены данные, полученные благодаря этим исследованиям, об объемах продаж и динамике их роста за период 2005–2006 гг., а также прогнозная оценка на 2007 г.

По оценкам экспертов, 2006 г. был успешным для производителей промышленных лазеров и лазерных систем. В среднем доход от продаж промышленных лазеров возрос на 7 %, а лазерных систем — на 9 %. Такой же темп развития рынка промышленных лазеров (6...9 %) дает и прогнозная оценка на 2007 г. Ожидается, что объем продаж в этом году составит около 40 тыс. ед. оборудования. Оценивая рынок промышленных лазеров в 2006 г., эксперты также отмечают, что почти все произведенные лазеры продавались в составе лазерных систем, т. е. на мировом рынке уже наметился определенный дефицит единичных лазеров, необходимых, в частности, для их замены при ремонте технологических систем.

* Результаты маркетинговых исследований фирмы «Opetch Consulting» и «Industrial Laser Solution», приведенные в настоящей статье, имеют некоторые расхождения.

Последнее десятилетие характеризуется не только ростом объема производства технологических лазеров, но и увеличением количества их типов, расширением диапазона их мощности и технологических возможностей. В табл. 3 представлены количественные показатели мирового производства основных типов промышленных лазеров, в том числе предназначенных и для лазерных технологических систем [3].

Для современного и динамичного рынка лазеров характерно непрерывное перераспределение объемов производства различных типов лазеров. Так, производство СО₂-лазеров пока сохраняет свое ведущее положение на лазерном рынке и достаточно высокий (9 %) рост (табл. 3), что обуслов-

лено увеличением спроса на маломощные СО₂-лазеры, объем продаж которых в 2006 г. составил почти 60 % общего количества реализованных СО₂-лазеров.

В секторе твердотельных промышленных лазеров (на основе алюмоиттриевого граната с оптической ламповой или диодной накачкой) идет заметное снижение производства (-14 % в 2006 г.) и объема продаж (9 % в 2006 г.). В первую очередь это связано с ростом производства прогрессивных волоконных лазеров, который в 2006 г. составил 5 450 ед., или 57 % объема их производства в 2005 г. (табл. 3).

В секторе технологических лазеров малой мощности волоконные лазеры в настоящее время составляют серьезную конкуренцию твердотельным лазерам с оптической накачкой, отбирая существенную долю рынка, особенно в группе технологических лазеров для маркировки. Мощные волоконные лазеры — это реальная альтернатива мощным СО₂-лазерам, в частности, за счет более высокого КПД, стабильной выходной мощности, малой производственной площади, возможности транспортировки лазерного луча по оптическому световоду на расстояние до 300 м. Такому положению соответствует и динамика сегмента волоконных лазеров: на 2007 г. специалисты прогнозируют количественный рост их выпуска на 31 %.

Производство диодных и эксимерных лазеров мощностью 1...4 кВт (в табл. 3 «Другие») в 2006 г. возросло на 16 %, и в будущем этот сегмент лазерного рынка, по-видимому, сохранит ежегодный прирост в среднем на 8...12 % [3].

Если в табл. 3 дана количественная оценка мирового рынка промышленных лазеров и лазерных

Таблица 4. Объемы продаж (млн дол.) на мировом рынке лазерной техники в 2006 и 2007 гг. [3]

Тип лазера	Лазеры				Лазерные системы			
	2006	2006/2005, %	2007*	2007/2006, %	2006	2006/2005, %	2007*	2007/2006, %
СО ₂ -лазер	696	10	751	8	2 545	9	2 850	12
Твердотельный	431	–9	411	–5	1 680	0,3	1 670	–0,06
Волоконный	147	61	190	29	380	65	495	30
Другие	48	20	53	10	105	21	127	20
Всего	1 322	7	1 405	6	4 710	9	5 142	9
* Прогнозная оценка.								

систем и его структуры, то в табл. 4 представлены стоимостные показатели продаж основных типов единичных лазеров и лазерных систем.

По данным табл. 3 и 4 можно судить и о средней стоимости промышленных лазеров различного типа и мощности, а также о том, что средняя стоимость комплектной лазерной системы примерно в 4...5 раз превышает стоимость единичного лазера того же типа. Приведенные выше данные (табл. 3, 4) также отражают происходящую перестройку рынка промышленных лазеров как между его отдельными секторами, так и внутри каждого из них, что связано не только с конъюнктурой спроса, но и в значительной мере с ростом производства и потребления прогрессивных волоконных лазеров. Это нашло свое отражение и в статистической информации: производители и маркетологи сочли необходимым выделить волоконные лазеры из общего объема выпуска и продаж твердотельных лазеров в самостоятельный сектор.

■ Создание волоконных лазеров является одним из наиболее значительных достижений современной лазерной физики и волоконной оптики конца XX в., позволившим разработать новый высокотехнологический инструмент для обработки материалов. Далее этот тип промышленных лазеров рассматривается более подробно.

Непрерывные волоконные лазеры на основе активных волокон световода, легированных ионами редкоземельных металлов (иттербия и эрбия) отличаются рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными лазерами, которые, в частности, оказываются в настоящее время вне конкуренции в области лазерной сварки, резки и сверления. Длина волны λ волоконного лазера с иттербиевым легированием оптоволокна составляет 1,07...1,12 мкм, что обеспечивает более эффективное взаимодействие излучения с металлами, чем излучение СО₂-лазеров ($\lambda = 10,6$ мкм). В волоконных лазерах достигнуто уникальное качество выходных пучков, определяемое показателем BPP (beam parameter product) или постоянной пре-

Таблица 5. Сравнение промышленных лазеров различных типов [7]

Параметр	Требуется для использования в промышленности	СО ₂ -лазеры	YAG:Nd с ламповой накачкой	YAG:Nd с диодной накачкой	Диодные лазеры	Волоконные лазеры
Выходная мощность, кВт	1...30	1...30	1...5	1...4	1...4	1...30
Длина волны, мкм	Как можно меньше	10,6	1,064	1,064 или 0,03	0,80...0,98	1,07
BPP, мм·мрад	<10	3...6	22	22	>200	1,3...14
КПД, %	>20	8...10	2...3	4...6	25...30	20...25
Дальность доставки излучения волоконном, м	10...300	Отсутствует	20...40	20...40	10...50	10...300
Стабильность выходной мощности	Как можно выше	Низкая	Низкая	Низкая	Высокая	Очень высокая
Чувствительность к обратному отражению	Как можно ниже	Высокая	Высокая	Высокая	Низкая	Низкая
Занимаемая площадь, м ²	Как можно меньше	10...20	11	9	4	0,5
Стоимость обслуживания, отн. ед.	То же	1,0...1,5	1	4...12	4...10	0,1
Периодичность замены ламп или лазерных диодов, ч	Как можно больше	—	300...500	2000...5000	2000...5000	>50 000



Рис. 1. Структура мирового рынка технологических волоконных лазеров по областям применения (2006 г.) [6]

образования пучка Q ; для волоконного лазера мощностью $P = 10$ кВт ВРР (Q) $< 4,5$ мм·мрад [4–7].

В табл. 5 дано сравнение основных технических параметров непрерывных лазеров различных типов, что позволяет четко проследить преимущества волоконных лазеров [4].

Наиболее существенным и, пожалуй, единственным фактором, ограничивающим широкое применение, а следовательно, и реализацию мощных технологических волоконных лазеров является их высокая стоимость. Еще несколько лет назад их стоимость составляла 150...450 дол. за 1 Вт мощности, но уже в 2006 г. наметилась тенденция снижения стоимости единичных лазеров. Волоконные лазеры отличаются высокой компактностью; габаритные размеры базового (1 кВт) модуля (типа YLR-1000) составляют 60×79×110 см. Малые размеры и масса лазеров этого типа, воздушное или водяное охлаждение с очень незначительным расходом воды обеспечивают их высокую мобильность и эксплуатационную привлекательность. Кроме того, мощный волоконный лазер при оснащении его оптическим переключателем может обслуживать одновремен-

но от 2 до 6 технологических установок для сварки или резки. При этом общая стоимость такого комплекса существенно ниже, если сравнить его с набором технологических установок, каждая из которых оснащена своим лазером [1, 7].

Мощные волоконные лазеры обеспечивают однопроводную сварку стали толщиной 4 мм со скоростью 7 ($P = 6,9$ кВт) и 4 м/мин ($P = 4,0$ кВт). Волоконные лазеры позволяют также выполнять высококачественную резку металла со скоростью в 3...5 раз выше, чем CO_2 -лазеры той же мощности. Так, даже относительно маломощные ($P = 100$ Вт) волоконные лазеры позволяют резать сталь толщиной 1,5 мм со скоростью 4 м/мин [4]. В настоящее время в ряде стран ведется проработка инновационных проектов по созданию эффективных технологий сварки на основе мощных волоконных лазеров и в комбинации их с электрической дугой или плазмой (гибридные процессы) применительно к производству сварных труб большого диаметра (1220...1420 мм), а также в области судостроения, энергетического и транспортного машиностроения, аэрокосмического производства и др.

Технологические и во многих случаях экономические преимущества волоконных лазеров ныне обеспечивают значительный общий потенциал роста всего рынка промышленных лазеров и лазерных систем. По мнению экспертов, средний ежегодный темп прироста сектора волоконных лазеров в пределах 30...40 % сохранится на ближайшую перспективу и уже в недалеком будущем объем продаж волоконных лазеров, имеющих весьма высокую единичную стоимость, достигнет рубежа в 1 млрд дол. [4]. Такой рост сопровождается расширением областей технологического применения волоконных лазеров (рис. 1).

Наряду с рассмотрением общей характеристики мирового рынка промышленных лазеров и лазерных систем, представляет несомненный интерес и региональное распределение их производства и потребления. Общая картина распределения объемов производства промышленных лазеров и доходов от их реализации по таким трем основным регионам мира, как Западная Европа, Северная Америка и Восточная Азия (Китай, Япония и Республика Корея), представлена на рис. 2.

Рис. 2 наглядно иллюстрирует, что основным регионом-производителем промышленных лазеров являются Северо-Американский регион (США и Канада), где сосредоточено производство более половины (51 %) общемирового количества поставляемых на рынок промышленных лазеров. Второе место занимает Западная Европа, а третье — страны Восточной Азии. По стоимостному объему или доходу первое место занимает Европа (46 %), что связано с различной специализацией предприятий этих трех регионов по производству

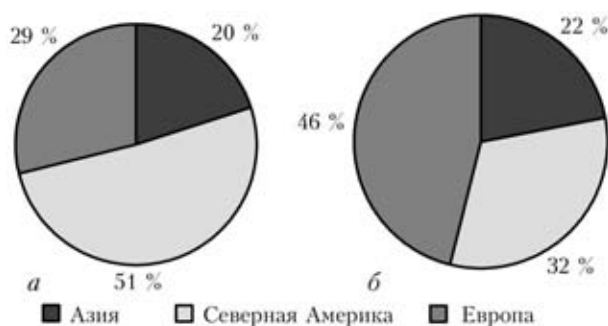


Рис. 2. Доля объема производства (а) и продаж (б) промышленных лазеров по регионам мира (2006 г.) [3]

разных типов промышленных лазеров, существенно отличающихся стоимостью единицы продукции.

Структура мирового производства различных типов промышленных лазеров и лазерных систем по упомянутому выше трем регионам представлена на рис. 3. Северная Америка является бесспорным лидером по количеству производимых и поставляемых на рынок промышленных лазеров, в их числе 82 % волоконных и 57 % CO₂-лазеров. Из числа последних маломощные лазеры составляют до 80 %. Именно значительный рост количества выпускаемых в Северо-Американском регионе маломощных лазеров позволил увеличить в 2006 г. долю продаж до 32 % (см. рис. 2, б), что на 2 % больше чем в 2005 г. В этом же регионе весьма значительно развивается производство твердотельных алюмоиттриевых (35 %), эксимерных и диодных (полупроводниковых) лазеров (34 %) малой мощности (рис. 3).

Второе место в мире по производству промышленных лазеров и лазерных систем уверенно занимают страны ЕС (15 %), за исключением волоконных лазеров. Европа доминирует в производстве мощных твердотельных лазеров (42 и 61 %) (рис. 3) и мощных CO₂-лазеров, при их сравнительно небольшой доле (23 %) (рис. 3) от объема общемировых поставок. Высокая доля в продажах в первую очередь мощных твердотельных лазеров, имеющих значительную стоимость, вывели Западно-Европейский регион в лидеры по общему стоимостному объему продаж (46 %) (см. рис. 2, б) промышленных лазеров.

Доля стран Азиатского региона по объемам производства технологических лазеров и систем, а также по стоимостным объемам их продаж в 2006 г., как и в предыдущие годы, составляла 22...23 % (см. рис. 2, а) общемирового объема продаж. При этом (рис. 3) практически сохраняется приблизительный паритет выпуска CO₂-лазеров (20 %) и твердотельных лазеров (28 %).

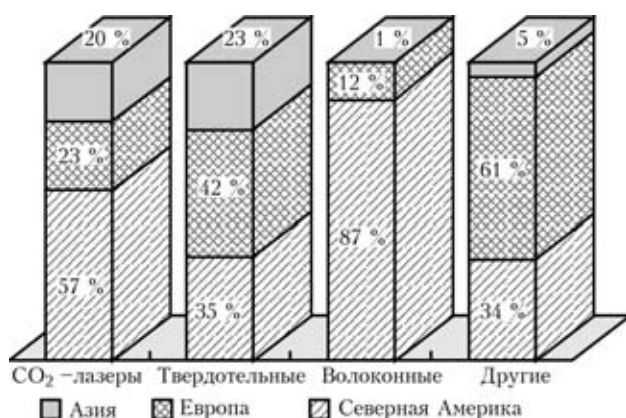


Рис. 3. Структура производства промышленных лазеров и лазерных систем в отдельных регионах мира (2006 г.) [3]

Промышленные лазеры и лазерные системы составляют существенную долю во внешней торговле. Крупнейшие мировые производители технологических лазеров, отличающиеся определенной специализацией, расположены в Германии, США и Японии. Это находит свое отражение в объемах продаж лазеров и лазерных систем как для внутреннего потребления, так и на экспорт. На рис. 4 представлены данные, отражающие долю установленных в 2006 г. промышленных лазеров и лазерных систем в различных регионах и странах мира.

В первую очередь обращает внимание тот факт, что более трети (37 %) общемирового потребления промышленных лазеров и лазерных систем приходится на страны Восточной Азии, основная доля (23 %) — на Японию и 14 % — на такие страны, как Китай, Республика Корея и Индия. В 2006 г. практически одинаковые объемы (по стоимости) промышленных лазерных систем были установлены в Северной Америке (25 %) и Западной Европе (24 %). В Северной Америке основным потребителем являются ведущие отрасли промышленности США, а в Западной Европе — промышленность Германии. На долю Германии приходится более 35 % общеевропейского объема потребления и установки промышленных лазеров и лазерных систем. Далее по количеству установленных в 2006 г. технологических лазерных систем следует Испания, Франция, Бельгия. В Италии, Великобритании и Швейцарии в 2006 г. отмечено снижение объема закупок лазерных систем.

Учитывая рост инвестиций со стороны ЕС в страны Восточной Европы, там в последние годы возрос объем приобретения промышленными фирмами лазерных систем до 9 % [7]. В число «других» стран (рис. 4), на которые приходится 5 % общего количества установленных лазерных систем, входит и Россия, одна из немногих стран СНГ сохранивших научно-технический потенциал в области лазерных технологий, отвечающий

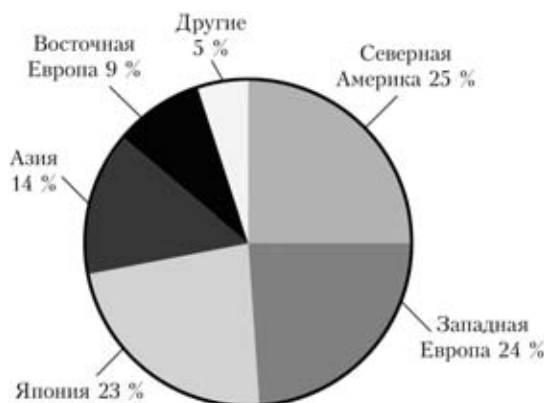


Рис. 4. Доля установленных в 2006 г. промышленных лазеров и лазерных систем в отдельных регионах мира [3]



уровню мировых лидеров. В России постепенно наращиваются мощности по производству лазерной техники: лазерное и оптоэлектронное оборудование сегодня выпускают более 200 российских предприятий, которые поставляют в основном на внутренний рынок более 190 моделей лазерного технологического оборудования [8, 9].

■ В 2006 г., как отмечалось выше, на общем мировом рынке промышленных лазерных систем 87 % составляли лазерные макросистемы и только 13 % микросистемы. Среди промышленных лазерных макросистем доминируют технологические макросистемы для маркировки и гравировки — 44 % всего количества произведенных лазерных систем. Значительная доля приходится на промышленные лазерные системы для резки (25 %), сварки (12 %), а также поверхностной обработки и прошивки отверстий (3 %).

На рис. 5 представлена стоимостная структура рынка промышленных лазерных систем для основных технологий обработки материалов и тенденции ее изменения за период 1998–2010 гг. Основную долю продаж на мировом рынке (около 50 %) составляют лазерные системы для резки, сварки и других родственных технологий, из которых почти 2/3 доходов приходится на лазерные системы для резки и прошивки металлических материалов.

По оценкам экспертов, в 2007 г. ожидается, что количество продаж промышленных лазеров и лазерных систем в целом возрастет на 6 % и составит около 40 тыс. ед. Доходы от продаж промышленных лазеров увеличатся на 6 %, а промышленных лазерных систем — на 9 %. Отмечено, что рост рынка продолжится именно в ключевых секторах — резка/сварка металла, маркировка/гравировка и микропроцессорные технологические системы.

Как было указано выше, в Европейском регионе основным производителем и потребителем промышленных лазеров и лазерных систем является Германия; она же имеет наиболее мощный научно-технический потенциал в области исследований и разработки новых лазерных систем и технологий. Германия — одна из первых промышленно развитых стран, которая на внутреннем национальном рынке сварочной техники, выделила в самостоятельный сектор лазер и лазерные системы для сварки и родственных технологий [10]. В связи с этим рассмотрение немецкого рынка лазеров и лазерных систем также представляет определенный интерес. По оценкам немецких экономистов, в 2003 г. общеевропейский рынок сварочной техники достиг 11 млрд евро, а немецкий внутренний рынок — 3,6 млрд евро, при этом объем продаж в секторе сварочных лазеров и лазерных систем составил более 340 млн евро (442 млн дол.).

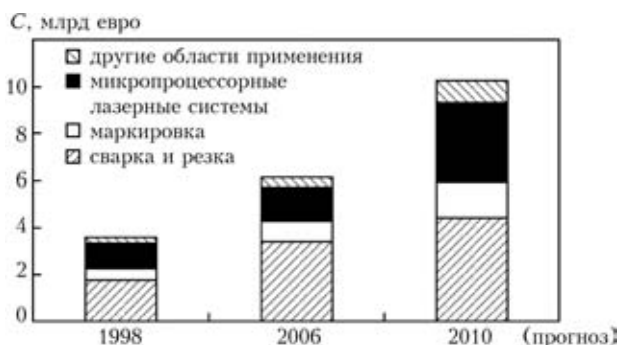


Рис. 5. Объем продаж S на мировом рынке промышленных лазерных систем для обработки материалов [2]

Результаты анализа европейского сварочного рынка и, в частности, сектора лазеров и лазерных систем, выполненного фирмой «Frost&Sullivan» несколько отличаются от оценок немецких экспертов, но также представляют определенный интерес [11, 12]. Так, по данным фирмы «Frost&Sullivan», европейский рынок лазерной техники для сварки и родственных технологий в 2004 г. составил 542,8 млн дол., а к 2011 г. прогнозируется рост продаж до 802,2 млн дол. Как отмечалось выше, основная доля европейского рынка лазерного сварочного оборудования, включая резку, приходится на рынок Германии, на котором в 2004 г. объем продаж лазерной техники для сварочного производства составил 357,7 млн дол., или 65 % европейского рынка. Прогнозируется, что к 2011 г. немецкий внутренний рынок лазерной техники для сварки и родственных технологий достигнет 481,1 млн дол. [13].

Итальянский рынок лазерного сварочного оборудования занимает в Европе второе место по объемам продаж. В 2004 г. его доходы достигли 41,8 млн дол.; к 2011 г. прогнозируется их увеличение до 77,7 млн дол. [14].

Доходы рынка сварочного оборудования Великобритании в 2004 г. составили 32,0 млн дол.; к 2011 г. фирмой «Frost&Sullivan» прогнозируется их рост до 50,5 млн дол. [15].

Исследование возможности использования технологии лазерной сварки в новых наукоемких областях промышленного применения является дополнительным импульсом для расширения рынка. Многие из этих технологий в настоящее время находятся в стадии активной разработки, и они, безусловно, сыграют важную роль при формировании рынка в 2007–2011 гг. Разработка новых лазерных источников и усовершенствование существующей лазерной техники усиливают потенциальные возможности и преимущества применения лазерной сварки во многих отраслях промышленности. Затраты на внедрение технологий лазерной сварки сокращаются, а преимущества от применения данной технологии возрастают, что обуславливает увеличение количества потенциальных потребителей оборудования для лазерной

сварки. Перспективными областями применения лазерной сварки, помимо автомобильной промышленности, являются такие отрасли, как тяжелое и транспортное машиностроение, судостроение, авиакосмическая промышленность, производство сварных труб средних и больших диаметров.

■ Убедительной и наглядной демонстрацией роста мирового лазерного рынка стала состоявшаяся в июне с. г. в Мюнхене (ФРГ) международная выставка «Laser 2007». В работе выставки приняли участие 2000 фирм и организаций из 90 стран мира, экспозиции которых представляли новейшие разработки в области лазерной техники; образцы серийно производимых лазеров и лазерных систем с выходной мощностью от 1 до 20 000 Вт, а также отдельных узлов и элементов этих систем; оригинальные примеры технологического применения лазеров для обработки материалов и др. Характерно, что еще несколько лет назад такие ведущие мировые производители лазеров и лазерных систем, как «Rofin», «Trumpf», JPG, «Dilas» и другие фирмы ориентировались на собственную разработку и комплектное производство лазерных систем, а в настоящее время положение резко изменилось. Во многих странах созданы и интенсивно наращиваются свои производственные мощности специализированные малые и средние фирмы по разработке и производству комплектующих элементов и отдельных узлов для лазерных макро- и микросистем по 20 конкретным технологическим направлениям. На выставке «Laser 2007» в трех залах были представлены экспозиции 113 фирм. Такое положение на лазерном рынке позволило крупным фирмам-производителям перейти к широкой кооперации, что не могло не привести к сокращению сроков изготовления лазерных систем и некоторому снижению их стоимости. Наличие малых узкоспециализированных фирм расширило и удешевило эксплуатационное обслуживание и ремонт действующих технологических лазерных систем.

Еще одной не менее значимой тенденцией развития нынешнего мирового лазерного рынка является существенное снижение стоимости лазеров всех типов при сохранении присущего для динамичного рынка колебания диапазона цен. Это связано как с конъюнктурой рынка, так и с уровнем платежеспособности производственных объединений и фирм-потребителей в различных регионах мира. В среднем «удельная» стоимость современных лазеров составляет 50...175 евро/Вт. В качестве примеров ориентировочной стоимости

отдельных типов лазеров можно привести следующие данные: CO₂-лазер серии SM мощностью 1,0...2,0 кВт стоит 50 евро/Вт; CW-Nd:YAG-лазер мощностью 1...2 кВт 75...90 евро/Вт, а мощностью 3...6 кВт 120...175 евро/Вт; YLR — волоконные лазеры имеют уже среднюю цену 100...120 евро/Вт.

В заключение следует отметить, что мировой рынок лазерной техники для обработки материалов имеет отличные перспективы и отражает все возрастающую потребность промышленного производства в этой прогрессивной и эффективной технике и технологии. В свою очередь, и сектор технологических лазеров для резки, сварки и обработки материалов имеет самый высокий темп развития на мировом и региональных рынках сварочной техники. Непрерывное расширение объемов производства и потребления технологических лазеров и лазерных систем, безусловно, способствует расширению отраслей и объемов промышленного применения этой прогрессивной технологии обработки материалов — технологии XXI в.

1. Гарацук В. П., Шелягин В. Д. Современные тенденции развития технологических лазеров // Автомат. сварка. — 2006. — № 2. — С. 33–36.
2. Optech Consulting. Market data — laser technology <http://www.optech-consulting.com/lasertechnologymarkets.html>.
3. Belforte David/ Markets keep getting better // Industrial Laser Solution. — 2007. — January. — <http://www.ils.pennwell.com>.
4. НТО ИРЭ-Полюс: Сравнение лазеров различных типов. — http://www.ntoirepolus.ru/apps_cutting.htm.
5. Гарацук В. П. Технологические характеристики лазерного пучка для резки и сварки // Автомат. сварка. — 2006. — № 11. — С. 38–40.
6. Shiner B. Industrial laser solution — high-power fiber lasers gain market share. — http://www.ils.pennnet.com/Articles_Display.cfm?Section=ARTCL&ARTICLE_ID...
7. Дианов Е. М., Буфетов И. А. Волоконные лазеры — новый прорыв в лазерной технике // Lichtwave russian edition. — 2004. — № 4. — С. 44–49.
8. Kincaide K., Anderson S. G. Laser marketplace 2007: laser industry navigates its way back to profitability. — <http://laserfocusworld.printhis.clickability.com>.
9. LIS Russia. — <http://www.expocentr.ru>.
10. Anne L. Fisher. Report issued on European laser welding market // Business World. — 2006. — July. — P. 76.
11. Laser welding to grow // Frost&Sullivan. — www.frost.com.
12. European laser welding equipment markets rethink strategy // Ibid. — www.frost.com.
13. Frost: Application, innovations to alter german laser welding market. — <http://www.engineers.ihs.com/news-06Q2/frost-laser-welding.jsp>.
14. Italian welding equipment market expected to double // Frost&Sullivan. — <http://www.frost.com>.
15. Proactive approach critical for UK laser welding equipment market to realise full growth potential. — <http://www.ils.pennnet.com>.

Considered is the status and level of manufacture of industrial lasers and laser systems for material processing, scope of the world and regional markets of laser equipment, as well as the laser welding equipment market.

Поступила в редакцию 15.07.2007



ВЛИЯНИЕ ТИТАНА НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ УГЛЕРОДИСТОГО НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

А. П. ЖУДРА, С. Ю. КРИВЧИКОВ, кандидаты техн. наук, В. В. ПЕТРОВ, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния легирования титаном (до 1 мас. %) на трещиностойкость, структуру и твердость низколегированного углеродистого металла, наплавленного самозащитной порошковой проволокой. Установлено, что увеличение содержания титана сопровождается ростом сплошности и разветвленности карбидно-цементитной фазы в наплавленном металле и повышением его стойкости против образования микротрещин.

Ключевые слова: наплавка, самозащитная порошковая проволока, углеродистый наплавленный металл, трещиностойкость, микроструктура, легирование титаном, твердость, микротвердость

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана и широко применяется в настоящее время самозащитная порошковая проволока ПП-АН160, предназначенная для восстановления изношенных деталей из серого и высокопрочного чугуна (коленчатые валы двигателей внутреннего сгорания, посадочные места валов, корпусные детали и др.) [1]. При наплавке металла без предварительного и сопутствующего подогрева, когда скорость охлаждения наплавленного металла в интервале температур возможного образования «холодных» микро- и макротрещин (450...250 °С) может достигать 12...14 °С/с [2], его трещиностойкость существенно уменьшается.

Цель настоящей работы — экспериментальная оценка влияния малого содержания титана на трещиностойкость углеродистого наплавленного металла, полученного наплавкой самозащитной порошковой проволокой ПП-АН160.

Для проведения исследований изготовлены порошковые проволоки диаметром 1,8 мм, в которых содержание титана в сердечнике изменяли дискретно за счет массовой доли ферротитана ФТн70С08 (ГОСТ 4761–91). Постоянные значения коэффициента заполнения порошковых проволок при увеличении содержания ферротитана обеспечивали путем соответствующего снижения массовой доли железного порошка.

Многослойную наплавку валиков осуществляли на стальные пластины без предварительного подогрева на режиме: $I_{св} = 170...180$ А; $U_d = 19...21$ В; $v_n = 14$ м/ч; ток постоянный; полярность обратная. Наплавку каждого последующего валика выполняли после полного остывания предыдущего. Исследуемые наплавленные образцы в

третьем слое имели следующий химический состав, мас. %: 2,2...2,4 С; 0,7...0,8 Мn; 1,6...1,8 Si; 0,2...0,3 Cr; 0,07...0,14 горофильного элемента; 0,2...0,3 Al и 0,03, 0,08, 0,17, 0,34 и 0,72 Ti. Для проведения металлографического анализа и получения сопоставимых результатов образцы наплавленного металла брали на одном и том же расстоянии от места начала наплавки каждого валика, когда технологический режим наплавки считался установившимся.

Путем металлографических исследований установлено, что титан оказывает влияние на количество и морфологию микротрещин в наплавленном металле и зоне сплавления. В образцах, содержащих 0,03 % Ti (при отсутствии FeTi в порошковой проволоке), выявлены микротрещины большой протяженности и степени раскрытия. Они располагаются как в наплавленном металле, так и зоне сплавления. Причем некоторые из них переходят в зону термического влияния. С увеличением содержания титана количество, протяженность и степень раскрытия микротрещин уменьшаются. В образцах, содержащих 0,17 и 0,34 мас. % Ti, обнаружены отдельные микротрещины, расположенные непосредственно в наплавленном металле. Увеличение массовой доли титана до 0,72 % существенного влияния на трещиностойкость исследованного металла не оказывает.

Влияние титана на возникновение микротрещин в наплавленном металле, возможно, связано с изменениями его структуры. Структура металла образцов с 0,03 мас. % Ti состоит из продуктов распада аустенита (ферритно-перлитная смесь) и карбидно-цементитной фазы, которая в плоскости шлифа имеет вид разветвленной армирующей сетки. Присутствуют также участки ледебуритной эвтектики, имеющей сотовое строение, что характерно для низколегированного литейного доэвтектического чугуна. Легирование титаном в исследованных пределах существенного влияния на

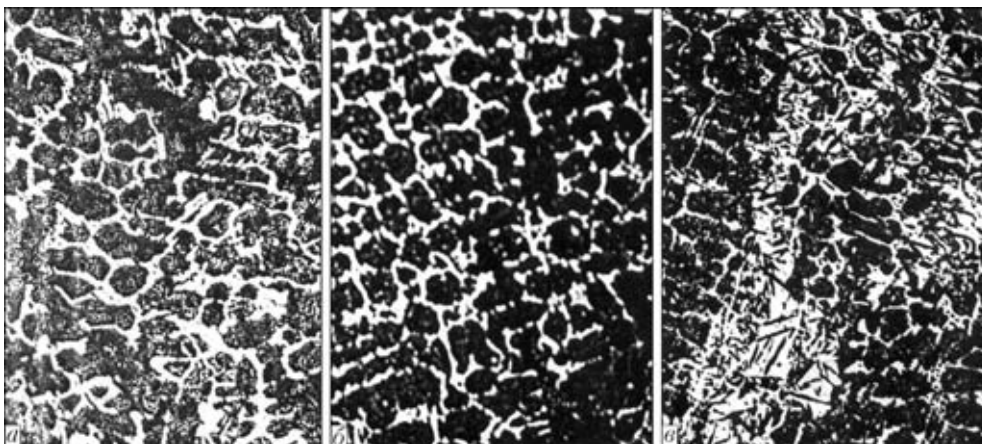


Рис. 1. Микроструктура ($\times 320$) образцов наплавленного металла с массовой долей титана 0,03 (а), 0,34 (б) и 0,72 % (в)

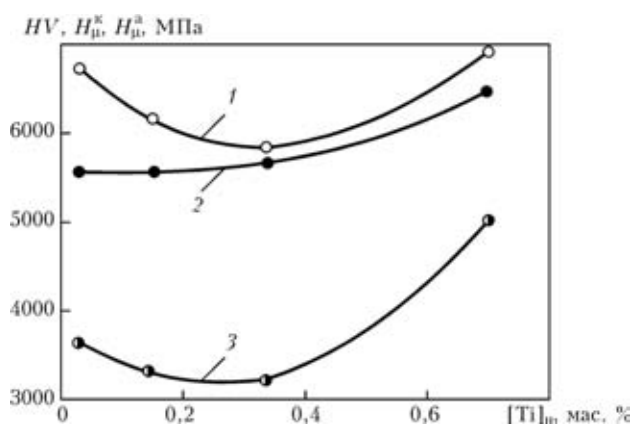


Рис. 2. Влияние титана на твердость наплавленного металла (1), микротвердость карбидно-цементитной сетки (2) и зерен твердого раствора (3)

дисперсность дендритной структуры не оказывает, но изменяет пространственное строение карбидно-цементитной сетки и фазовый состав наплавленного металла. При содержании титана 0,03 мас. % она образуется не на всех участках межосных пространств дендритов и имеет разорванный вид (рис. 1, а). С увеличением содержания титана ее разветвленность и сплошность существенно возрастают (рис. 1, б). Увеличение массовой доли титана до 0,72 % заметного воздействия на строение карбидно-цементитной сетки не оказывает, но способствует образованию в наплавленном металле относительно больших участков мартенсита (рис. 1, в). Можно предположить, что в

результате значительного роста дисперсности армирующей карбидно-цементитной сетки, образующейся при содержании титана 0,2...0,4 мас. %, стойкость наплавленного металла против образования трещин увеличивается.

Кроме увеличения трещиностойкости, титан оказывает также влияние на твердость HV наплавленного металла и микротвердость продуктов распада аустенита H_{μ}^a , значения которых в начале снижаются, а затем начинают возрастать (рис. 2). Согласно данным работы [3], такое изменение значений H_{μ}^a и HV связано с двойственным характером поведения титана в углеродистых сплавах. При содержании титана до 0,1...0,2 мас. % происходит уменьшение содержания цементита в зернах твердого раствора, в результате чего значения H_{μ}^a и HV падают. При более высоком содержании титан ведет себя как карбидообразующий элемент и тем самым способствует увеличению твердости наплавленного металла.

1. Самозащитная порошковая проволока для наплавки высокопрочного чугуна / Б. В. Данильченко, С. Ю. Кривчиков, Г. А. Кирилук, А. П. Жудра. — Киев, 1989. — [2] с. — (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; №19 (1726)).
2. О термическом цикле при широкослойной наплавке цилиндрических деталей из чугуна / С. Ю. Кривчиков, А. П. Жудра, В. В. Петров и др. // Автомат. сварка. — 1998. — № 4. — С. 49–50.
3. Справочник по машиностроительным материалам: В 5 т. — Т. 4: Чугун / Под ред. Г. И. Погодина-Алексеева. — М.: Машгиз, 1959. — 359 с.

Results of experimental studies into the effect of alloying with titanium (up to 1 wt. %) on crack resistance, structure and properties of the low-alloy carbon metal deposited by using self-shielding flux-cored wire are given. It is established that increase in the titanium content is accompanied by growth of continuity and branching of the carbide-cementite phase in the deposited metal, and by increase in its resistance to microcracking.

Поступила в редакцию 19.02.2007



ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

Способ индукционной пайки, включающий нагрев соединяемых припоем деталей с помощью индуктора до расплавления припоя, отличающийся тем, что соединяемые детали размещают на электропроводной подложке, которую одновременно с соединяемыми деталями нагревают с помощью индуктора, при этом обеспечивают преимущественный нагрев индуктором подложки. Патент РФ 2296037. Ю. М. Тихомиров, А. С. Дегтярев (ФГУП «ЦКБ «Геофизика») [9].

Электронно-лучевая установка, содержащая технологический вакуумный корпус с откачным патрубком и координатным столом, над которым последовательно и осесимметрично размещены триодная электронная пушка с катодным узлом и анодным фланцем, аксиально-симметричная система транспортировки электронного пучка к координатному столу, выполненная в виде герметичного корпуса с расположенными вдоль него диафрагмами, центрирующей, фокусирующей и отклоняющей магнитными линзами, систему высоковольтного питания и управления линзами. Патент РФ 2296038. М. А. Завьялов, В. Ф. Мартынов, Н. С. Гусев и др. (ЗАО НПЦ «Электронная техника») [9].

Механизм импульсной подачи сварочной проволоки, содержащий два зажима для проволоки, шток, ось которого расположена перпендикулярно оси прохождения проволоки, пропущенной через отверстие, выполненное в средней части штока, и устройство возвратно-поступательного перемещения штока в осевом направлении, выполненное в виде пружины сжатия, установленной на одном конце штока, а на другом расположен ролик, взаимодействующий с кулачком, имеющим привод вращения, отличающийся тем, что кулачок выполнен в виде диска и установлен под углом на валу привода, а привод смещен в горизонтальной плоскости относительно штока. Патент РФ 2296654. В. В. Седнев, О. Г. Брунов, А. В. Крюков, С. А. Солодский (Томский политехнический университет) [10].

Способ контактной стыковой сварки оплавлением стальных рельсов, отличающийся тем, что в процессе осадки определяют удельное усилие сдавливания как частное от деления усилия сдавливания на площадь поперечного сечения рельса, по которому судят о тепловложении в свариваемые рельсы при оплавлении, сравнивают вычисленное значение удельного усилия сдавливания с пороговым значением удельного усилия сдавливания, при равенстве вычисленного и порогового значений удельного усилия сдавливания цикл сварки завершают, а при превышении вычисленным значением удельного усилия сдавливания порогового значения определяют разность между вычисленным и пороговым значениями, которую используют в качестве количественного показателя электрической энергии, требуемой для дополнительного ввода в сварное соединение. Приведены и другие отличительные признаки. Патент РФ 2296655. Д. И. Беляев, А. В. Бондарук, А. В. Гудков и др. [10].

Способ диффузионной сварки слоистых титановых тонкостенных конструкций криволинейного профиля, отличающийся тем, что внутреннюю обшивку слоистой кон-

струкции размещают на оправке с азотированной опорной поверхностью и упрочняют наружную поверхность внутренней обшивки путем термодинамического контакта, при этом нагрев осуществляют со скоростью 0,25 °С/с, а при достижении 500 °С сварочное давление изменяют по зависимости $P = K_1 + K_2 \ln(T)$, где K_1, K_2 — эмпирические коэффициенты; $K_1 = -1,12 \dots -1,1$ МПа; $K_2 = 0,184$ МПа; T — температура нагрева, °С. Патент РФ 2296656. А. В. Пешков, В. Р. Петренко, В. В. Пешков, В. Ф. Селиванов (Воронежский ГТУ) [10].

Способ образования стыковых сварных швов на трубах при производстве трубных шпилек, отличающийся тем, что формируют два стыковых шва с последующей их горячей деформацией, для чего предварительно сопрягаемые концы труб раздают из цилиндра в цилиндр, при сборке посредством оправки между их торцами устанавливают промежуточный элемент из присадочного материала в виде втулки с кольцевой канавкой на внутренней поверхности с достижением контакта между сопрягаемыми торцовыми поверхностями концов калиброванных раздачей труб с торцовыми поверхностями втулки, сварные швы формируют путем сплавления материала труб с материалом промежуточного элемента, производят подогрев промежуточного элемента, затем осуществляют горячий радиальный обжим промежуточного элемента, концентрируют первоначально его деформацию во внутренних слоях по местоположению кольцевой канавки, сварных швов и околошовных зон на оправке, придают их внешнему диаметру размер, равный исходному внешнему диаметру труб. Патент РФ 2296657. С. И. Козий, Г. А. Батраев, С. С. Козий (Самарский госаэрокосмический университет, ООО «Реммехзавод») [10].

Способ образования стыковых сварных швов на трубах при производстве трубных шпилек, отличающийся тем, что предварительно сопрягаемые концы труб калибруют раздачей в цилиндр, сборку труб осуществляют на оправке с использованием промежуточного элемента в виде кольца из плакирующего материала, которое располагают между торцами труб с обеспечением их контакта, последовательно формируют сварные швы сплавлением материала труб с плакирующим материалом кольца по его обжим сторонам, после чего стык труб подогревают и производят горячий обжим на оправке с плакированием поверхностей стыка труб пластическим течением плакирующего материала кольца относительно сварного шва и околошовных зон по схеме трехосного неравномерного сжатия приданием внешнему диаметру стыка труб их исходного внешнего диаметра. Патент РФ 2296658. С. И. Козий, Г. А. Батраев, С. С. Козий (То же) [10].

Способ пайки литого износостойкого инструментального сплава с конструкционной сталью, отличающийся тем, что при сборке литой износостойкий инструментальный сплав располагают над конструкционной сталью и проводят нагрев в вакууме при остаточном давлении не ниже 10^{-5} мм рт.ст., при этом повышают температуру до температуры плавления меди, делают выдержку для равномерного прогрева собранной конструкции, в качестве припоя применяют медную фольгу толщиной 100...150 мкм, а пайку осуществляют непосредственно в температурном интервале образования легкотопливной эвтектики между припоем и литым износостойким инструментальным сплавом при температуре 1130...1170 °С с изотермической выдержкой при температуре пайки в тече-

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



ние 5...10 мин. Патент РФ 2297307. А. Г. Багинский, Ю. П. Егоров, А. Г. Мельников, О. М. Утьев (Томский политехнический университет) [11].

Устройство для индукционной пайки соединительной муфты и трубы волновода, содержащее охватывающий трубу волновода индуктор, выполненный в виде охлаждаемого токопровода, изогнутого по контуру сечения трубы волновода и помещенного в паз соосного магнитопровода, и подложку из черного металла с проходным окном для трубы волновода и соединительной муфты, при этом магнитопровод установлен таким образом, что его рабочая поверхность одновременно обращена к поверхностям соединительной муфты, трубы волновода и подложки из черного металла с обеспечением преимущественного нагрева индуктором подложки. Патент РФ 2297308. Ю. М. Тихомиров, А. С. Дегтярев (ФГУП «ЦКБ «Геофизика») [11].

Способ сварки, включающий импульсную подачу сварочной проволоки и формирование сварочной ванны, отличающийся тем, что сварочную ванну формируют на жесткой вольт-амперной характеристике (ВАХ) источника питания и возрастающей ВАХ дуги, а кристаллизацию металла ванны осуществляют на падающей ВАХ источника питания и жесткой ВАХ дуги. Патент РФ 2297309. О. О. Брунов (Томский политехнический университет) [11].

Способ нанесения наплавки лучом лазера на детали из чугуна или стали, отличающийся тем, что перед нанесением слоя наплавки на поверхности детали формируют подслоя путем подачи на обрабатываемую поверхность металлического порошка из материала с твердостью менее $HRC\ 30$ и облучения ее лучом лазера, при получении слоя наплавки в качестве порошка используют смесь порошков материала с твердостью более $HRC\ 60$ и металлического материала с твердостью менее $HRC\ 30$ в соотношении (3–4):1 соответственно, облучение проводят лучом лазера с плотностью мощности излучения $10^4...10^6\ \text{Вт/см}^2$ таким образом, чтобы глубина проплавления подслоя составляла 0,3...0,7 его толщины, при этом отношение толщины слоя наплавки к толщине подслоя выдерживают в пределах (1–3):1, затем осуществляют отпуск при температуре $300\pm 20\ ^\circ\text{C}$ с выдержкой в течение $1\pm 0,2\ \text{ч}$ с последующим охлаждением на воздухе. Патент РФ 2297310. А. В. Баранов, В. О. Попов, Л. П. Розовская, И. П. Попова (ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей») [11].

Состав покрытия для защиты поверхности свариваемого изделия от налипания брызг расплавленного металла при дуговой сварке плавлением, отличающийся тем, что он дополнительно содержит глицерин при следующем содержании компонентов, г на 1 л воды: 80...100 лигносульфоната технического порошкообразного; 1...3 фурацилина; 90...110

глицерина. Патент РФ 2297311. Д. П. Ильященко, С. Б. Сапожков, Е. А. Зернин (Томский политехнический университет) [11].

Способ пайки деталей из стали и медного сплава, отличающийся тем, что перед сборкой паяемую поверхность детали из стали полируют, а паяемую поверхность детали из медного сплава подвергают термовакuumному напылению марганцем, собирают детали с гарантированным зазором между паяемыми поверхностями, при этом в одну из соединенных между собой полостей помещают симметрично штуцеру технологические вкладыши, количество и размер которых выбирают в зависимости от зазора между паяемыми поверхностями при сборке. Патент РФ 2297905. В. И. Биркин, О. Г. Кудашов, И. А. Фролов (ФГУП «Воронежский механический завод») [11].

Способ соединения трубчатых деталей кузнечной сваркой, при котором размещают концы соединяемых трубчатых деталей на выбранном расстоянии друг от друга в пространстве, заполненном продувочной смесью текучих сред; нагревают конец каждой трубчатой детали посредством высокочастотного электрического нагрева, причем используют по меньшей мере три электрода, прижатых с разнесенными по окружности интервалами к стенке каждой трубчатой детали рядом с ее концом так, что электроды передают электрический ток высокой частоты по существу в окружном направлении через сегмент трубчатой детали между электрическими контактами; и перемещают концы трубчатых деталей по направлению друг к другу до формирования кузнечного сварного шва между нагретыми концами трубчатых деталей. Патент РФ 2297906. Р. Э. Олфорд, Э. Т. Коул, К. Димитриадис (Шелл Интернэшнл Рисерч Маатсхаппит Б. В., Голландия) [12].

Припой для пайки алюминиевых сплавов, отличающийся тем, что он дополнительно содержит церий при следующем содержании компонентов, мас. %: 4...12 кремния; 4,6...25 германия; 0,003...0,01 стронция; 0,05...0,15 церия; остальное алюминий. Патент РФ 2297907. В. Ю. Копкевич, В. В. Степанов, А. А. Суслов (ОАО «ВИЛС») [12].

Способ сварки, отличающийся тем, что электронный луч направляют к лицевой плоскости свариваемых деталей под углом входа α , значение которого выбирают равным $0^\circ < \alpha < 90^\circ$, пропускают ток вдоль стыка и дополнительно отклоняют луч снизу вверх так, что угол выхода электронного луча β относительно задней плоскости свариваемых деталей равен углу входа электронного луча α , причем точки входа и выхода электронного луча из свариваемых деталей располагают в одной горизонтальной плоскости. Патент РФ 2298465. В. К. Драгунов, Р. М. Голубчик, А. И. Самолетов, А. П. Слива (ГОУВПО «МЭИ») [13].



По зарубежным журналам*

AUSTRALASIAN WELDING JOURNAL (Австралия) 2007. — Vol. 52, Second Quarter (англ. яз.)

5-й конгресс Азиатского Международного института сварки, организованный Институтом сварочных технологий Австралии (WTIA) 7 марта этого года. IIW International Congress — Sydney, с. 10–12.

Prager M. Проблемы и достижения программы МИС по сосудам давления, котлам и трубопроводам: усовершенствованные конструкции, прогнозирование долговечности и предупреждение разрушений, с. 13–17.

Аттестация и сертификация, с. 24–25.

Godbole A. Компьютерный анализ гидродинамики отвода аэрозолей от сварочной горелки, с. 35–41.

Gupta R. K. Влияние размера зерен на механические свойства соединений в виде приваренного кольца к плите из сплава алюминия AA2219, с. 42–48.

BIULETYN INSTYTUTU SPAWALNICTWA w GLIWICACH (Польша) 2007. — Roc. 51, № 3 (пол. яз.)

Pfeifer T. et al. Плазменная сварка алюминиевых сплавов — преимущества и ограничения, с. 24–30.

Zeman M., Sitko E. Обзор высокопрочных и сверхвысокопрочных сталей, с. 30–38.

Czuchryj J., Sikora S. Вопросы оценки качества сварных соединений на основании визуального контроля в соответствии со стандартом EN ISO 5817:2003, с. 39–49.

Zadroga L. et al. Точечная сварка листов типа DP450 и DP600, с. 49–55.

BULETINUL INSTITUTULUI in SUDURA si INCERCARI de MATERIALE — BID ISIM (Румыния) 2006. — № 4 (рум. яз.)

Kroning M. Новые датчики для неразрушающего контроля и оценки материалов, с. 3–10.

Trusculescu M., Padurean I. Влияние разных режимов термообработки на эрозионную стойкость аустенитной нержавеющей стали GX5CrNi19-10, с. 11–15.

Kohler G. et al. Стекланные припои и их применение при лазерной пайке в микротехнике, с. 19–24.

Safta V.-I. Влияние параметров пульсации на эффективное напряжение и силу тока при импульсной сварке МИГ сплава AlMgSi0,5, с. 25–31.

BULETINUL INSTITUTULUI in SUDURA si INCERCARI de MATERIALE — BID ISIM (Румыния) 2007. — № 1 (рум. яз.)

Von Dobeneck D., Loewer T. Последние инновации в электронно-лучевой сварке, с. 3–10.

Adziev G. et al. Влияние разной прочности сварного шва и основного металла на разрушение образцов с трещинами в ЗТВ, с. 11–20.

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



Bella Sz. et al. Методы ТИГ микросварки, лазером и контактная рельефная микросварка, с. 25–34.

Murariu A. Современные методы оценки качества термoplastических трубопроводов, с. 35–40.

JOURNAL of the JAPAN WELDING SOCIETY (Япония) 2007. — Vol. 76, № 2 (яп. яз.)

Sugitani Yu. Разработка автоматических систем, с. 3.

Специальный выпуск. Новейшие модели прогнозирования сварочных процессов

Ohnawa T., Kawakami H. Сварка нержавеющей стали супераустенитного класса, с. 5.

Fan H. G., Kovacevic R. Моделирование тепломассопереноса при дуговой сварке, с. 6–13.

Dilthey U., Ohse P. Моделирование процесса сварки сопотивлением, с. 14–18.

Mahoney M. W. Современный уровень развития сварки и обработки трением с перемешиванием, с. 19–25.

Bhadeshia H. K. D. H. Новейшие модели прогнозирования структурных превращений и свойств металла шва при сварке сталей, с. 26–32.

Kariya Yo. Курс лекций. Механические свойства, с. 33–37.

Makino H. Курс лекций для практикующих инженеров. Методики распространения вязкого разрушения в газопроводах, с. 38–45.

JOURNAL of the JAPAN WELDING SOCIETY (Япония) 2007. — Vol. 76, № 3 (яп. яз.)

Shiga Ch. Новая концепция производства стальных конструкций с применением инновационных сварочных технологий, с. 8–12.

Mizuta T. Расходуемые материалы для сварки двухфазной нержавеющей стали, с. 6–7.

Специальный выпуск. Новейшие нанотехнологии для соединения и производства

Hirose A. Соединение с применением наночастиц серебра как альтернатива микропайке высокотемпературными припоями, с. 8–12.

Nakamoto M. Создание электронных микросхем на пластмассовых подложках с помощью металлических нанопаст, с. 13–17.

Ohara S. Биомолекулярное соединение наночастиц, с. 18–21.

Morisada Yo., Fujii H. Формирование нанокompозитов на поверхности материала в процессе трения с перемешиванием, с. 22–26.

Kanehira Sh., Hirao K. Формирование объемных наноструктур при лазерном облучении, с. 27–31.

Takemoto T. Курс лекций по надежности пайки бессвинцовыми припоями. 2. Электрохимическая стойкость паяных соединений, выполненных бессвинцовым припоем, с. 32–37.

Kihira H. Лекции для практикующих инженеров. Индекс атмосферостойкости сплавов ванадия и прогнозирование коррозии в неокрашенных конструкциях стальных мостов, с. 38–41.

DER PRAKTIKER (Германия) 2007. — № 4 (нем. яз.)

Zech F. et al. Новые возможности неразрушающего контроля для коррозионной защиты стальных конструкций, с. 106–110.

Schmidt J. Защита от коррозии конструкций — ссылки на DIN EN ISO 14713 и DIN EN ISO 1461 при проектировании конструкций, с. 113–121.

Weib K. Быстрая и точная промышленная обработка изображений при лазерной сварке мелких деталей, с. 122–124.

Springfeld P. Эргономическое перемещение термически упрочняемых деталей с помощью пневматического манипулятора, с. 126–129.

SCHWEISSEN und SCHNEIDEN (Германия) 2007. — № 2 (нем. яз.)

Альтернатива при возрождении предприятий: «тихое банкротство», с. 60–61.

Год равных шансов в Европе, с. 61–62.

Сварка: лазерная + сварка плавящимся электродом в защитных газах высокопрочных сталей и сталей повышенной прочности, с. 62.

Herzfeld D. Орбитальная сварка обеспечивает более высокую эффективность в производстве труб и резервуаров, с. 68–70.

Grob S.-M., Reisgen U. Пайка стекла — сложная технология соединения не только для высокотемпературных топливных элементов, с. 70–77.

Karakas O. et al. Концепция эффекта микропоры для оценки вибрационной прочности сварных соединений магнeвых деформируемых сплавов, с. 78–83.

Новейшие разработки ведут к повышению экономичности в области обработки поверхности, с. 84–88.

18-я Международная конференция по переработке пластмасс. Октябрь 2006 г., Фридрихсгафен, с. 88–94.

Конференция в Аахене 22–26 сентября 2006 г. (ч. 3), с. 94–102.

Заседание комиссий МИС
комиссия VI «Терминология»
комиссия XV «Основы проектирования, расчета и изготовления сварных конструкций»
комиссия X «Поведение структуры сварных соединений — предупреждение отказа»
комиссия VIII «Техника охраны и здоровья».

SCHWEISSEN und SCHNEIDEN (Германия) 2007. — № 4 (нем. яз.)

Перспективы развития производства в Германии, с. 170–171.

DVS начинает выпускать новый журнал по соединению пластмасс, с. 171.

Новые производственные технологии фирмы Тиссен-Крупп-Сталь для производства легких автомобилей, с. 175–176.



Hahn O. et al. Моделирование методом конечных элементов поведения сваренных лазерным лучом стальных элементов при ударной нагрузке, с. 182–191.

Winkelmann R., Burkner C. Сварка и пайка с легкоплавкими присадочными материалами, с. 192–199.

Ji J. et al. Эмпирически статистические модели геометрии шва при гибридной сварке алюминиевых сплавов (Nd:YAC-

лазер + дуговая сварка смеси защитных газов), с. 200–206.

Aichele G. Сжатый водород для пайки и сварки — идея молодого инженера–производственника Э. Виса, с. 207–212.

Поведение материалов и деталей в энергетике и аппаратуростроении — семинар в октябре 2006 г. в Штуттгарте, с. 215–220.

SCHWEISSEN und SCHNEIDEN (Германия) 2007. — № 5 (нем. яз.)

Hartman G. F. Автомобильная промышленность ЕС на современном курсе роста, с. 228–229.

В. г. Бохум открыт исследовательский институт «Новые материалы», с. 229–230.

Сопоставление успехов в области пайки сотрудничающих стран, с. 232–236.

Индивидуальные смеси газов оптимизируют лазерную сварку, с. 238–240.

Защитная одежда в качестве страхования сварщика, с. 240.

Выставки-ярмарки в Штуттгарте «Экспо-лист» и «Schweisstec», с. 1–22.

Mucklich S. et al. Магний — смешанные соединения. Сравнительные исследования пайки, склеивания механического соединения, с. 243–248.

Bobzin K. et al. Высокотемпературная пайка — способ ремонта для повышения долговечности монокристаллических компонентов турбин, с. 249–252.

Wilden J. et al. Технологические аспекты промышленной диффузионной сварки деталей со сложным внутренним контуром, с. 253–259.

Tillmann W. et al. Свойства паяных соединений (на основе никеля) алмаза со сталью для обрабатывающего алмазы инструмента, с. 260–269.

НОВЫЕ КНИГИ

Гладкий П. В., Переpletчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Плазменная наплавка. — К.: Екотехнология, 2007. — 292 с.

Рассмотрены основные способы плазменной наплавки: плазменной струей с токоведущей присадочной проволокой, плазменной дугой с нейтральной и токоведущей проволоками, плазменной дугой горячей проволокой, плазменной дугой плавящимся электродом.

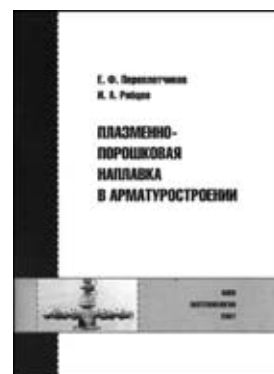
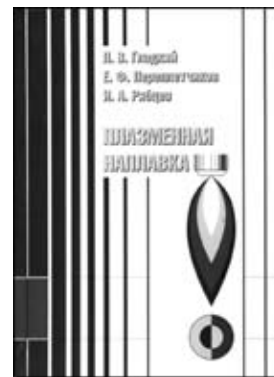
Особое внимание уделено плазменно-порошковой наплавке, позволяющей существенно расширить круг сплавов, наплавляемых механизированным способом.

Приведены требования к наплавочным порошкам, рассмотрены основные способы их производства, исследованы технологические особенности плазменной наплавки, приведена методика выбора режимов плазменно-порошковой наплавки, рассмотрены примеры наплавки ряда характерных деталей. Представлены также сведения об оборудовании для плазменной наплавки, рассмотрены конструкции основных узлов установок и даны их характеристики.

Рассчитана на инженерно-технических работников, занимающихся восстановлением и упрочнением деталей машин и механизмов. Может быть полезна студентам вузов.

Переpletчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Плазменно-порошковая наплавка в аппаратуростроении. — Киев: Екотехнология, 2007. — 64 с.

Рассмотрены проблемы наплавки деталей запорной аппаратуры в энергетическом, нефтехимическом, судовом и общем машиностроении. Изложены сведения о наплавочных материалах и технологиях их наплавки, рассмотрены свойства наплавочных сплавов на основе никеля, кобальта и железа, которые применяются для упрочнения деталей запорной аппаратуры различного назначения. Приведена характеристика наиболее распространенных способов наплавки деталей аппаратуры. Основное внимание уделено плазменно-порошковой наплавке, обеспечивающей наилучшее качество наплавленных деталей. Рассмотрены особенности технологии плазменно-порошковой наплавки ряда характерных деталей запорной аппаратуры различного назначения.





2-я НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ НА ОАО «ФИРМА «СЭЛМА»

7–8 июня 2007 г. на Симферопольском электромашиностроительном заводе «Фирма «СЭЛМА» состоялась 2-я Научно-практическая конференция «Обеспечение качества в сварочном производстве. Сварочное оборудование, материалы. Нормативные документы. Персонал», организованная Советом Общества сварщиков Украины и Крымским региональным отделением Общества сварщиков Украины. В ее работе приняли участие более 50 специалистов сварочного производства из 15 областей Украины.

Открывая конференцию, президент Общества сварщиков Украины В. Г. Фаргушный зачитал приветствие директора ИЭС им. Е. О. Патона академика Б. Е. Патона ее участникам, в котором была отмечена актуальность и важность тематики, а также пожелания успешной работы.

С докладом «Проблемы обеспечения качества в сварочном производстве» на конференции выступил член Совета Общества сварщиков Украины, председатель комиссии по проблемам качества, главный сварщик ПО «Зоря-Машпроект» Ю. В. Бутенко. Анализируя состояние сварочного производства на крупных машиностроительных предприятиях, докладчик отметил, что в современных условиях факторами, определяющими качество и, следовательно, конкурентоспособность сварной конструкции является не только качество сварочных материалов и оборудования (сварочной техники), но и квалификация персонала (рабочие, инженерно-технические работники, руководители сварочных работ), организация сварочных работ (в том числе наличие актуализированной нормативно-технической документации), современный технологический процесс (последовательность технологических операций, наличие пооперационного контроля, аттестации продукции). Сегодня наиболее острой является проблема обеспечения производства квалифицированными рабочими-сварщиками, владеющими современными технологиями сварки, наплавки, резки, умеющими грамотно выбрать необходимые для использования материалы и оборудование. К сожалению, существующая подготовка рабочих-сварщиков в системе профтехобразования не удовлетворяет требованиям производства. Проблемы профтехобразования хорошо известны: слабая материально-техническая база, низкая заработная плата педагогического коллектива, отсутствие у учащихся возможности практиковаться на современном оборудовании, отсутствие программы и методики подготовки сварщиков, соответствующих международным стандартам. Для обеспечения сварочного производства



квалифицированными кадрами предприятие вынуждено организовывать у себя дополнительные курсы подготовки, но это не решение проблемы, поскольку система подготовки на предприятии также далека от совершенства. В Украине существует система подготовки рабочих-сварщиков разных специальностей, которая успешно реализуется в Межотраслевом учебно-аттестационном центре ИЭС им. Е. О. Патона. Однако этот центр единственный, он не в состоянии решить проблему всего украинского сварочного производства. Сегодня усилия Общества сварщиков Украины совместно с заинтересованными министерствами и ведомствами необходимо направить на создание региональных центров по подготовке квалифицированных рабочих, владеющих современной сварочной техникой, отвечающих требованиям сварочного производства. В последние годы ощущается дефицит и в квалифицированном инженерно-техническом персонале. К сожалению, кафедры сварки высших учебных заведений отстают от требований современного производства. Выпускники вузов слабо владеют современной сварочной техникой, положениями международных стандартов и норм, имеют ограниченный практический опыт. В прежние годы молодой инженер-сварщик, поступив на работу в службу главного сварщика машиностроительного предприятия, имел возможность, используя принцип «преемственности поколений», приобрести соответствующие технические навыки. Однако сегодня, когда численность персонала службы главного сварщика сведена до минимума, молодому специалисту надо сразу вступать «в бой», но отсутствие соответствующей подготовки не позволяет этого сделать. Необходимо серьезно пересмотреть систему подготовки инженеров-сварщиков



в вузах, включив в программу изучение международных стандартов и норм. Ю. В. Бутенко обратил внимание участников конференции также на проблемы, существующие сегодня у главного сварщика предприятия, основной из которых является отсутствие законодательно определенных прав руководителя сварочных работ. В современных условиях на главном сварщике лежит вся полнота ответственности за надежность сварной конструкции, однако право принятия решений отсутствует. Наиболее простой пример: закупку расходных материалов, основного металла, сварочного оборудования для изготовления сварных конструкций полностью осуществляет снабженец, который руководствуется не технической необходимостью, а ценой. При этом наличие сертификата качества, сертификата соответствия не всегда гарантирует, что сварочная техника соответствует требованиям конкретного производства и условиям производства конкретной сварной конструкции. Участие главного сварщика, специалистов службы главного сварщика в выборе и закупке материалов и оборудования обязательно. Настало время разработать и в установленном порядке утвердить Положение (Технический регламент) о службе главного сварщика. В его подготовке должны принять активное участие члены Общества сварщиков Украины, основываясь на накопленном опыте и действующих международных нормах и стандартах. В нем должны быть указаны права и обязанности руководителя сварочных работ и его служб, позиция службы в административной структуре предприятия. Далее Ю. В. Бутенко остановился на вопросе качества сварочных материалов и оборудования. Сегодня на рынке Украины предложения сварочной техники превышают спрос. Однако далеко не вся предлагаемая сварочная техника имеет требуемые эксплуатационные показатели. Очень трудно выбрать необходимый материал или оборудование, чаще всего при выборе сварочной техники руководствуются опытом ее использования, а также авторитетом производителя или поставщика. Необходимо, чтобы Общество сварщиков Украины создало базу данных опыта применения различных сва-

рочной техники на предприятиях всех отраслей промышленности, что позволило бы объективно принимать решения при выборе сварочной техники и ограничило доступ на рынок продукции недобросовестных производителей и поставщиков.

Доклад *Н. А. Проценко*, менеджера схемы Европейской сварочной федерации, УНОСП «Патон-Серт», «Система подготовки предприятий к сертификации по требованию международного стандарта ISO 3834» был посвящен, в том числе, и одной из актуальных проблем — обеспечению отечественного сварочного производства современной нормативно-технической документацией (прежде всего стандартами, отвечающими требованиям международных норм). Н. А. Проценко, продолжая обсуждение проблем обеспечения сварочного производства научно-технической документацией, начатой в выступлении Ю. В. Бутенко, отметила, что в большинстве ведущих отраслей промышленности, выпускающих и эксплуатирующих особо ответственные сварные конструкции (тяжелое и транспортное машиностроение, энергетика, энергетическое и химическое машиностроение, эксплуатация трубопроводных систем и т. п.), продолжают действовать устаревшие государственные (межгосударственные) стандарты, а также отраслевые стандарты бывшего СССР, созданные более 25 лет тому назад, в которые не вносились изменения. В России большинство этих документов пересмотрено и созданы новые ГОСТы Р и Федеральные нормы, в которых учтены изменения, произошедшие в мировом сварочном производстве за последние годы. В Украине начата системная работа по созданию нормативных документов, гармонизированных с международными стандартами EN и ISO. Для потребностей отечественного сварочного производства необходимо гармонизировать около 240 стандартов. Для реализации этого задания привлечены ведущие научно-исследовательские организации и промышленные предприятия Украины. Однако, как всегда, эта работа не имеет целевого финансирования и выполняется в основном на энтузиазме специалистов, понимающих всю важность создания современных нормативных документов, которые должны обеспечить качество и конкурентоспособность сварных конструкций. В 2004–2006 гг. введены в действие первые стандарты ДСТУ ISO в области сварочных материалов, защитных газов и т. п. При совершенствовании системы организации сварочных работ и возможности аттестации сварочного производства важнейшим документом является ISO 3834 — «главный» стандарт сварочного производства. Внедрение этого стандарта позволяет последовательно осуществлять процесс организации и выполнения сварочных работ, который включает требования к подготовке контрактов и выбору субподрядных организаций, к квалификации руководящего и исполнительного персонала, к выбору сварочного оборудо-



дования, а также основного и расходных материалов, к подготовке, оформлению и аттестации технологических процессов, к пооперационному технологическому контролю, финишному контролю качества продукции и приемо-сдаточным испытаниям, к контролю отклонений в технологическом процессе, к документированию результатов выполнения работ, к идентификации и прослеживаемости выполнения технологических операций. Для подтверждения соответствия сварочных производств требованиям ISO 3834 в ИЭС им. Е. О. Патона создан Уполномоченный национальный орган по сертификации сварочного производства — УНОСП «Патон-Серт». В июне 2006 г. «Патон-Серт» успешно прошел аккредитацию в Европейской сварочной федерации и получил соответствующий сертификат.

В течение последних 20 лет технический прогресс в сварочном производстве осуществляется путем реализации положений международных стандартов ISO серии 9000. В 2008 г. заканчивается срок действия третьей редакции указанных стандартов. Возможным изменениям в стандартах ISO 9000 был посвящен доклад *А. Е. Марченко* (ИЭС им. Е. О. Патона) «Улучшение менеджмента качества с учетом положений международных стандартов». Полагают, что стандарт ISO 9001 останется главным документом, который регламентирует требования к системе менеджмента качества (СМК) и его будут использовать при оценке результативности СМК в процессе ее сертификации. Основное назначение СМК, разработанной и сертифицированной по ISO 9001, обеспечить соответствие качества продукции требованиям, заявленным изготовителем или заданным (ожидаемым) потребителем и обществом. В 2008 г. редакция стандарта ISO 9001 будет незначительно изменена. С целью достижения наиболее весомых экономических результатов деятельности предприятий стандарт ISO 9004 будет по-прежнему ориентирован на улучшение общего менеджмента, составной частью которого является менеджмент качества. Учитывая, что в прошедший период эта задача решалась неудовлетворительно, ISO/TK176 запланировал к 2008 г. существенно переработать ISO 9004. Новая редакция стандарта ISO 9004 — направление на достижение устойчивого развития предприятия. В качестве образцов при разработке стандарта ISO 9004 предлагают подходы, успешно реализованные в японских стандартах JIS/TR Q 0005 «Системы менеджмента качества. Руководство по устойчивому росту», JIS/TR Q 0006 «Системы менеджмента качества. Руководство по самооценке» и проекте французского стандарта «Система менеджмента. Руководство по менеджменту организации»; испанском стандарте «Методы и планы улучшения»; европейской модели делового совершенства (EFQM); моделях премий Малкольма Болдриджа и Эдуарда Деминга. Эти предложения должны быть тщательно проанализированы специ-

алистами-сварщиками и производителями сварочной техники. Следует найти пути гармонизации стандарта ISO 3834 со структурой новой редакции стандарта ISO 9001:2008. Сейчас такой гармонизации не существует, что создает трудности при разработке, аттестации сварочных процессов, с одной стороны, и сертификации систем менеджмента качества с участием сварочных технологий, с другой.

Современное сварочное производство предъявляет специальные требования к профессиональной подготовке сварочного производства. Новым подходам в организации профессиональной подготовки персонала всех категорий (от руководителя сварочных работ до рабочего-сварщика) был посвящен доклад *П. П. Проценко*, директора Межотраслевого учебно-аттестационного центра ИЭС им. Е. О. Патона «Профессиональная квалификация персонала — определяющий фактор в системе обеспечения качества сварных конструкций». Докладчик отметил, что для решения проблем организации профессиональной подготовки персонала Международный институт сварки и Европейская сварочная федерация разработали единые учебные программы и систему контроля за проведением квалификационных экзаменов, отвечающих требованиям ISO 3834. Международная квалификационная система МИС-ЕСФ признана всеми аккредитационными органами в мире и позволяет гарантировать уровень подготовки и оценки квалификации персонала независимо от того, в какой стране прошел подготовку и аттестацию персонал. Аккредитацию на применение Международной квалификационной системы получили Уполномоченные национальные органы (УНО) в 35 странах, в том числе и Украина. В качестве УНО в Украине аккредитован Межотраслевой учебно-аттестационный центр ИЭС им. Е. О. Патона (МУАЦ). В процессе подготовки к аккредитации были разработаны программы и методики подготовки и оценки квалификации всех категорий персонала для сварочного производства, что позволило организовать подготовку и аттестацию специалистов международного уровня. Участие таких специалистов в производстве сварных конструкций, отвечающих требованиям ISO 3834, является обязательным. Если при разработке и согласовании Программы и Положений по подтверждению международной квалификации инженерно-технического персонала не возникло проблем, то при согласовании системы подготовки сварщиков возникли трудности. Это в большей степени связано с несоответствием национальной системы профессионально-технической подготовки рабочих руководящим документам Международной квалификационной системы. В создавшейся ситуации для решения проблемы обеспечения сварочного производства квалифицированным персоналом необходимо разработать Положение и создать многоуровневую систему непрерывной профессиональной подготовки персонала разных категорий. Учеб-

но-производственной базой для подготовки высококвалифицированного персонала могли бы стать региональные ресурсные центры по сварке и родственным технологиям, созданные с участием Общества сварщиков Украины, Уполномоченного национального органа по международной квалификации персонала, заинтересованных министерств и промышленных предприятий Украины.

В дискуссии по актуальным проблемам повышения качества сварочных работ, обсуждаемых на конференции, приняли участие Председатель Крымского регионального отделения ОСУ, генеральный директор ОАО «Фирма «СЭЛМА» (г. Симферополь) Г. В. Павленко, председатель Одесского областного отделения ОСУ В. И. Дегтярь (Одесса), председатель Сумского областного отделения ОСУ М. А. Лактионов, директор УАКС В. Т. Котик, вице-президент ОСУ В. М. Илюшенко (г. Киев).

По результатам обсуждений было принято решение, включающее поручение Совету Общества сварщиков Украины, разработать проект Положения о главном сварщике с учетом международных стандартов; подготовить Положения о ресурсных центрах по сварочному производству для подготовки рабочих-сварщиков с квалификацией, отвечающей требованиям международных стандартов и современного производства.

Областным и региональным отделениям Общества сварщиков Украины при содействии совета Общества сварщиков поручено организовать мониторинг соответствия сварочных материалов и оборудо-

вания требованиям нормативной документации и технологии изготовления конкретной сварной конструкции, создать базу данных опыта эксплуатации сварочной техники, используемой на предприятиях Украины.

Намечено провести в 2008 г. научно-практическую конференцию по проблемам обеспечения качества в сварочном производстве.

Во время работы конференции все участники имели возможность ознакомиться с современным производством сварочной техники на ОАО «Симферопольский машиностроительный завод «Фирма «СЭЛМА». Сегодня производственные цеха завода оснащены самым современным технологическим оборудованием, позволяющим изготавливать надежную в эксплуатации сварочную и специальную технику для ручной, механизированной и автоматической дуговой сварки, аргонодуговой сварки и воздушно-плазменной резки, машины для подготовки кромок, установки для контактной сварки. Продукцию фирмы «СЭЛМА» успешно эксплуатируют на заводах Украины и экспортируют во многие страны.

Активная маркетинговая политика, постоянная связь с научными центрами Украины и России позволяет фирме разрабатывать и в кратчайшие сроки осваивать производство новых и модифицированных образцов сварочной техники, отвечающих требованиям международных стандартов и потребителей сварочной техники.

Б. В. Юрлов, В. М. Илюшенко, кандидаты техн. наук



5-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «МЕТАЛЛЫ, СВАРКА И ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ»

13–14 сентября 2007 г. в Юрмале (Латвия) состоялась 5-я Международная конференция «Металлы, сварка и порошковая металлургия» (MET-2007), организованная Латвийским обществом материаловедов, Латвийским обществом специалистов-сварщиков, Рижским техническим университетом, Итальянско-латвийским бизнес-центром. В ее работе приняли участие около 50 ученых и специалистов из Беларуси, Израиля, Латвии, Литвы, Российской Федерации, Украины, Швеции, ФРГ, Эстонии.

Открыли конференцию председатель оргкомитета профессор В. Миронов и проректор Рижского технического университета профессор Л. Рибийский.

На конференции было представлено около 40 докладов. Все доклады распространены на компакт-дисках. Издан также сборник тезисов докладов.

С обзорными докладами о состоянии и перспективах развития машиностроения, порошковой металлургии и сварочного производства в Латвии выступили В. Рантинс, В. Миронов и А. Филипов. В них

отмечено, что кризис в этих областях был преодолен в 1999 г. и сейчас они развиваются с ежегодными темпами роста в среднем 7...8 %. Производством металлоконструкций в Латвии занимаются около 80 предприятий. Наиболее распространенные методы сварки в Латвии: 111, 135, 136, 141, 311, 91, 94 (по классификации EN ISO 4063:2000). При этом доля ручной дуговой сварки (процесс 111) падает, а доля дуговой сварки в защитных газах (процесс 135, 136, 141) возрастает. Имеет место резкий спад применения газовой сварки (процесс 311). Основные методы резки, применяемые в Латвии, — автоматизированная кислородная, лазерная и плазменная.

Два доклада (ЗАО «Электродный завод», г. Санкт-Петербург, Россия и фирма «AGA», Швеция, Латвия) были посвящены сварочным материалам: электродам, флюсам и защитным газам. В них авторы подробно рассмотрели характеристики производимых ими материалов и их место на рынке стран Балтии и СНГ.



О достижениях в области электронно-лучевой и магнитно-импульсной сварки была дана информация в докладах представителей Украины и Израиля. В ряде докладов ученых из Узбекистана, ФРГ и Бельгии были изложены результаты исследований процессов первичной кристаллизации при сварке.

Несколько докладов было посвящено сварке, ремонту и восстановлению деталей и узлов на железнодорожном транспорте. В них представлены технологии термитной сварки и технологии ремонтно-восстановительных работ с использованием процессов сварки и нанесения покрытий, соответствующее оборудование и опыт его применения.

Вопросы стандартизации, обеспечения качества и подготовки персонала в области сварки были освещены

в докладах Х. Г. Гросса (ФРГ), А. Степанова (Эстония) и Р. Мицкевичиены (Литва).

Наибольшее количество докладов было посвящено порошковой металлургии. В них были рассмотрены различные методы получения металлических порошков и изделий из них. Два обстоятельных доклада о порошковых материалах и сферах их применения, в том числе и для нанесения покрытий и наплавки, сделал М. Кейзельман (фирма «Hoganas», Швеция).

На конференции был представлен также ряд других докладов, посвященных нанесению покрытий, сварке пластмасс, снятию сварочных напряжений, магнитным материалам и др.

А. А. Кайдалов, д-р техн. наук

НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ!



В октябре исполнилось 70 лет талантливому конструктору, члену-корреспонденту Академии инженерных наук Украины, заведующему отделом неразрушающих средств контроля ОКТБ Института электросварки им. Е. О. Патона Владимиру Львовичу Найде.

Родился В. Л. Найда в Днепропетровске. В 1965 г. закончил Московский энергетический институт по специальности «Электрификация промышленных предприятий и установок». В ОКТБ Института электросварки им. Е. О. Патона пришел в 1972 г. сформировавшимся специалистом в области автоматических систем управления оборудованием. Первые системы управления на бесконтактных элементах электроники, разработанные им, реализованы в станках-автоматах и автоматических линиях для наплавки клапанов автомобильных двигателей и успешно эксплуатируются на АвтоВАЗе, КамАЗе, ЗИЛе и других предприятиях.

В 1984 г. он возглавил отдел автоматизированных средств неразрушающего контроля. Под его непосредственным руководством были созданы и успешно эксплуатировались автоматизированные системы ультразвукового контроля разных изделий на заводе «Южмаш» (г. Днепропетровск), на Выксунском металлургическом заводе и других предприятиях.

В последние годы были созданы отечественные системы для неразрушающего контроля сварных швов и металлоконструкций атомных электростанций России и Украины. Эта техника заменяет ручной контроль машинной компьютерной диагности-

кой экологически опасных объектов и успешно конкурирует с импортным оборудованием в поддержке безопасности ядерной энергетики и продлении ресурса ее дорогостоящих конструкций. К числу последних разработок, успешно воплощенных на АЭС России и Украины, относятся установки типа НК293, НК300 и НК321 для ультразвукового контроля объектов первого контура, манипулятор НК331 и зонды ВСЗ-10,8 для вихретокового контроля теплообменных труб и перемычек коллекторов парогенераторов реакторов ВВЭР-1000.

Успешная деятельность отдела В. Л. Найды в области неразрушающего контроля позволила получить в 2004-2005 гг. ответственный заказ от Выксунского металлургического завода — изготовление комплексов установок для ультразвукового контроля сварных швов и торцевых участков труб диаметром 508...1420 мм и толщине стенок 7...50 мм. В результате проведенного в два этапа тендера выполнение заказа было поручено коллективу В. Л. Найды. К настоящему времени шесть комплексов установок НК360, НК361 и НК362 приняты заказчиком и успешно эксплуатируются. Этот проект, выполненный в чрезвычайно сжатые сроки, который объединяет сверхсовременные элементы механики и электроники, лазерной и ультразвуковой техники, по уровню автоматизации и компьютерного программирования, бесспорно, относится к технике XXI века. В данный момент под руководством В. Л. Найды выполняется заказ по выигранному международному тендеру на разработку и изготовление двух установок АУЗК железнодорожных колес и еще двух установок для контроля концевых участков труб. В. Л. Найда является автором 93 научных публикаций, среди них одна книга и 38 авторских свидетельств и патентов.



В октябре исполнилось 60 лет Михаилу Федоровичу Гнатенко — генеральному директору ООО «Велма».

После окончания в 1972 г. НТУУ «КПИ» М. Ф. Гнатенко работал на Череповецком сталепрокатном, где активно участвовал в разработках и усовершенствовании технологии и изготовления сварочных электродов.

В 1977 г. М. Ф. Гнатенко поступил в аспирантуру и после ее окончания продолжил научную работу в отделе № 10 Института электросварки им. Е. О. Патона. В 1984 г. М. Ф. Гнатенко успешно защитил кандидатскую. За время работы в институте (по 1992 г.) он внес весомый вклад в разработку низко-токсичных электродов, прогрессивных технологических процессов конвейерного производства электродов, создание и модернизацию основного технологического оборудования (электрообмазоч-

ные прессы, печи для термической обработки электродов, интенсивные смесители, дозировочные линии и др.).

В 1993 г. М. Ф. Гнатенко перешел на работу в ООО «Велма» на должность технического директора, а с 2005 г. и по настоящее время он является генеральным директором.

Благодаря настойчивости и инженерному таланту М. Ф. Гнатенко фирмой ООО «Велма» разработано и внедрено в производство уже четвертое поколение технологического оборудования для изготовления электродов, проведена большая работа по совершенствованию технологических процессов. Такие предприятиям-изготовителям сварочных электродов, как ЗАО «Артемаш-Вистек», ОАО «Днепрометиз», ОЗСМ ИЭС им. Е. О. Патона, ООО «Плазма Тек», ОАО «Лосиноостровский электродный завод», ОАО «Межгосметиз-Мценск», ОАО «Уралвагонзавод» и др., было поставлено более 60 единиц оборудования и около 30 технологических линий по изготовлению сварочных электродов.

Сердечно поздравляем юбиляров, желаем им крепкого здоровья, благополучия и больших творческих успехов.

Институт электросварки им. Е. О. Патона
Редколлегия и редакция журнала «Автоматическая сварка»

15 лет на рынке сварочного оборудования Украины

предприятие «Триада-Сварка»
г. Запорожье

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

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

ABICOR
BINZEL
Fronius
SELMA



Электромашино-строительный завод «ФИРМА СЭЛМА»

ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОСВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ISO TUV

95000, г. Симферополь, Украина
ул. Генерала Васильева, 32А
Тел.: (0652) 58-30-55, 66-85-37,
58-30-50, 58-30-52, 58-30-54
E-mail: sales@selma.crimea.ua
www.selma.ua



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

ТОРГОВИЙ ДІМ ЗВАРЮВАННЯ

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



НПФ
ЭЛНА

ООО "НПФ "Элна"
Порошковые проволоки
для сварки, наплавки
и напыления



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

HYUNDAI
WELDING CO., LTD.

г.п. Петровское, 69, г. Киев, 03682 тел. (044) 200-80-85, 200-85-17 факс (044) 200-85-17 e-mail: info@elna.com.ua

ИЗ
ИЗГОТОВЛЕНИЕ

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

Производство материалов для дуговой сварки, наплавки и резки:

Электроды – АНО-4, АНО-4П, АНО-6, АНО-6У, АНО-12, АНО-21, АНО-21М, АНО-21У, АНО-27, АНО-36, АНО-37, МР-3, УОНИ 13/45, УОНИ 13/55, ВН-48, АНО-ТМ, АНО-ТМ/СХ, АНО-ТМ60, АНО-ТМ70, ТМЛ-1У, ТМЛ-3У, ЦУ-5, ТМУ-21У, ОЗЛ-6, ОЗЛ-8, ЦП-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-НхХ25Г14НЗТ, ППС-ЭК1, ППС-ЭК2, ППР-ЭК3, ППР-ЭК4

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

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

Возможно изготовление других марок материалов

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

ДОНМЕТ
Завод автогенного оборудования

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

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

Лидер производства порошковых проволок в Украине

ТМ.ВЕЛТЕК
ООО "ТМ.ВЕЛТЕК"

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

Порошковые проволоки ВЕЛТЕК
-ВЕЛТЕК H200 - H620

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

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

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

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

ГЕФЕСТ **ГЕФЕСТ** **ГЕФЕСТ**

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

Производство высококачественных
электродов для:

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

Все марки электродов
СЕРТИФИЦИРОВАНЫ

ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
СпецСплав

ПРОИЗВОДСТВО:
Флюсы сварочные
Проволоки порошковые для внепечной
обработки металлургических расплавов
Проволоки порошковые для сварки, наплавки,
напыления и металлизации
Электроды наплавочные, специального назначения,
для сварки чугуна и резки
Ферросплавы и легитур
Хром металлический
Комплексные раскислители и модификаторы

ул. Курсанта, 1
г. Днепрпетровск
49051, Украина

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

**производство продажа
сервисное обслуживание**



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



автономные мобильные
сварочные комплексы на базе
резонансных преобразователей



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

"ИЭС-ЭПИС"

Украина, 03150 г. Киев
ул. Горького, 56, корп. 2
Тел.: (044) 271-2036
Факс: (044) 271-2102

**НАВКО-
ТЕХ**

Automatic machines and robots for arc welding

**Автоматические установки и роботы
для дуговой сварки**



УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ
ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ШВОВ

УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ
КОЛЬЦЕВЫХ ШВОВ

РОБОТОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ СВАРКИ

СВАРОЧНАЯ АППАРАТУРА



Украина, 03056, Киев, ул. Полевая, 24
Тел.: +38 044 456-40-20
Факс: +38 044 456-83-53

<http://www.navko-teh.kiev.ua>

E-mail: info@navko-teh.kiev.ua



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

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


DRAHTZUG STEIN
wire & welding

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

Официальный представитель в Украине
АРКСЭЛ

83017, г. Донецк, пер. Вятский, 2а
Тел.: (062) 332-2650(52)
Тел./факс: 382-9449, 332-2651

E-mail: info@arcsel.dn.ua; www.arcsel.dn.ua



ПОДПИСКА — 2008 на журнал «Автоматическая сварка»

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

* В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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

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

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

ПОДПИСНОЙ КУПОН

Адрес для доставки журнала _____

Срок подписки с _____

200

г. по

200

г. включительно

Ф. И. О. _____

Компания _____

Должность _____

Тел., факс, E-mail _____



РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Обложка наружная, полноцветная

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

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

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

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

Обложка внутренняя, полноцветная

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

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

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

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

Внутренняя вставка

Полноцветная (200×290 мм) - 300 \$

Полноцветная (разворот А3)

(400×290 мм) - 500 \$

Полноцветная (200×145 мм) - 150 \$

Полноцветная (80×80 мм) - 20 \$

• Оплата в гривнях или рублях РФ

по официальному курсу

• Для организаций-резидентов

Украины цена с НДС и налогом на рекламу

• Статья на правах рекламы - 50%

стоимости рекламной площади

• При заключении рекламных кон-

тактов на сумму, превышающую

1000 \$, предусмотрена гибкая

система скидок

Технические требования к рекламным материалам

• Размер журнала после обрезки 200×290 мм

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

Все файлы в формате IBM PC

• Corell Draw, версия до 10.0

• Adobe Photoshop, версия до 7.0

• QuarkXPress, версия до 7.0

• Изображения в формате TIFF,

цветовая модель CMYK,

разрешение 300 dpi

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

Подписано к печати 26.09.2007. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 9,14. Усл. кр.-отт. 9,99. Уч.-изд. л. 10,44 + 12 цв. вклеек.

Цена договорная.

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

© Автоматическая сварка, 2007