

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

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

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
 РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

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

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

ИЗДАТЕЛЬ:

Международная ассоциация
 «Сварка»

Адрес редакции:

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

Редакторы:

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

Свидетельство о государствен-
 ной регистрации КВ 4788
 от 09.01.2001.

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

За содержание рекламных
 материалов редакция журнала
 ответственности не несет.
 Цена договорная.

СОДЕРЖАНИЕ

НОВОСТИ 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Кучук-Яценко С. И., Кирьян В. И., Казымов Б. И., Мирзов И. В., Хоменко В. И. Особенности испытаний на ударную вязкость сварных соединений труб, выполненных автоматической контактной стыковой сваркой оплавлением 5

Кныш В. В., Соловей С. А., Кузьменко А. З. Накопление усталостных повреждений в тавровых сварных соединениях стали 09Г2С в исходном и упрочненном высокочастотной механической проковкой состояниях 12

Кривцун И. В., Сухоруков С. Б., Сидорец В. Н., Ковалев О. Б. Моделирование процессов испарения металла и газодинамики металлического пара в парогазовом канале при лазерной сварке 19

Покляцкий А. Г., Ищенко А. Я., Подбельников С. В. Влияние параметров процесса сварки трением с перемешиванием на формирование швов соединений алюминиевых сплавов толщиной 1,8...2,5 мм 27

Махненко В. И., Шекера В. М., Оноприенко Е. М. Определение параметров упрощенной диаграммы статической коррозионной трещиностойкости трубных сталей при почвенной коррозии 31

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Назаренко О. К. Современное оборудование ИЭС им. Е. О. Патона для электронно-лучевой сварки 36

Головко В. В., Галинич В. И., Гончаров И. А., Осипов Н. Я., Нетьага В. И., Олейник Н. Н. Агломерированные флюсы — новая продукция завода ОАО «Запорожстеклофлюс» 41

Ма Пин, Бондарук А. В. Опыт и перспективы применения оборудования для сварки рельсов в КНР 45

Карасев М. В., Работинский Д. Н., Алимов А. Н., Гребенчук В. Г., Головин С. В., Розерт Р. Сварка стыковых швов мостовых конструкций и трубопроводов порошковой проволокой с использованием оборудования для управления переносом металла 48

Чайка В. Г., Волохатюк Б. И., Чайка Д. В. Серия машин «Чайка» для контактной стыковой сварки ленточных пил, проволок и стержней 53

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Изобретения стран мира 57

По зарубежным журналам 59

ХРОНИКА

Актуальные проблемы производства сварочных материалов (по итогам работы расширенного собрания Ассоциации «Электрод» предприятий стран СНГ) 61

61-я Ежегодная ассамблея Международного института сварки 65

А. С. Зубченко — 70 67

Памяти Х. Герольда 68

ИНФОРМАЦИЯ 69

Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)

WELDING – CUTTING – SURFACING – BRAZING – COATING

№ 10 (666)
October 2008
Published since 1948

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B. E. PATON

Yu. S. Borisov, V. F. Grabin,
A. T. Zelnichenko,
A. Ya. Ishchenko, I. V. Krivtsun,
S. I. Kuchuk-Yatsenko,
Yu. N. Lankin,
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>Kuchuk-Yatsenko S. I., Kiryan V. I., Kazymov B. I., Mirzov I. V., Khomenko V. I.</i> Specifics of impact tests of pipe welded joints made by the automatic flash-butt welding	5
<i>Knysh V. V., Solovey S. A., Kuzmenko A. Z.</i> Accumulation of fatigue damages in welded T-joints of steel 09G2S in initial and strengthened by high-frequency mechanical peening states	12
<i>Krivtsun I. V., Sukhorukov S. B., Sidorets V. N., Kovalyov O. B.</i> Modeling of processes of metal evaporation and gas dynamics of metallic vapor in a keyhole in laser welding	19
<i>Poklyatskiy A. G., Ishchenko A. Ya., Podjelnikov S. V.</i> Effect of parameters of process of friction stir welding on formation of welds of joints of 1.8-2.5 mm thick aluminium alloys	27
<i>Makhnenko V. I., Shekera V. M., Onoprienko E. M.</i> Determination of parameters of a simplified diagram of static corrosion crack resistance of pipe steels at soil corrosion	31

INDUSTRIAL

<i>Nazarenko O. K.</i> Advanced equipment of the E. O. Paton Electric Welding Institute for electron beam welding	36
<i>Golovko V. V., Galinich V. I., Goncharov I. A., Osipov N. Ya., Netyaga V. I., Oleinik N. N.</i> Agglomerated fluxes are the new products of OJSC «Zaporozhsteklolyus» plant	41
<i>Ma Ping, Bondaruk A. V.</i> Experience and prospects of application of rail welding equipment in China	45
<i>Karasev M. V., Rabotinsky D. N., Alimov A. N., Grebenchuk V. G., Golovin S. V., Rozert R.</i> Welding of butt welds of bridge structures and pipelines by flux-cored wire using equipment for metal transfer control	48
<i>Chaika V. G., Volokhatyuk B. I., Chaika D. V.</i> Series of «Chaika» machines for resistance butt welding of bandsaws, wires and rods	53

BRIEF INFORMATION

Inventions all over the world	57
Review of foreign journals	59

NEWS

Actual problems of production of welding consumables (from results of work of broadened meeting of Association «Electrode» of CIS enterprises)	61
61st Annual Assembly of IIW	65
A. S. Zubchenko is 70	67
In memory of H. Herold	68

INFORMATION	69
-------------------	----

СВАРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОМПАНИИ «FRONIUS» ДЛЯ ТЕХНОЛОГИ- ЧЕСКИХ МАНИПУЛЯ- ТОРОВ

Роботы с технологическим манипулятором можно назвать сварщиками будущего. Такое предположение делают эксперты по автоматической сварке относительно их применения в машино- и автомобилестроении. Стремительный прогресс в разработке и применении легких и быстрых роботов с технологическими манипуляторами и успехи на рынке подтверждают, что они правы. В дополнение к широкому диапазону преимуществ этого нового поколения роботов зна-



Современный сварочный робот с технологическим манипулятором, оснащенный сварочной системой TransPuls Synergic

чительную роль для достижения желаемого качества сварных конструкций также имеет способ сварки и используемое оборудование. Это касается прежде всего работы шлангового узла, механизма подачи проволоки и превращения электрической энергии в горелке в высокоэффективную обработку изделия. Работа, проведенная совместно с ведущими производителями роботов, привела к усовершенствованию пакета систем-

ных программ внешнего (сварочного) оборудования для технологических манипуляторов компании «Fronius», установив более высокую планку возможностей.

Новый пакет системных программ и их вариантов разработан для использования комбинации стандартных роботов с технологическими манипуляторами с испытанной и проверенной сварочной системой TransPuls Synergic. Это имеет большое значение для пользователей, поскольку серия TransPuls Synergic охватывает большую часть рынка благодаря своим исключительным сварочным свойствам и широко используется в робототехнике. Пакет системных программ имеет следующие преимущества: простота и надежность программирования робота, снижение нагрузки на робота и, таким образом, возможность повышения его скорости, снижение простоя и повышение срока эксплуатации внутренних, хорошо защищенных, шланговых узлов. Поскольку профиль взаимодействия шланговых узлов уже определен, оператор может также запрограммировать автономный ход работы. Внешнее оборудование технологического манипулятора также повышает доступность и свободу движения робота и позволяет использовать более гибкие сварочные модули, которые также повышают производительность рабочего процесса. В общем пакет системных программ значительно увеличивает надежность и производительность процесса, понижает стоимость и позволяет определять срок службы деталей, подверженных износу.

Пользователь может собрать пакет системных программ в соответствии с типом робота, сварочным заданием или любым другим требованием. Можно выбрать газовую систему или систему с водяным охлаждением, а диапазон сварочного тока будет находиться в пределах от 320 до 500 А. Механизм подачи проволоки также может иметь аналоговый или цифровой контроль. Горелки «Robacta»

сейчас доступны также для проталкивающих устройств. Все сварочное оборудование, начиная от источника питания до насадки горелки, было точно спроектировано и является совместимым. Компания «Fronius» в очередной раз демонстрирует, что может работать как профессиональное, многоцелевое предприятие, которое предоставляет пользователям свободное решение проблем интерфейса.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ – ВЫПРЯМИТЕЛЬ СВАРОЧНЫЙ ВДУ-601С

ОАО Электромашиностроительный завод «Фирма СЭЛ-МА» освоил производство универсального источника питания ВДУ-601С, предназначенного для комплектации полуавтоматов дуговой сварки, а также для ручной дуговой сварки покрытыми электродами (режим ММА).

Выпрямитель в комплекте с полуавтоматом предназначен для сварки плавящейся электродной проволокой в среде защитных газов на постоянном токе (режим МИГ/МАГ).



ВДУ-601С может быть использован в качестве источника сварочного напряжения для механизированной сварки в составе сварочных автоматов, роботов и т. п.

Основные преимущества выпрямителя:

- 100 % продолжительность включения источника;
- плавная регулировка сварочного тока в режиме ММА и сварочного напряжения в режиме МИГ/МАГ;

- универсальный, так как имеет два вида внешних характеристик: жесткие и падающие;

- легкое зажигание и устойчивое горение дуги;

- дистанционное регулирование сварочных параметров с помощью пульта (по заказу);

- класс изоляции H;

- быстроразъемные, безопасные токовые разъемы;

- простота обслуживания и ремонта;

- по заказу потребителей возможна поставка выпрямителей с комплектом колес для удобства перемещения.

Технические характеристики

Напряжение питающей сети, В 3x380

Частота питающей сети, Гц 50

Номинальный сварочный ток, А (при ПВ, %)

- 630 (100 %) (ММА)

- 620 (100 %) (МИГ/МАГ)

Пределы регулирования сварочного тока, А

- 45...630 (ММА)

- 60...630 (МИГ/МАГ)

Пределы регулирования сварочного напряжения, В

- 22...50 (ММА)

- 17...52 (МИГ/МАГ)

Номинальное рабочее напряжение, В

- 44 (ММА)

- 51 (МИГ/МАГ)

Напряжение холостого хода, В, не более 80

Потребляемая мощность при номинальном токе, кВА, не более 50

Диаметр электрода, мм 2...8 (ММА)

Масса, кг, не более 260

Габариты, мм, не более 895x505x835

ТВЕРДЫЙ МАРКЕР

Обычная краска раньше была только в жидком виде из-за того, что ее было крайне трудно перевести в твердый вид для маркерных ручек. Твердый маркер «Sakura» (Япония), который выпускается с различными видами блестящей непрозрачной краски, является первым маркером, в котором краска используется в твердом виде. Он находит применение при нанесении отметок и маркировки на изделиях из

АППАРАТЫ ФИРМЫ «MERKLE» ДЛЯ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ (WWW.MERKLE.RU)



■ PU 300 K
6 сварочных операций в одном аппарате:

- сварка MIG/MAG
- импульсно-дуговая сварка
- сварка TIG
- ручная электродуговая сварка
- сварка самозащитной проволокой
- MIG-пайка

Идеально подходит для цеха и строительной площадки: малогабаритный, легкий. Синергетическое управление. Стандартное исполнение с горелкой TEDAC.

Модель	Сварочный ток	TEDAC
PU 300K	20-300 A	TEDAC



■ PU 400 DW, PU 520 DW
Наилучшие результаты - при сварке алюминия, легированных и нержавеющей сталей, сплавов. Стандартное исполнение - с горелкой TEDAC. Минимальное разбрызгивание при поджиге дуги. PU 520 DW: высокое качество сварки при скорости подачи проволоки до 30 м/мин.

Модель	Сварочный ток	TEDAC
PU 400 DW	20-400 A	TEDAC
PU 520 DW	20-520 A	TEDAC



■ Роботизация процессов сварки
Имеется ряд исполнений и комплектующих для автоматизации и роботизации процессов сварки. Сварочный модуль PU 400 RS имеет встроенную систему адаптации к любому стандартному роботу.

стали, дерева, винила, стекла, резины, кожи и бумаги.

Пишет сразу же после того, как снимается колпачок. Не проскальзывает, не скрипит, не пищит. Для дополнительной экономии вы можете использовать всю ампулу с краской. Высыхает навсегда через 5...7



мин после нанесения маркировки. Краска в маркере не засыхает, даже если с него снят колпачок, в течение 30...60 мин. Неправильную маркировку можно удалить спиртом. Не тускнеет (кроме флуоресцентных цветов) и является стойким к воде. Щетки и растворители не требуются. Маркировку можно наносить одной рукой под любым углом. Невоспламеняющийся и абсолютно безопасный. Пишет даже в перевернутом положении. Не оставляет пятен на бумаге и не впитывается в нее. Выпускается с белой краской и 7 обычными цветами плюс 3 флуоресцентных, что удовлетворяет все потребности в маркировке.



УДК 621.791.052:539.86

ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ, ВЫПОЛНЕННЫХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКОЙ ОПЛАВЛЕНИЕМ

Академик НАН Украины **С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО**, чл.-кор. НАН Украины **В. И. КИРЬЯН**,
Б. И. КАЗЫМОВ, канд. техн. наук, **И. В. МИРЗОВ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
В. И. ХОМЕНКО, канд. техн. наук (ОАО «Стройтрансгаз», г. Москва, РФ)

Исследовано влияние механической неоднородности соединений, выполняемых контактной стыковой сваркой оплавлением, на показатели ударной вязкости KCV , а также естественных концентраторов напряжений, образующихся при нарушении технологии сварки в виде дефектов в зоне соединения, на энергию разрушения. Показано, что недопустимые дефекты сварки являются более мягкими концентраторами по сравнению со стандартным острым надрезом. Показано, что получаемые значения KCV качественных соединений в состоянии после сварки отражают уровень их служебных свойств и высокую эксплуатационную надежность.

Ключевые слова: автоматическая контактная стыковая сварка оплавлением, трубопроводы, механическая неоднородность, прочность, ударная вязкость, энергия разрушения, механические надрезы, естественные концентраторы напряжений, изломы

Автоматическая контактная стыковая сварка оплавлением (КСО) является одной из разновидностей сварки давлением и широко применяется в различных отраслях промышленности [1–4], в том числе в энергетике при строительстве трубопроводов [5–8]. Многолетняя (более 30 лет) практика эксплуатации сварных трубопроводов различного назначения, включая мощные газопроводы диаметром 1420 мм, показала высокую надежность монтажных кольцевых стыков, выполненных способом КСО. Механические свойства соединений, полученных КСО (табл. 1), отвечают требованиям нормативных документов [9, 10], в соответствии

с которыми осуществляется крупномасштабное строительство магистральных и промысловых газо- и нефтепроводов.

В сварных соединениях, полученных способом КСО (рис. 1, *а*) на установленном (оптимальном) режиме, нет дефектов, которые могли бы отрицательно повлиять на их механические свойства [11–13]. Как показано в работах [11, 14], высокая работоспособность сварных соединений, полученных КСО, в условиях эксплуатации гарантируется существующей стабильной связью режим сварки–качество соединений и поддержкой параметров режима на установленном уровне в течение

Таблица 1. Механические свойства сварных соединений трубных сталей, полученных КСО

Группа прочности стали	Место вырезки образцов	Временное сопротивление σ_B^* , МПа	Твердость HV
Х70	Основной металл	$\frac{606...616}{610}$	$\frac{196...205}{197}$
	Сварное соединение	$\frac{600...612}{604}$	$\frac{194...200}{196}^{**}$
Х80	Основной металл	$\frac{612...626}{620}$	$\frac{201...212}{209}$
	Сварное соединение	$\frac{604...623}{608}$	$\frac{195...203}{202}^{**}$

* В числителе приведены минимальное и максимальное значения, в знаменателе — среднее. ** — зона соединения (ЗС).

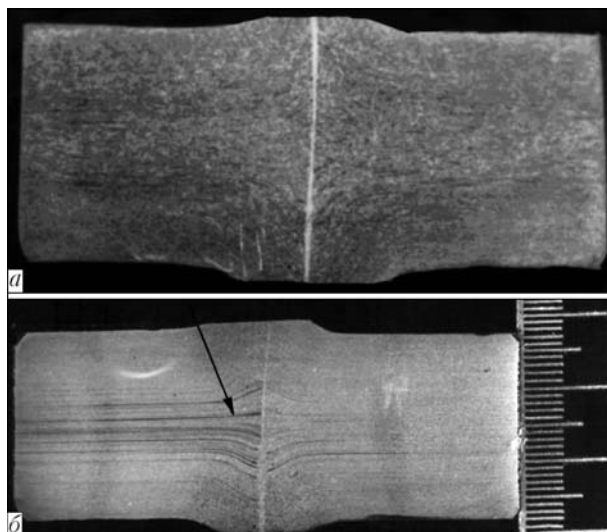


Рис. 1. Макрошлифы сварных соединений трубных сталей, полученных КСО, с различным содержанием сегрегационных включений: *а* — типичная структура современных трубных сталей; *б* — структура с ярко выраженными сегрегационными полосами (показано стрелкой)



всего процесса сварки с комплексной автоматизированной системой управления и контроля. В результате специфических особенностей формирования сварного соединения, главными из которых являются пластическая деформация при осадке на конечной стадии сварки и отсутствие литого металла в ЗС, в нем нет трещин и острых концентраторов напряжений. Появляющиеся в ЗС локальные участки с неметаллическими включениями, перешедшими из металла труб (рис. 1, б), или с микрочастицами, которые могут образовываться при разрушении тонких оксидных пленок в процессе осадки, не идентифицируются как дефекты. Они представляют собой структурную неоднородность [11], которая практически не оказывает влияния на прочностные свойства соединений, полученных способом КСО. Это подтверждено результатами испытаний в условиях статического нагружения стандартных (плоских) и крупномасштабных образцов сварных соединений, полученных на режимах, принятых для сварки труб при строительстве магистральных трубопроводов [15]. Площадь участков со структурной неоднородностью в реальных стыках современных трубных сталей обычно не превышает 20 мм². Кроме того, всесторонняя оценка влияния структурной неоднородности на свойства соединений была проведена на круглых образцах диаметром 6 мм, изготовленных из сварных соединений труб из стали прочностью Х60 с большим количеством сегрегационных включений (см. рис. 1, б). Это позволило существенно увеличить относительную площадь участков со структурной неоднородностью в образце для испытаний. Результаты испытаний приведены в табл. 2. Несмотря на то что на поверхности изломов образцов, разрушившихся по ЗС, обнаружены участки со структурной неоднородностью, имеющей площадь от 30 до 70 % по отношению к площади поперечного сечения образца, полученные значе-

ния напряжений при разрушении σ_p были выше предела текучести металла труб $\sigma_{0,2}$.

Все отмеченное выше предопределяет многолетнюю безаварийную эксплуатацию сварных соединений, полученных КСО. В соответствии с общепринятой мировой практикой для подтверждения гарантий неразрушимости сварных соединений в условиях эксплуатации (независимо от способа сварки) к ним предъявляются требования по вязкости, которую определяли при испытании стандартных ударных образцов с острым надрезом (КЧУ). Нормативные значения ударной вязкости устанавливаются из условия предупреждения разрушений при наличии в сварном соединении наиболее вероятных дефектов различных типов, включая трещиноподобные. Поэтому для обоснования уровня ударной вязкости в последнее время используются подходы и критерии механики разрушения [16], исходное положение которой базируется на том, что разрушение всегда есть следствием инициирования и развития в элементах конструкций трещин. Как известно, образование таких дефектов при сварке труб характерно для электродуговых способов сварки.

Цель настоящей работы состоит в исследовании особенностей разрушения ударных образцов стандартного размера, вырезанных из сварных соединений, полученных КСО, с различными типами искусственных (механические надрезы) и естественных концентраторов напряжений (свойственные технологии КСО дефекты сварки) и определении их влияния на показатели энергии разрушения соединений.

Важно отметить одну специфическую особенность сформированного сварного соединения, полученного КСО, которая имеет принципиальное значение для трактовки результатов испытаний. Такое сварное соединение образуется в результате взаимного сжатия свариваемых деталей, нагретых до сварочных температур. Участок нагрева труб вдоль их образующих имеет неоднородное температурное поле. На соединяемых кромках достигается температура плавления металла, которая по мере удаления от поверхности оплавления постепенно понижается. Градиент температурного поля в зоне нагрева определяется длительностью и интенсивностью оплавления (рис. 2, кривая 1). Поэтому в момент взаимного сжатия труб при осадке металл зоны термического влияния подвергается обжатию различной степени. В результате с обеих сторон ЗС образуется зона термомеханического упрочнения (ЗТМУ) с различными механическими свойствами на отдельных ее участках. Наибольшие значения твердости имеют место на участках, непосредственно примыкающих к ЗС. Твердость металла ЗС существенно ниже (до 30 % в зависимости от свариваемой стали и режима сварки), однако испытания стандартных

Таблица 2. Результаты испытаний на статическое растяжение круглых образцов из стали группы прочности Х60 диаметром 6 мм с участками структурной неоднородности в ЗС

№ образца	Отношение площади структурной неоднородности на поверхности излома образца к площади его поперечного сечения, %	Отношение уровня разрушающих напряжений к нормативным механическим свойствам основного металла, %	
		$\sigma_{0,2}$	σ_b
1	50	110	85
2	70	128	99
3	40	123	95
4	50	130	100
5	30	114	88

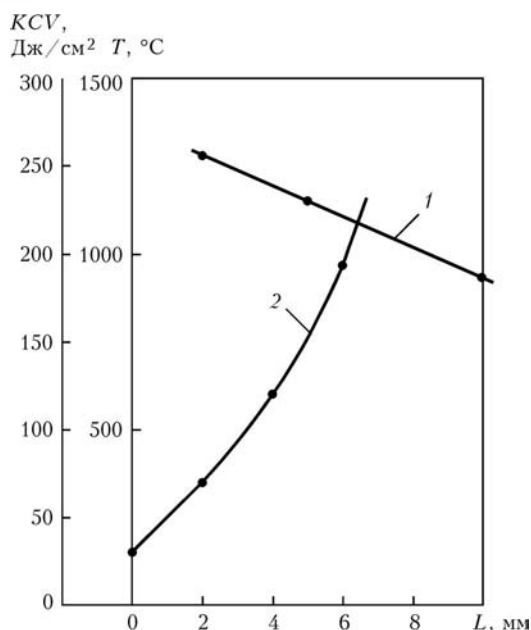


Рис. 2. Изменение температуры T металла трубы в зоне выполнения КСО (1) и ударной вязкости KCV сварного соединения при расположении вершины концентратора на различном расстоянии L от центрального сечения ЗС (2)

ударных образцов с острым надрезом в ЗС показали, что значения KCV недостаточны по сравнению с нормативами, установленными для сварных соединений, полученных электродуговыми способами сварки, с учетом высокой вероятности образования в них трещин. Так, значения KCV качественных соединений трубных сталей контролируемой прокатки группы прочности Х70 при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляют $14,3...56,3\text{ Дж/см}^2$ при среднем значении $29,8\text{ Дж/см}^2$. Заметим, что значительное рассеяние показателей KCV свойственно всем сварным соединениям независимо от способа сварки. На понижение KCV существенно влияет крупное зерно, образующееся под воздействием термического цикла сварки. Минимальное требуемое значение для магистральных трубопроводов, эксплуатируемых при отрицательных температурах ($T_{исп} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$), должно составлять не менее $29,4\text{ Дж/см}^2$ (среднее значение не менее $34,4\text{ Дж/см}^2$) [9]. При $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ значение KCV металла труб достигает 300 Дж/см^2 .

Возможными дефектами в сварных соединениях при недопустимых отклонениях от заданных параметров режима КСО являются непровары, которые могут иметь вид незакрывшихся кратеров и толстых оксидных пленок [8]. Эти дефекты появляются при чрезмерно малом припуске на осадку. Образование толстых оксидных пленок происходит в том случае, если при малом припуске на осадку будет недопустимый перерыв в процессе оплавления перед осадкой, в то время как для получения качественного соединения требуется повышенная стабильная интенсивность оплавления. Если перед осадкой процесс оплавления

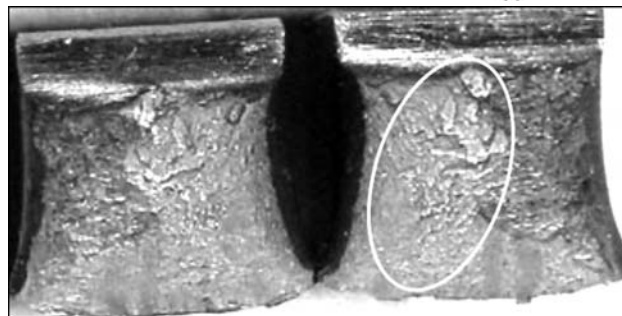


Рис. 3. Вид типичной поверхности излома ударного образца ($KCV = 60\text{ Дж/см}^2$) с раздробленной оксидной пленкой (очерченная область)

прерывался, то в ЗС появляются оксидные пленки. При достаточной осадке тонкие пленки разрываются с образованием прочной металлической связи в местах разрыва. Исследования показали, что в отличие от непроваров в виде толстых оксидных пленок их нельзя идентифицировать как трещины, поскольку сами фрагменты таких пленок также являются связующим звеном между свариваемыми трубами. В данном случае металлическая связь происходит через пленку, что обусловлено ее составом, в котором преобладают низшие оксиды, имеющие одинаковую по строению и близкую по размерам кристаллическую решетку с α -железом [17]. Испытаниями на растяжение крупномасштабных образцов шириной 500 мм , вырезанных из сварных соединений с такими дефектами, установлено, что их критические размеры при $T_{исп} = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ превышают 70 мм^2 [11, 17]. Средние значения ударной вязкости KCV стандартных образцов, вырезанных из стыков с рассматриваемыми дефектами, практически не отличаются от качественных соединений, но при этом наблюдается более значительный разброс результатов ($7...60\text{ Дж/см}^2$). Некоторые образцы показывают сравнительно высокие значения KCV . Например, образец с такой аномальной структурой площадью более 60% площади поперечного значения (рис. 3) имел ударную вязкость 60 Дж/см^2 .

Здесь важно подчеркнуть, что непровары и оксидные пленки со 100% вероятностью обнаруживаются по результатам контроля параметров режима сварки. Достаточно высокую вероятность выявления подобных дефектов имеет метод ультразвукового контроля [18, 19] и широко распространенный при строительстве трубопроводов рентгенконтроль (рис. 4). При этом одним из важных условий является качественное удаление графа. В случае обнаружения указанных выше дефектов стыки подлежат удалению.

Приведенные данные стали основой для разработки методики испытаний по оценке вязкости металла соединений КСО и нормирования ее уровня.

Снижение ударной вязкости отдельных зон сварного соединения по сравнению с металлом

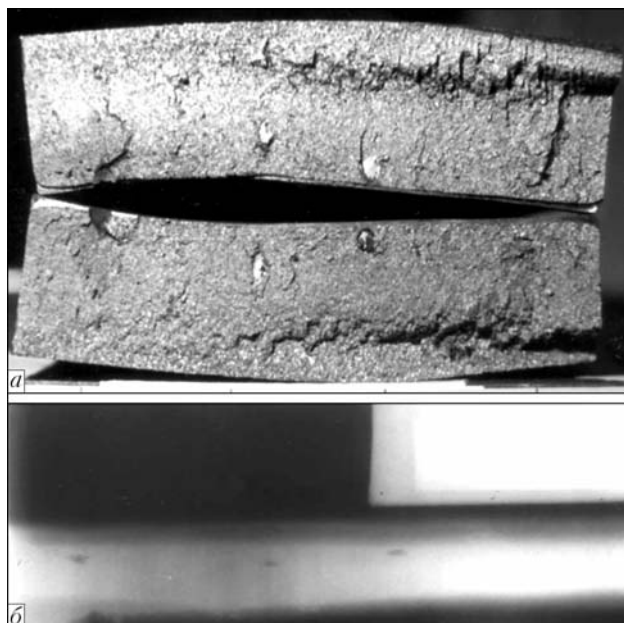


Рис. 4. Излом сварного соединения, полученного с недопустимыми отклонениями параметров режима сварки (а), и рентгенограмма соединения до разрушения (б)

труб наблюдается при всех способах сварки, сопровождаемых высокотемпературными превращениями в металле соединения. При электродуговой сварке продольных стыков труб из микролегированных сталей контролируемой прокатки участок перехода от наплавленного металла к металлу труб представляет собой локальную хрупкую зону, которая в отдельных случаях является причиной неудовлетворительной ударной вязкости. С учетом высокой надежности указанных труб в условиях эксплуатации применительно к свар-

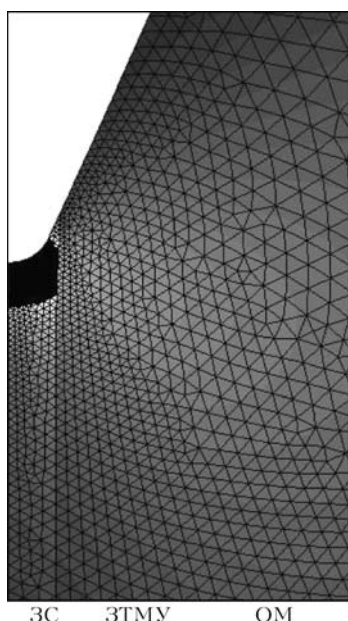


Рис. 5. Локализация зоны пластических деформаций (затемнена) в узкой (шириной 0,6 мм) ЗС при испытании в условиях трехточечного изгиба стандартного образца размером 10×10×55 мм с острым механическим надрезом, расположенным в центральном сечении ЗС

ным соединениям с локальной хрупкой зоной разработана специальная методика испытаний по оценке вязкости разрушения [20].

Решение подобной задачи является весьма актуальным для сварных соединений, полученных КСО, при этом основой могут служить данные об отсутствии в металле соединения трещин и острых концентраторов напряжений.

Снижение значений KCV металла сварного соединения, полученного КСО, наблюдается только в случае испытания стандартных образцов с надрезом по ЗС (см. рис. 2, кривая 2). При этом, как показали результаты решения методом конечных элементов упругопластической задачи о напряженно-деформированном состоянии рассматриваемого образца, который испытывается в условиях трехточечного изгиба, строго ориентированная поперек максимальных растягивающих напряжений кусочная разнородность металла соединения приводит к локализации развития области пластических деформаций (рис. 5), предшествующих разрушению, в узкой ЗС с более низкими механическими свойствами ($\sigma_{0,2}$) по сравнению с примыкающей к ней ЗТМУ. Границу зоны пластических деформаций вблизи механического концентратора (глубина 2 мм, радиус закругления 0,25 мм), расположенного по центру ЗС шириной 0,6 мм, определяли по условию Мизеса–Генки

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_T,$$

где σ_i — интенсивность напряжений; $\sigma_1 \dots \sigma_3$ — главные напряжения; σ_T — предел текучести.

В результате существенного снижения объема пластически деформированного металла в области разрушения и более низких механических свойств ЗС ($\sigma_{0,2}$) по сравнению с основным металлом (ОМ) и ЗТМУ разрушение становится менее энергоемким, а следовательно, показатели ударной вязкости снижаются.

В подобных условиях испытаний по ограничению пластического деформирования металла высокопластичная трубная сталь показала значения ударной вязкости в два раза более низкие по сравнению со стандартными образцами. Из стали группы прочности Х70 были изготовлены и испытаны на ударный изгиб три партии образцов со стандартным V-образным механическим надрезом глубиной 2 мм и радиусом вершины 0,25 мм. Партия № 1 (образцы размером 10×10×55 мм) имела площадь ослабленного сечения 0,8 см² (табл. 3). В партии № 2 толщина образца уменьшена до 5 мм (площадь поперечного сечения 0,4 см²). В партии № 3 на образцы партии № 1 были нанесены боковые выточки, подобные по конфигурации стандартному надрезу, но имеющие глубину 2,5 мм, чтобы площадь ос-

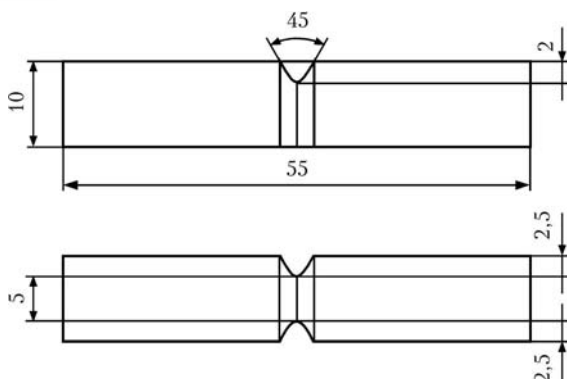


Рис. 6. Схема образца для испытания на ударную вязкость *KCV* стандартного размера с дополнительными двумя боковыми выточками, подобными стандартному надрезу, глубиной 2,5 мм

лабленного сечения соответствовала образцам партии № 2 (рис. 6). Такие боковые механические надрезы исключали образование утяжек на боковых поверхностях образца, создавая жесткое напряженное деформационное состояние в зоне разрушения. Уменьшение толщины образца с 10 (партия № 1) до 5 мм (партия № 2) привело к незначительному повышению ударной вязкости за счет некоторого уменьшения относительно толщины объема металла в средних сечениях образца, находящегося в условиях плоского деформированного состояния ($\varepsilon_z = 0$). В то же время перевод всего сечения образца в указанных выше условиях за счет нанесения боковых выточек (партия № 3) привел к снижению ударной вязкости (табл. 3).

Важными для разработки методики испытаний сварных соединений с целью контроля их соответствия назначению представляются данные об энергии, затрачиваемой на разрушение стандартных образцов с возможными при КСО концентраторами напряжений в виде недопустимых дефектов — непроваров (незакрывшихся кратеров и оксидных пленок). Сначала на ударный изгиб были испытаны образцы стандартного размера (10×10×55 мм), вырезанные поперек качественного сварного соединения, полученного способом КСО, с ЗС в средней его части без механического

Таблица 3. Результаты ударных испытаний трех партий образцов из микролегированной трубной стали контролируемой прокатки группы прочности X70 при комнатной температуре

№ партии образцов	<i>KV</i> , Дж	<i>KCV</i> (среднее значение), Дж/см ²
1	$\frac{217,8...266,4}{248,4}$	310,5
2	$\frac{124,2...133,4}{129,2}$	323,0
3	$\frac{46,8...83,4}{62,6}$	156,5
Примечание. В числителе приведены минимальное и максимальные значения, в знаменателе — среднее.		



Рис. 7. Вид образца без механического надреза, вырезанного из качественного сварного соединения, полученного КСО, после испытания в условиях трехточечного ударного изгиба

надреза (рис. 7). Ни один из них не был разрушен при запасе энергии бойка 300 Дж. Это указывает на высокое сопротивление металла сварного соединения зарождению трещины и разрушению в процессе эксплуатации.

Для выявления степени влияния дефектов сварки на энергию разрушения были изготовлены ударные образцы стандартного размера без искусственных концентраторов напряжения из соединений, специально сваренных с допустимыми и недопустимыми отклонениями основных параметров режима сварки. В данном случае энергия разрушения образца без механического надреза, но с естественными дефектами, свойственными применяемым способам сварки, обозначается как *KD* по аналогии с символами *KU* и *KV*, отражающими тип механического надреза.

Ударные образцы, у которых на поверхности изломов обнаружены участки со структурной неоднородностью площадью от 4 до 25 % относительно площади образца, расположенные непосредственно у его поверхности (некоторые из образцов окончательно разрушались после ударных испытаний), показали энергию удара 153...261 Дж (рис. 8, а). Образцы со структурной неоднородностью, не выходящей на поверхность даже при относительно большой ее площади не разрушались подобно качественным.

Наличие в ЗС внутренних (не выходящих на поверхность образца) недопустимых дефектов — непроваров (рис. 8, б) также приводит к разрушению при достаточно высоких значениях поглощенной энергии. Несмотря на значительный размер дефектов (площадью до 20 % площади поперечного сечения образца) энергия разрушения составляла 202...278 Дж.

Роль недопустимых дефектов в понижении *KD* возрастает, если они выходят на поверхность (рис. 8, в, г). В данном случае энергия разрушения зависит не столько от площади дефекта, сколько от его линейного размера на поверхности. Например, при линейном размере дефекта у поверхности, равном 2,3 мм, энергия удара составила 151 Дж, а при длине 4,4 мм — 96 Дж. Результаты испытаний образцов с дефектами показали, что

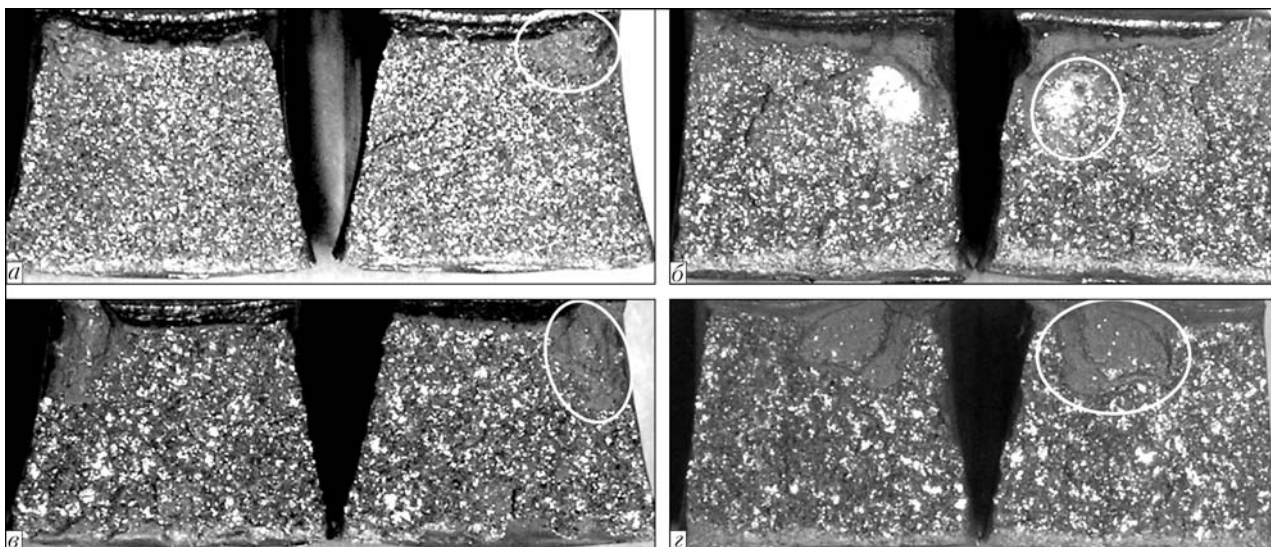


Рис. 8. Поверхности изломов ударных образцов со свойственными технологии КСО дефектами (очерченные области): а — структурная неоднородность у поверхности образца ($KD = 261$ Дж); б — непровар (недопустимый дефект) внутри ЗС ($KD = 278$ Дж); в, г — то же у поверхности образца соответственно при $KD = 151$ и 96 Дж

решающим фактором, понижающим энергию разрушения, является относительное значение линейного размера дефекта у поверхности. В то же время вполне очевидно, что недопустимые дефекты в ЗС, которые в промышленных стыках отсутствуют, представляют собой более мягкие концентраторы напряжения по сравнению со стандартным механическим надрезом глубиной 2 мм. Этот факт важно учитывать при оценке соответствия назначению кольцевых сварных соединений КСО, для которых характерны специфические особенности: с одной стороны, значительная механическая кусочная разнородность в зоне сварки, а с другой, отсутствие трещиноподобных дефектов и достаточно низкий уровень остаточных напряжений.

Таким образом, стандартная методика испытаний на ударную вязкость сварных соединений труб не учитывает специфические особенности соединений, выполняемых автоматической КСО. Эти особенности заключались в заметной механической, строго ориентированной по отношению к ЗС, кусочной разнородности металла и отсутствии предпосылок для образования трещин, что приводит к неадекватной оценке эксплуатационных свойств соединений. В связи с этим совершенствование методики испытаний таких соединений с целью оценки их соответствия назначению может быть направлено на снижение коэффициента концентрации напряжений по сравнению со стандартными образцами и обеспечение пластического деформирования в процессе их разрушения не только в узкой ЗС, но и в ЗТМУ.

Исследование особенностей разрушения ударных образцов стандартного размера с различными искусственными и естественными концентраторами напряжения в ЗС показали, что металл соединений, полученных КСО, отличается достаточно высоким сопротивлением хрупкому разру-

шению. Возможные дефекты в таких соединениях в виде структурной неоднородности практически не оказывают влияния на энергию разрушения образцов без механического надреза, а непровары являются более мягкими концентраторами напряжений по сравнению со стандартным V-образным надрезом. Отсюда очевидно, что получаемое среднее значение ударной вязкости ($KCV = 29,8$ Дж/см²) качественных сварных соединений в состоянии после сварки отражает уровень служебных свойств, обеспечивающих неразрушаемость стыков в условиях эксплуатации. Это подтверждается многолетней (более 30 лет) успешной работой трубопроводов, в частности газопроводов диаметром 1420 мм, выполненных автоматической КСО.

1. Кучук-Яценко С. И. Сварка рельсов непрерывным оплавлением // Автомат. сварка. — 1964. — № 4. — С. 55–62.
2. Контактная стыковая сварка рельсов. Опыт применения и перспективы совершенствования / С. И. Кучук-Яценко, А. В. Дидковский, В. Г. Кривенко, А. В. Гудков // Путь и путевое хоз-во. — 2004. — № 9. — С. 5–8.
3. Контактная стыковая сварка железнодорожных крестовин с рельсовыми окончаниями через промежуточную вставку / С. И. Кучук-Яценко, Ю. В. Швец, Е. В. Думчев и др. // Автомат. сварка. — 2005. — № 1. — С. 6–9.
4. Механизированная линия сборки и сварки картеров блоков мощных транспортных дизелей / В. К. Лебедев, В. И. Тишура, И. А. Черненко и др. // Там же. — 1975. — № 5. — С. 41–44.
5. Контактная стыковая сварка оплавлением котельных труб / Б. И. Казымов, С. И. Кучук-Яценко, В. М. Корсунов, Е. И. Едемский // Там же. — 1972. — № 9. — С. 52–55.
6. Скульский Ю. В., Казымов Б. И. Контактная стыковая сварка бурильных труб повышенной прочности // Там же. — 1981. — № 2. — С. 59–61.
7. Патон Б. Е., Лебедев В. К., Кучук-Яценко С. И. Комплекс «Север-1» для контактной стыковой сварки неповоротных стыков труб больших диаметров // Там же. — 1979. — № 11. — С. 41–45.
8. Кучук-Яценко С. И., Кривенко В. Г., Сахарнов В. А. Контактная стыковая сварка трубопроводов. — Киев: Наук. думка, 1986. — 189 с.



9. *СП 105-34-96*. Свод правил. Производство сварочных работ и контроль качества сварных соединений. — Введ. 01.06.96.
10. *API 1104*. Welding of pipelines and related facilities ASME boiler and pressure vessel. — Publ. 1999.
11. *К методологии* контроля соответствия назначению сварных соединений трубопроводов, полученных контактной сваркой оплавлением / С. И. Кучук-Яценко, В. И. Кирьян, Б. И. Казымов, В. И. Хоменко // *Автомат. сварка*. — 2006. — № 10. — С. 3–9.
12. *Мазур И. И., Серафин О. М., Карпенко М. П.* Электроконтактная сварка трубопроводов: пути совершенствования // *Стр-во трубопроводов*. — 1989. — № 4. — С. 8–11.
13. *Макаренко В. Д., Извеков Ю. Г., Шатило С. П.* Сопротивляемость хрупкому разрушению соединений, выполненных контактной сваркой // Там же. — 1987. — № 7. — С. 25–29.
14. *Кучук-Яценко С. И.* Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1976. — 212 с.
15. *Влияние* некоторых дефектов на прочность стыковых соединений, выполненных контактной сваркой / В. И. Тру-
фяков, В. Г. Мазур, Г. В. Жемчужников и др. // *Автомат. сварка*. — 1987. — № 2. — С. 7–9.
16. *Гиренко В. С., Дядин В. П.* Зависимости между ударной вязкостью и критериями механики разрушения конструкционных материалов и их сварных соединений // Там же. — 1986. — № 10. — С. 61–62.
17. *Кучук-Яценко С. И.* Контактная стыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.
18. *Ультразвуковой* контроль качества соединений, выполненных контактной стыковой сваркой / В. А. Троицкий, В. П. Радько, П. Т. Юшак и др. // *Автомат. сварка*. — 1981. — № 4. — С. 38–40.
19. *Кучук-Яценко С. И., Казымов Б. И., Радько В. П.* Комплексный контроль соединений, выполненных автоматической стыковой сваркой оплавлением // *Техн. диагностика и неразрушающий контроль*. — 1996. — № 4. — С. 46–50.
20. *Кирьян В. И., Семенов С. Е.* Оценка соответствия целевому назначению сварных соединений магистральных трубопроводов из микрелегированных сталей // *Автомат. сварка*. — 1995. — № 3. — С. 4–9.

The influence was studied of mechanical inhomogeneity of joints made by flash-butt welding on impact toughness values *KCV*, as well as natural stress raisers formed at violation of welding technology in the form of defects in the joint zone, on fracture energy. It is shown that inadmissible defects in welding are softer concentrators compared to a standard sharp notch. It is also shown that the obtained *KCV* values of sound joints in as-welded condition reflect the level of their service properties and high operational reliability.

Поступила в редакцию 23.07.2008

МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ ВЫСТАВКА «МЕТАЛЛ-ЭКСПО 2008»

11–14 ноября 2008

г. Москва МВЦ «Крокус Экспо»

14 специальных салонов по всем направлениям металлургии и смежных отраслей промышленности:

- Черные металлы: производство и продукция черной металлургии (заготовки, сортовой и листовой прокат, трубы).
- Цветные металлы: производство и продукция цветной металлургии (сырье, вторичные металлы, полуфабрикаты, прокат, профили).
- Продукция высоких переделов: трубы, лист с покрытием, металлоизделия, спецстали, спецсплавы и др.
- Металлургмаш: оборудование и технологии для металлургической и горнодобывающей промышленности.
- Сырье и материалы для металлургии (ЖРС, ферросплавы, руды цветных металлов, кокс и др.).
- Сбор и переработка ломов черных и цветных металлов.
- Транспорт, логистика, склады в металлургии и металлоторговле, оборудование для складов и сервисных металлоцентров.
- Листо- и сортообработка: резка, профилирование, гибка, сварка.
- Сварочные материалы, оборудование и технологии.
- Огнеупоры, техническая керамика для металлургии и литейного производства.
- Фундаментальные и прикладные научные разработки в области черной и цветной металлургии и нанотехнологий.
- СМИ, ИТ-технологии, интернет-коммерция, автоматизация производственных и бизнес-процессов для металлургии и металлопереработки.
- Экология в металлургии, охрана труда и техника безопасности.
- Финансы, инвестиции, страхование, лизинг.

**Оргкомитет выставки: тел./факс: (495) 901-99-66
<http://www.metal-expo.ru>**



НАКОПЛЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ТАВРОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ СТАЛИ 09Г2С В ИСХОДНОМ И УПРОЧНЕННОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКОЙ СОСТОЯНИЯХ

В. В. КНЫШ, канд. физ.-мат. наук, **С. А. СОЛОВЕЙ**, **А. З. КУЗЬМЕНКО**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

В рамках гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений установлены критерии разрушения тавровых сварных соединений стали 09Г2С в исходном и упрочненном технологией высокочастотной механической проковки (ВМП) после сварки состояниях при возрастающем, убывающем и квазислучайном блоках нагружения. Отмечено, что при прогнозировании долговечности сварных соединений, упрочненных технологией ВМП, вполне приемлемо использовать линейную гипотезу накопления усталостных повреждений. Для сварных соединений в исходном состоянии, накопление повреждений в которых существенно зависит от истории нагружения, предложено правило суммирования повреждений, уменьшающее рассеяние предельной суммарной поврежденности.

Ключевые слова: сварные конструкции, низколегированные стали, тавровые соединения, накопление усталостных повреждений, высокочастотная механическая проковка, циклическая долговечность

$$\sum_{i=1}^k D_i = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \geq 1. \quad (1)$$

В сварных металлоконструкциях, предназначенных для длительной эксплуатации в условиях переменного нагружения, усталостные повреждения накапливаются в околошовных зонах в местах максимальной концентрации рабочих и остаточных напряжений. Решение задач по оценке и прогнозированию долговечности таких конструкций предполагает наряду с расчетным определением напряженно-деформированного состояния их элементов установление закона суммирования усталостных повреждений в зонах концентраторов. Экспериментальному исследованию закономерностей накопления усталостных повреждений в конструкционных сталях посвящено множество работ, в том числе и обзорных [1–3].

При решении задач по оценке долговечности для различного рода нестационарных нагружений наиболее широко используется гипотеза линейного суммирования повреждений, применяемая как для основного материала, так и для сварных соединений, что объясняется ее простотой и отсутствием неизвестных параметров. Впервые она была предложена Пальмгреном в 1924 г. и позднее развита Майнером в 1945 г.

Согласно гипотезе Пальмгрена—Майнера доля поврежденности D_i при любом i -м уровне напряжений цикла прямо пропорциональна отношению количества циклов его действия n_i к количеству циклов до разрушения на этом уровне N_i . Предсказывается, что разрушение произойдет, если

Результаты экспериментальных исследований, полученные при различных видах нагружения для гладких образцов и образцов с концентраторами, не всегда удовлетворительно согласуются с линейной гипотезой Пальмгрена—Майнера. Разброс значений суммы долей поврежденности при разрушении для таких образцов колеблется примерно от 0,1 до 5 [1–3]. При этом отмечается, что порядок приложения нагрузок оказывает существенное влияние на долговечность образца. При режимах нагружения, когда низкие напряжения предшествуют высоким, происходит так называемая тренировка и суммарная поврежденность, как правило, больше единицы. Наиболее существенно тренировка проявляется, когда первоначальный размах напряжений ниже предела выносливости незначительно увеличивают через интервалы в несколько миллионов циклов. При режимах нагружения, когда высокие напряжения предшествуют низким, происходит так называемая перегрузка и суммарная поврежденность, как правило, меньше единицы. Если различные амплитуды циклических напряжений будут чередоваться квазислучайным образом, то экспериментальное значение суммы долей поврежденности в момент разрушения приближается к единице. Поскольку во многих практических приложениях напряжения меняются квазислучайно, использование правила линейного суммирования повреждений Пальмгрена—Майнера для предсказания разрушения часто оказывается приемлемым. Иногда при известных спектрах нагружения, ха-



ракторных для того или иного изделия, улучшение соответствия предсказанной долговечности с экспериментально установленной достигают путем модификации линейной гипотезы Пальмгрена–Майнера, получаемой путем замены в выражении (1) критерия разрушения на величину a , отличающуюся от единицы. В литературе отсутствует единое мнение о методике определения параметра a , чаще всего его значение вычисляется экспериментально при неизменном программном нагружении отдельных образцов с усреднением результатов испытаний.

Данная модификация линейной гипотезы имеет существенный недостаток — она справедлива для строго определенного круга материалов и условий нагружения и не может распространяться на условия, выходящие за рамки первоначального эксперимента.

Что касается сварных соединений, то работ по исследованию закономерностей накопления усталостных повреждений гораздо меньше. В работах [4, 5] отмечается, что в сварных соединениях с высокими остаточными напряжениями растяжения при однократной смене максимальных напряжений цикла переменного нагружения накопление повреждений существенно зависит от порядка нагружения. Кроме того, от порядка нагружения зависит суммарная поврежденность сварных соединений, подвергнутых действию многоступенчатой убывающей или возрастающей последовательности нагружения [6–8]. Разброс приведенных значений суммарной относительной долговечности колеблется примерно от 0,3 до 3. Для других видов нагружения, в частности, при многоблочном и двухступенчатом с многократной сменой напряжений, гипотеза линейного суммирования повреждений получила экспериментальное подтверждение. Так, в работе [4] справедливость линейной гипотезы накопления усталостных повреждений подтвердилась при многоблочном нагружении сварных образцов стали ВСт3 с высокими остаточными напряжениями. Показано, что, начиная с десятиблочного двухступенчатого нагружения, результаты испытаний практически перестают зависеть от порядка первоначального нагружения (перехода с высшего уровня на низший или с низшего на высший).

В последние годы с целью повышения циклической долговечности сварных узлов и элементов металлоконструкций широкое применение находят технологии поверхностного пластического деформирования, в частности, высокочастотная механическая проковка (ВМП). Эффективность применения данной технологии на стадии изготовления изделий при регулярном нагружении хорошо изучена, однако, экспериментальные данные по установлению закона суммирования повреждений в упрочненных ВМП сварных соеди-

нениях практически отсутствуют (следует отметить единственную работу [9]).

Цель настоящей работы — экспериментальная оценка применимости гипотезы линейного суммирования повреждений для тавровых сварных соединений в исходном и упрочненном технологией ВМП состояниях при возрастающем, убывающем и квазислучайном блоках нагружения.

Экспериментальные исследования проводили на образцах тавровых соединений стали 09Г2С ($\sigma_T = 370$ МПа, $\sigma_B = 540$ МПа). Заготовки под образцы из этой стали вырезали из листового проката так, чтобы длинная сторона была ориентирована вдоль проката. Поперечные ребра приваривали угловыми швами с двух сторон ручной электродуговой сваркой электродами марки УО-НИ-13/55. Форма и геометрические размеры образца приведены на рис. 1. Толщина образца обусловлена широкой применимостью в сварных конструкциях проката толщиной 12 мм, а ширину рабочей части выбирали исходя из мощности испытательного оборудования. Известно, что при ширине образца 50 мм уровни остаточных напряжений растяжения в околошовной зоне не достигают предельного значения, а равны примерно, $0,5\sigma_T$, однако, как будет показано ниже, этот фактор не оказывает существенного влияния на результаты исследований. При упрочнении соединений технологией ВМП поверхностному пластическому деформированию подвергалась узкая зона перехода металла шва к основному металлу. Усталостные испытания образцов проводили на испытательной машине УРС 20 при одноосном переменном растяжении с асимметрией цикла $R_\sigma = 0$. Все образцы испытывали до полного разрушения. Первоначально были установлены кривые усталости тавровых сварных соединений ста-

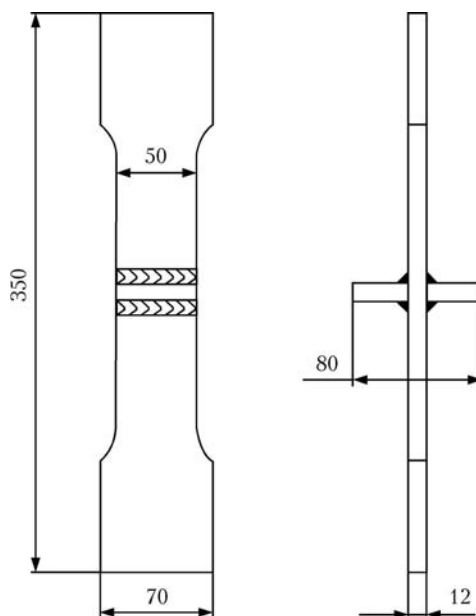


Рис. 1. Схема образца таврового соединения стали 09Г2С

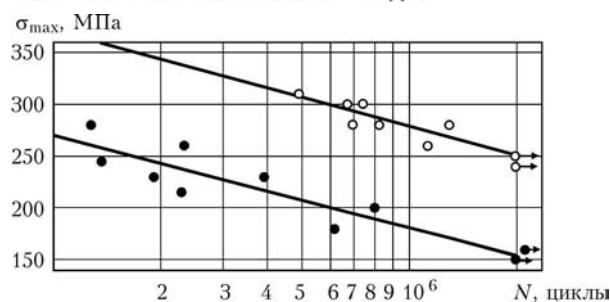


Рис. 2. Кривые усталости тавровых сварных соединений низколегированной стали 09Г2С: ●, ○ — соответственно в исходном и упрочненном после сварки состояниях

ли 09Г2С в исходном и в упрочненном технологией ВМП сразу после сварки состояниях (рис. 2). Для установления критерия разрушения (величина a) в соответствии с линейной гипотезой накопления усталостных повреждений испытывали шесть серий образцов: по три серии для упрочненных и неупрочненных сварных соединений соответственно. При этом каждая серия состояла из трех образцов.

При усталостных испытаниях сварных соединений в исходном состоянии блок включал пять ступеней нагружения с наработкой 20 % долговечности на каждой. Первую серию образцов испытывали при заданном начальном уровне напряжений 180 МПа с последующим увеличением до 260 МПа с шагом 20 МПа (возрастающий вид нагружения). Образцы второй серии испытывали при начальном уровне напряжений 260 МПа с последующим уменьшением до 180 МПа также с шагом 20 МПа (убывающий вид нагружения). Образцы третьей серии испытывали при следующих пяти последовательных уровнях максимальных напряжений цикла: 220, 200, 240, 180, 260 МПа (квазислучайный вид нагружения).

Для сварных соединений, упрочненных технологией ВМП, сразу после сварки блок включал четыре ступени нагружения с наработкой 25 % долговечности на каждой. Четвертую серию об-

разцов испытывали при заданном начальном уровне напряжений 260 МПа с последующим увеличением до 305 МПа с шагом 15 МПа. Образцы пятой серии испытывали при начальном уровне напряжений 305 МПа с последующим уменьшением до 260 МПа также с шагом 15 МПа. Образцы шестой серии испытывали при следующих четырех последовательных уровнях максимальных напряжений цикла: 290, 275, 305, 260 МПа.

Результаты испытаний сварных соединений в исходном состоянии и упрочненных сразу после сварки представлены соответственно в табл. 1 и табл. 2. Установленные предельные значения суммы относительных долговечностей при испытаниях на усталость сварных соединений в исходном состоянии изменяются в пределах от 0,32 до 1,97. При этом порядок приложения нагрузок оказывает существенное влияние на циклическую долговечность сварных соединений. Так, значения суммарной поврежденности, полученные при испытании трех образцов до разрушения, при возрастающей последовательности приложения нагрузок находятся в пределах от 0,32 до 0,56, при убывающей — от 1,48 до 1,97 и при квазислучайном виде нагружения — от 0,84 до 1,25. Эти значения предельных сумм долей поврежденности подтверждают, что порядок приложения нагрузки в сварных соединениях вызывает обратный эффект в закономерностях накопления усталостных повреждений при использовании линейной гипотезы по сравнению с конструкционными сталями [4].

Экспериментально установленные предельные значения суммы относительных долговечностей при испытаниях на усталость всех образцов сварных соединений, упрочненных технологией ВМП сразу после сварки, находятся в более узких границах от 0,65 до 1,08. При этом разброс значений суммарной поврежденности для возрастающей последовательности приложенных нагрузок нахо-

Т а б л и ц а 1. Результаты испытаний на усталость тавровых сварных соединений стали 09Г2С при различных видах блока нагружения

№ образца	Вид блока нагружения	1-е нагружение*		2-е нагружение			3-е нагружение		
		σ_{1max} , МПа	n_1 , тыс. циклы	σ_{2max} , МПа	n_2 , тыс. циклы	n_2/N_2 , %	σ_{3max} , МПа	n_3 , тыс. циклы	n_3/N_3 , %
1	Возрастающий	180	208,8	200	119,9	20,0	220	55,9	15,6**
2		180	208,8	200	72,9	12,2**	—	—	—
3		180	208,8	200	119,9	20,0	220	13,4	3,7**
4	Убывающий	260	25,6	240	42,8	20,0	220	71,6	20,0
5		260	25,6	240	42,8	20,0	220	71,6	20,0
6		260	25,6	240	42,8	20,0	220	71,6	20,0
7	Квазислучайный	220	71,6	200	119,9	20,0	240	42,8	20,0
8		220	71,6	200	119,9	20,0	240	42,8	20,0
9		220	71,6	200	119,9	20,0	240	42,8	20,0



Окончание табл. 1

№ образца	Вид блока нагружения	4-е нагружение			5-е нагружение			$\sum \frac{n_i}{N_i}, \%$
		$\sigma_{4\max}, \text{ МПа}$	$n_4, \text{ тыс. циклы}$	$n_4/N_4, \%$	$\sigma_{5\max}, \text{ МПа}$	$n_5, \text{ тыс. циклы}$	$n_5/N_5, \%$	
1	Возрастающий	—	—	—	—	—	—	55,6
2		—	—	—	—	—	—	32,2
3		—	—	—	—	—	—	43,7
4	Убывающий	200	119,9	20,0	180	1221,8	117,0**	197,0
5		200	119,9	20,0	180	710,7	68,1**	148,1
6		200	119,9	20,0	180	998,2	99,4**	179,4
7	Квазислучайный	180	208,8	20,0	260	5,3	4,1**	84,1
8		180	208,8	20,0	260	57,2	44,7**	124,7
9		180	208,8	20,0	260	23,6	18,4**	98,4

* Для 1-го нагружения $n_1/N_1 = 20,0 \%$. ** Образец разрушился.

дится в пределах от 0,91 до 0,98, для убывающей — от 0,65 до 0,74, а для квазислучайного вида нагружения — от 0,73 до 1,08. Следовательно, для упрочненных ВМП тавровых сварных соединений порядок приложения нагрузок не оказывает существенного влияния на циклическую долговечность соединений.

Установленные закономерности накопления усталостных повреждений в исследуемых сварных соединениях отражают их специфические особенности в сравнении с основным металлом, такие как наличие сварочных остаточных напряжений и геометрического концентратора напряжений α_σ , обусловленного формой соединения. Известно, что в результате взаимодействия остаточных напряжений с напряжением цикла переменного нагружения в зоне концентратора сварного соединения формируется новый цикл напряжений того же размаха, что и исходный, но другой асимметрии. При неизменных параметрах прикладываемого циклического нагружения к сварным соединениям в исходном состоянии ($R_\sigma =$

$= 0$) с высокими остаточными напряжениями растяжения в зонах концентраторов максимальные $\sigma_{\max}^k$ и минимальные $\sigma_{\min}^k$ напряжения цикла определяются соотношениями [10]:

$$\sigma_{\max}^k = \sigma_T \quad (2)$$

$$\sigma_{\min}^k = \sigma_{\text{ост}}^y = \sigma_T - \alpha_\sigma 2\sigma_a \quad (3)$$

где σ_T — предел текучести материала; $\sigma_{\text{ост}}^y$ — установившиеся остаточные напряжения; σ_a — амплитуда напряжений цикла переменного нагружения.

Соотношения (2) и (3) записаны для идеально упругопластического материала.

Принимается, что свойства стали 09Г2С близки к идеально упругопластическим. Следовательно, при построении кривой усталости (рис. 2) тавровых сварных соединений в исходном состоянии с остаточными напряжениями растяжения $\sigma_{\text{ост}} \approx \approx 0,5\sigma_T$ во всем диапазоне приложенных внешних

Таблица 2. Результаты испытаний на усталость тавровых сварных соединений стали 09Г2С, упрочненных технологией ВМП, при различных видах блока нагружения

№ образца	Вид блока нагружения	1-е нагружение*		2-е нагружение*		3-е нагружение			4-е нагружение			$\sum \frac{n_i}{N_i}, \%$
		$\sigma_{1\max}, \text{ МПа}$	$n_1, \text{ тыс. циклы}$	$\sigma_{2\max}, \text{ МПа}$	$n_2, \text{ тыс. циклы}$	$\sigma_{3\max}, \text{ МПа}$	$n_3, \text{ тыс. циклы}$	$n_3/N_3, \%$	$\sigma_{4\max}, \text{ МПа}$	$n_4, \text{ тыс. циклы}$	$n_4/N_4, \%$	
1	Возрастающий	260	387,2	275	261,8	290	185,7	25,0	305	82,4	16,0**	91,0
2		260	387,2	275	261,8	290	185,7	25,0	305	120,3	23,4**	98,4
3		260	387,2	275	261,8	290	185,7	25,0	305	109,7	21,3**	96,3
4	Убывающий	305	128,6	290	185,7	275	248,9	23,8**				73,8
5		305	128,6	290	185,7	275	155,8	14,9**				64,9
6		305	128,6	290	185,7	275	205,3	19,6**				69,6
7	Квазислучайный	290	185,7	275	261,8	305	128,6	25,0	260	503,7	32,5**	107,5
8		290	185,7	275	261,8	305	118,3	23,0**				73,0
9		290	185,7	275	261,8	305	128,6	25,0	260	287,2	18,5	93,5

* Для 1-го и 2-го нагружения n_1/N_1 и $n_2/N_2 = 25,0 \%$. ** Образец разрушился.

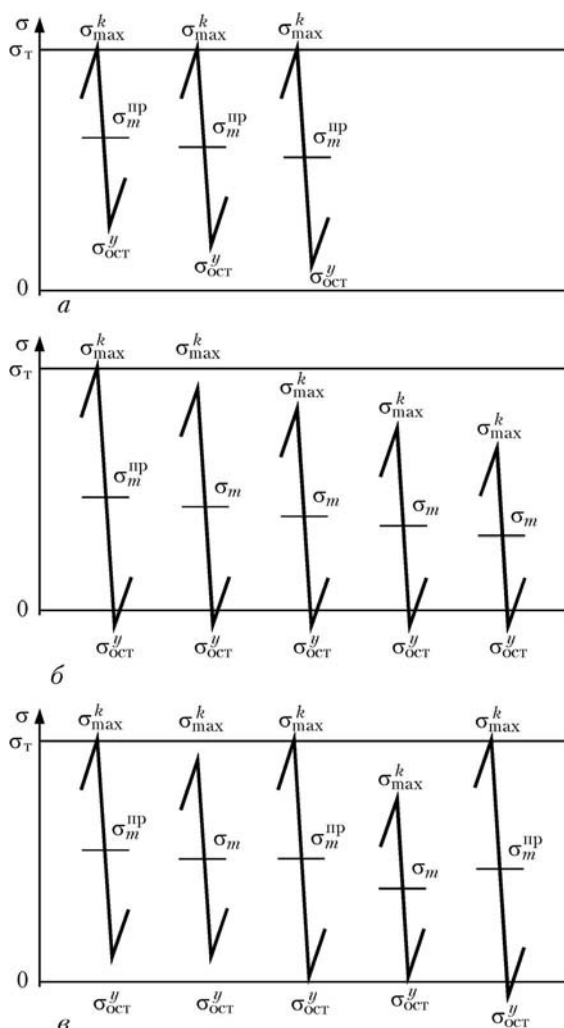


Рис. 3. Схематическое изображение размахов напряжений в зоне концентратора сварного соединения в состоянии после сварки при возрастающем (а), убывающем (б) и квазислучайном (в) блоках нагружения

нагрузок в зоне концентратора ($\alpha_\sigma = 1,5$) реализуется предельный цикл напряжений соответствующего размаха, при котором $\sigma_{\max}^k$ достигают предела текучести материала. Учитывая отмеченное выше, увеличение ширины образца (увеличение уровня остаточных напряжений) не приведет к изменению реализуемого в зоне концентратора цикла напряжений, а следовательно, и не окажет влияния на результаты испытаний.

При блоках нагружения определяющую роль в закономерности накопления усталостных повреждений сварным соединением играет максимальное напряжение первого уровня приложенного нагружения. Известно, что уже после первых циклов начальной ступени нагружения в зоне концентратора формируется установившийся уровень остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}^y$, которые могут быть как растягивающими, так и сжимающими. Они и будут определять максимальные $\sigma_{\max}^k$ и мини-

мальные $\sigma_{\min}^k$ напряжения цикла в зоне концентратора на последующей ступени нагружения:

$$\sigma_{\max}^k = \sigma_{\text{ост}}^y + \alpha_\sigma 2\sigma_m \quad (4)$$

$$\sigma_{\min}^k = \sigma_{\text{ост}}^y \quad (5)$$

Аналогичным образом уровень напряжений предыдущей ступени нагружения будет оказывать влияние на формирование в зоне концентратора цикла переменного нагружения последующей ступени. Следует отметить, что $\sigma_{\max}^k$, определяемое соотношением (4), не может превышать значение, равное пределу текучести материала, поскольку исходя из модели идеально упругопластического материала вызовет лишь развитие пластических деформаций в зоне концентратора.

Используя соотношения (2)–(5), рассмотрим более детально циклы переменных напряжений, которые формируются в зоне концентратора напряжений таврового соединения с учетом влияния остаточных напряжений и коэффициента концентрации напряжений при воздействии приведенных выше последовательностей нагружения. Для сварных соединений в исходном состоянии при возрастающем блоке нагружения (рис. 3, а) на каждой его ступени в зоне концентратора реализуются предельные циклы напряжений ($\sigma_{\max}^k = \sigma_T$), идентичные тем, которые имеют место при построении кривой усталости. При этом влияние остаточных напряжений в процессе нагружения приводит к развитию пластических деформаций в зоне концентратора на каждой его ступени. При убывающем блоке нагружения в зоне концентратора (рис. 3, б) реализуются циклы напряжений, отличные от предельных, начиная со второй ступени нагружения. Их повреждающая способность ниже повреждающей способности предельных циклов напряжений, которые реализуются при тех же уровнях внешнего переменного нагружения при построении кривой усталости сварных соединений в исходном состоянии. При квазислучайном блоке нагружения в зоне концентратора реализуются как предельные, так и отличные от них циклы напряжений (рис. 3, в). Таким образом, при одинаковом уровне внешнего нагружения в зоне концентратора формируется цикл напряжений одинакового размаха, но с зависящей от последовательности приложения нагрузки асимметрией цикла напряжений, которые и определяют его повреждающую способность. Поэтому рассчитывать долю поврежденности сварного соединения по кривой усталости, при построении которой в зоне концентратора реализуются только предельные циклы напряжений, для убывающего и квазислучайного блоков нагружений некоррект-



но. Для этих случаев предлагается суммарную поврежденность определять по формуле:

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \sum_{i=2}^k \frac{n_i}{N_i} \left(\frac{\sigma_{mi}^{\text{пр}}}{\sigma_{mi}} \right), \quad (6)$$

где σ_{mi} — среднее напряжение цикла в зоне концентратора, отвечающее i -му уровню внешнего переменного нагружения; $\sigma_{mi}^{\text{пр}}$ — среднее напряжение предельного цикла в зоне концентратора, отвечающее i -му уровню внешнего переменного нагружения.

Значения суммарной поврежденности сварных соединений в исходном состоянии, полученные по формуле (6), находятся в следующих пределах: при возрастающей последовательности приложения нагрузок — от 0,32 до 0,56, при убывающей последовательности — от 0,96 до 1,20 и при квазислучайном виде нагружения — от 0,80 до 1,15. Как видно, использование соотношения (6) уменьшает разброс значений предельных сумм долей долговечностей с интервала 0,33...1,97 до 0,33...1,2, а средние значения суммарной поврежденности при убывающем и квазислучайном блоках нагружения близки к единице (1,10 и 0,95 соответственно), что подтверждает целесообразность использования данной формулы в расчете долговечности сварных соединений при различных видах нагружения. Достаточно широкий диапазон разброса суммарной поврежденности после применения соотношения (6) свидетельствует о том, что процессы, происходящие в зоне перехода шва на основной металл, весьма сложные и не сводятся только к учету остаточных напряжений. Поэтому экспериментально установленные по выражению (6) средние значения предельной суммы долей накопленной поврежденности для исследуемых видов нагружения следует принимать как критерии усталостного разрушения тавровых сварных соединений стали 09Г2С, поскольку даже для основного материала установить общую закономерность накопления усталостных повреждений в зависимости от режимов изменения нагрузки не удастся [1–3].

В сварных соединениях, упрочненных технологией ВМП сразу после сварки, в зоне концентратора наводятся остаточные напряжения сжатия, которые могут достигать значений, близких к пределу текучести основного материала. Следовательно, при построении кривой усталости тавровых сварных соединений в упрочненном состоянии во всем диапазоне приложенных внешних нагрузок в зоне концентратора реализуется цикл переменных напряжений, максимальные σ_{max}^k и минимальные σ_{min}^k напряжения которого определяются соотношениями (4) и (5). При блоках на-

ружения циклы напряжений, реализуемые в зоне концентратора, идентичны тем, которые имеют место при построении кривой усталости сварных соединений в упрочненном состоянии и не зависят от уровня и порядка приложения напряжений (схематично это показано на рис. 4). При этом средние значения предельной суммарной поврежденности, полученные по линейной гипотезе накопления усталостных повреждений (для возрастающей последовательности приложенных нагрузок 0,95, убывающей 0,69 и для квазислучайного нагружения 0,91), указывают на слабую чувствительность упрочненных соединений к последовательности нагружения. Для исследуемых

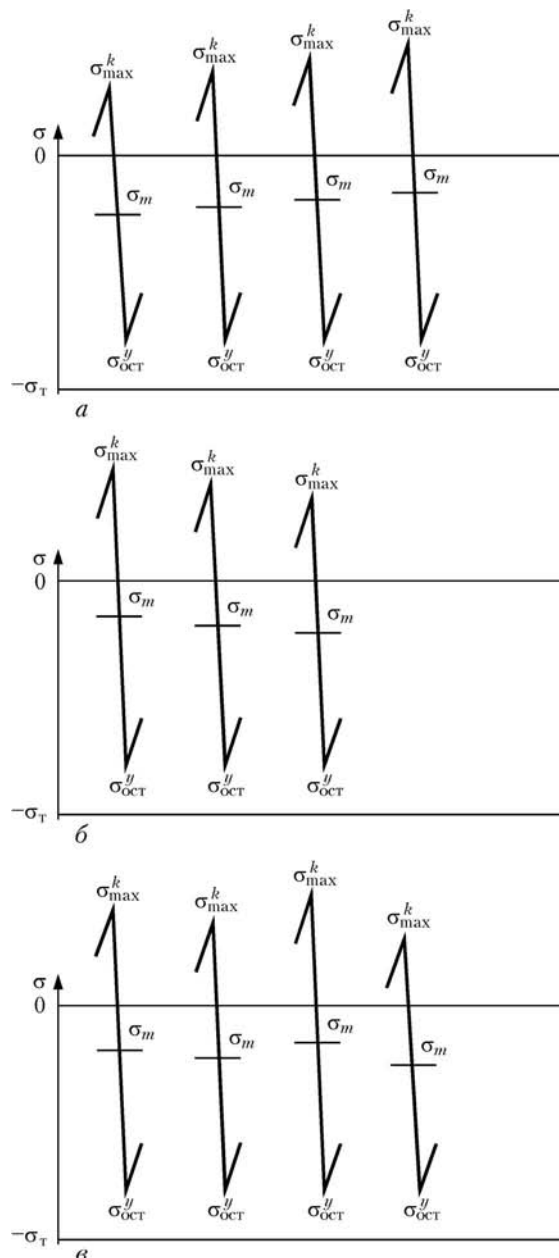


Рис. 4. Схематическое изображение размахов напряжений в зоне концентратора сварного соединения, упрочненного технологией ВМП, при возрастающем (а), убывающем (б) и квазислучайном (в) блоках нагружения



видов нагружения эти значения следует принимать как критерии усталостного разрушения тавровых сварных соединений стали 09Г2С, упрочненных технологией ВМП. Однако в силу их незначительного отличия для упрочненных сварных соединений вполне оправданно применение гипотезы Пальмгрена—Майнера (1). Различия в закономерностях накопления усталостных повреждений и соответственно в разбросе значений предельных сумм долей долговечностей сварных соединений в исходном (0,33...1,2) и упрочненном технологией ВМП (0,65...1,07) состояниях обусловлены их специфическими особенностями: различными коэффициентами концентрации напряжений и уровнями остаточных напряжений; отличием пластических деформаций в зоне перехода шва на основной металл; различным состоянием поверхности и др.

Выводы

1. Установлены кривые усталости тавровых сварных соединений стали 09Г2С в исходном и упрочненном технологией ВМП состояниях после сварки.

2. В рамках гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений установлены критерии разрушения тавровых сварных соединений стали 09Г2С в исходном и упрочненном технологией ВМП после сварки состояниях при возрастающем, убывающем и квазислучайном блоках нагружения. Подтверждено, что порядок приложения нагрузки оказывает существенное влияние на накопление усталостных повреждений в сварных соединениях в исходном состоянии.

3. Экспериментально установлено, что закономерности накопления усталостных повреждений при возрастающем, убывающем и квазислучайном

блоках нагружения тавровых сварных соединений упрочненных ВМП в состоянии после сварки, удовлетворительно согласуются с линейной гипотезой Пальмгрена—Майнера.

4. Предложено соотношение для накопления усталостных повреждений в неупрочненных сварных соединениях, учитывающее влияние остаточных сварочных напряжений и коэффициент концентрации напряжений соединений, которое существенно уменьшает рассеяние предельных сумм повреждений независимо от порядка приложения нагрузок.

1. Manson S. S., Halford G. R. Re-examination of cumulative fatigue damage analysis — an engineering perspective // Eng. Frac. Mech. — 1986. — 25. — P. 539–571.
2. Троценко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник. — Киев: Наук. думка, 1987. — Ч. 1. — 521 с.
3. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 624 с.
4. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / Под ред. В. И. Труфякова. — Киев: Наук. думка, 1990. — 256 с.
5. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. — Киев: Наук. думка, 1973. — 216 с.
6. Gurney T. R. Fatigue of welded structures. — Second ed. — Cambridge: Cambridge Univ. press, 1979. — 298 p.
7. Blom A. F. Spectrum fatigue behaviour of welded joints // Intern. J. Fatigue. — 1998. — 17. — P. 485–491.
8. Sonsino C. M., Lagoda T., Demofonti G. Damage accumulation under variable amplitude loading of welded medium- and high-strength steels // Ibid. — 2004. — 26. — P. 487–495.
9. Huo L., Wang D., Zhang Y. Investigation of the fatigue behaviour of the welded joints treated by TIG dressing and ultrasonic peening under variable amplitude load // Ibid. — 2005. — 27. — P. 95–101.
10. Труфяков В. И., Кудрявцев Ю. Ф., Михеев П. П. О влиянии остаточных напряжений на сопротивление усталости сварных соединений // Автомат. сварка. — 1988. — № 2. — С. 1–4.

Criteria of fracture of welded T-joints on steel 09G2S in the as-welded state and after strengthening by the technology of high-frequency mechanical peening (HMP), loaded in the decreasing, increasing and quasi-random modes, are considered in the context of the hypothesis of linear summation of fatigue damages. It is noted that this hypothesis is well suitable for prediction of fatigue life of the welded joints strengthened by the HMP technology. For the as-welded joints, where accumulation of damages strongly depends upon the loading history, the rule of summation of damages is suggested that decreases scattering of the ultimate total degree of damages.

Поступила в редакцию 15.04.2008

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Решением Президиума ВАК Российской Федерации от 4 июля 2008 г. журнал «Автоматическая сварка» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИСПАРЕНИЯ МЕТАЛЛА И ГАЗОДИНАМИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПАРА В ПАРОГАЗОВОМ КАНАЛЕ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ

Чл.-кор. НАН Украины **И. В. КРИВЦУН**, **С. Б. СУХОРИКОВ**, инж., **В. Н. СИДОРЕЦ**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
О. Б. КОВАЛЕВ, д-р физ.-мат. наук
(Ин-т теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, РФ)

Предложены самосогласованные математические модели процессов испарения металла, поверхностной конденсации и газодинамики металлического пара внутри парогазового канала, формирующегося в расплавленном металле при лазерной сварке с глубоким проплавлением. Проведен численный анализ тепловых и газодинамических характеристик потока пара в парогазовом канале при лазерной сварке стали. Исследовано влияние газодинамических процессов на состояние пара в парогазовом канале, его давление на стенку канала и теплообмен в ванне расплава за счет процессов испарения и конденсации на ее свободной поверхности.

Ключевые слова: лазерная сварка, парогазовый канал, испарение, поверхностная конденсация, газодинамика, металлический пар, математическая модель

Процессы соединения и обработки материалов с использованием высококонцентрированных источников энергии привлекают в последнее время все большее внимание исследователей. Одним из таких процессов является лазерная сварка металлов в режиме глубокого (или «кинжального») проплавления. Необходимая для реализации данного технологического процесса плотность мощности излучения в сфокусированном лазерном пучке должна быть не менее $1 \cdot 10^5$ Вт/см² [1]. Под воздействием такого концентрированного источника энергии свариваемый металл не только плавится, но и локально перегревается до температур, превышающих температуру его кипения. Подобный нагрев вызывает интенсивное испарение металла и разлет пара, который сопровождается появлением реактивной силы, искривляющей поверхность расплава [1, 2]. Вследствие этого в сварочной ванне формируется заполненный металлическим паром глубокий и узкий канал, называемый парогазовым (ПГК).

Существует множество публикаций, посвященных теоретическому исследованию и математическому моделированию физических явлений, протекающих при лазерной сварке с глубоким проплавлением [3, 4], изучению закономерностей формирования ПГК [5–7] и его устойчивости [8, 9], определяющих стабильность процесса сварки. Вместе с тем, при описании испарения металла и газодинамических процессов в потоке металлического пара, от которых зависят давление на поверхность расплава и в итоге форма и размер

ПГК, в большинстве указанных работ используются достаточно грубые приближения, а именно: либо пар внутри канала предполагается равновесным (насыщенным) [3, 8], либо его скорость вблизи испаряющей поверхности выбирается равной локальной скорости звука [7]. Подобные приближения не позволяют корректно рассчитать газодинамические характеристики течения пара в ПГК, а следовательно, и распределение полного (включая реактивное) давления пара на стенку канала. Кроме того, авторы указанных работ не рассматривают возможность конденсации металлического пара на некоторой части поверхности канала, что в совокупности с интенсивным испарением остальной поверхности расплава может существенно влиять на локальный энергетический баланс этой поверхности.

Основными задачами настоящей работы являются разработка самосогласованной математической модели процессов испарения металла, поверхностной конденсации и газодинамики металлического пара в ПГК заданной формы, а также детальный численный анализ газодинамических и тепловых характеристик потока пара. Важной особенностью такой модели должен быть учет неравновесности пара, связанный с возможностью его оттока от поверхности расплавленного металла (испарением) или притока к ней (конденсацией), движением пара вдоль канала и последующим его истечением во внешнюю газовую среду.

Предлагаемая математическая модель основывается на аппроксимации реального ПГК соответствующим осесимметричным углублением в расплаве (рис. 1), свободная поверхность которого в цилиндрической системе координат задается за-

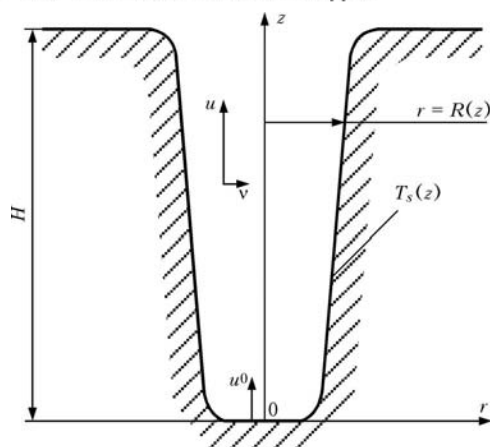


Рис. 1. Аппроксимация ПГК осесимметричным углублением в расплаве (обозначения см. в тексте)

висимостью $r = R(z)$, где $R(z)$ — локальное значение радиуса ПГК, который предположительно медленно изменяется по глубине канала H . Вместо известного (определяемого из решения уравнения переноса тепла в свариваемом металле) пространственного распределения температуры свободной поверхности расплава при построении модели вводится эффективное осесимметричное распределение температуры стенки ПГК $T_s(z)$. Возможностью объемной конденсации металлического пара внутри канала и образованием микрокапель пренебрегается. Наконец, предполагается, что пар, заполняющий канал, не ионизирован, что является достаточно хорошим приближением при лазерной сварке с использованием коротковолнового излучения твердотельных лазеров.

Зависимость давления насыщенного пара p_s вблизи поверхности расплавленного металла от его температуры может быть определена с помощью уравнения Клапейрона–Клаузиуса, записанного, например, в виде [1]

$$p_s = p_0 \exp \left[\frac{\lambda}{k} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_s} \right) \right], \quad (1)$$

где p_0 — атмосферное давление; λ — работа выхода атома из расплава; k — постоянная Больцмана; T_b — температура кипения металла, при которой давление насыщенного пара равно атмосферному. Для учета влияния неравновесности пара, возникающей при конвективном режиме испарения или поверхностной конденсации, на характеристики металлического пара вблизи стенки ПГК используем подход, предложенный в работе [10] для описания процесса быстрого поверхностного испарения металлов в условиях интенсивного лазерного воздействия и обобщенный в [11] для случая поверхностной конденсации. Суть данного подхода состоит в рассмотрении тонкого кнудсеновского слоя, формирующегося в паровой фазе вблизи границы с жидким металлом, как газодинамического разрыва (при определенных предположениях относительно ви-

да функций распределения частиц пара на границе этого слоя) и использовании балансных соотношений, получаемых с помощью законов сохранения потоков частиц, а также потоков их импульса и энергии.

Для обоснования правомерности использования подобного подхода следует принять во внимание то, что в условиях лазерной сварки с глубоким проплавлением толщина кнудсеновского слоя, равная нескольким длинам свободного пробега частиц пара ($L_K \leq 1 \cdot 10^{-2}$ мм), существенно меньше радиуса ПГК ($R \leq 1$ мм). Последнее означает, что кнудсеновский слой можно считать плоским и локально-одномерным, а границу газодинамической области течения пара в ПГК условно совместить с поверхностью канала.

В рамках такого рассмотрения можно получить систему алгебраических уравнений для нахождения распределений по длине канала температуры $\bar{T}(z)$, массовой плотности $\bar{\rho}(z)$ (или давления $\bar{p}(z)$) металлического пара на границе кнудсеновского слоя с газодинамической областью течения [10, 11]:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{T}}{T_s} &= 1 + \frac{\bar{m}^2 \pi}{32} \left(1 - \frac{8}{\bar{m} \sqrt{\pi}} \sqrt{1 + \frac{\bar{m}^2 \pi}{64}} \right); \\ \frac{\bar{\rho}}{\rho_s} &= \left\{ (\bar{m}^2 + \frac{1}{2}) \exp(\bar{m}^2) [1 - \Phi(\bar{m})] - \frac{\bar{m}}{\sqrt{\pi}} \right\} \frac{T_s^{1/2}}{T^{1/2}} + \\ &+ \frac{1}{2} \left\{ 1 - \bar{m} \sqrt{\pi} \exp(\bar{m}^2) [1 - \Phi(\bar{m})] \right\} \frac{T_s}{T}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\bar{m}(z) = \bar{v} \left(\frac{M}{2kT} \right)^{1/2}$; M — масса атома пара; $\bar{v}(z)$ — локальное значение среднемаховой скорости его движения в направлении нормали к поверхности расплава ($\bar{v} > 0$ соответствует испарению, $\bar{v} < 0$ — конденсации); $\rho_s(z) = p_s M / k T_s$ — плотность насыщенного пара, соответствующая

данному значению $T_s(z)$; $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\xi^2) d\xi$

— интеграл вероятности. Здесь и далее все величины, относящиеся к границе газодинамической области течения, отмечены чертой над буквой.

Если считать металлический пар одноатомным идеальным газом, то его газостатическое давление на указанной границе можно определить при помощи известного соотношения

$$\bar{p} = \frac{\bar{\rho} k \bar{T}}{M}, \quad (3)$$

а распределение полного (с учетом реактивной составляющей) давления $P(z)$, оказываемого движущимся (расширяющимся или конденсирующим)



Характеристики пара у поверхности расплава при конвективном испарении и поверхностной конденсации

$\bar{M}$		$\bar{T}/T_s$		$\bar{p}/p_s$		$\bar{p}/p_s$		P/p_s	
0		1		1		1		1	
0,05	– 0,05	0,980	1,021	0,927	1,081	0,908	1,104	0,912	1,108
0,10	– 0,10	0,960	1,041	0,861	1,171	0,827	1,219	0,841	1,240
0,20	– 0,20	0,922	1,084	0,748	1,384	0,690	1,501	0,736	1,602
0,40	– 0,40	0,851	1,175	0,576	1,985	0,490	2,333	0,621	2,956
0,60	– 0,60	0,785	1,274	0,457	2,693	0,358	3,774	0,573	6,039
0,80	– 0,80	0,725	1,380	0,371	4,619	0,269	6,376	0,556	13,181
1,00	– 1,00	0,669	1,495	0,308	7,531	0,206	11,256	0,549	30,023

щимся) паром на поверхность ПГК — с помощью выражения [1]

$$P = \bar{p}(1 + \frac{5}{3} \bar{M}^2), \quad (4)$$

где $\bar{M}(z) \equiv \bar{v}/\bar{s}$ — значение числа Маха на границе газодинамической области кнудсеновского слоя; $\bar{s} = \sqrt{5kT}/3M$ — локальная скорость звука. Следует заметить, что скорость пара на этой границе должна быть ограничена условием $\bar{M} \leq 1$ [10].

Расчетные значения безразмерных величин $\bar{p}/p_s$, $\bar{T}/T_s$, $\bar{p}/p_s$ и величины P/p_s , характеризующей давление на поверхность расплавленного металла, в зависимости от числа Маха потока пара через границу газодинамической области представлены в таблице. Как следует из приведенных данных, при увеличении скорости оттока пара от испаряющейся поверхности его газостатическое давление и давление на указанную поверхность становятся существенно ниже соответствующего давления насыщенного пара. Что касается $\bar{p}/p_s$ и P/p_s при конденсации пара на поверхности расплава, то их значения могут намного превышать p_s .

Проведенный анализ кнудсеновского слоя вблизи поверхности ПГК не дает информации о значениях $\bar{M}$ потока пара через границу газодинамической области течения. Иными словами, нормальная к поверхности расплава скорость пара здесь может быть выбрана произвольно без нарушения законов сохранения массы, импульса и энергии при переходе через кнудсеновский слой [10]. Этот результат не является необычным, поскольку то же самое справедливо и в отношении условий Рэнкина–Гюгонио для ударных волн [12].

Распределение значений $\bar{v}$ (или $\bar{M}$) вдоль поверхности ПГК должно определяться только на основе решения газодинамических уравнений, описывающих течение пара в этом канале.

Для моделирования газодинамики и теплового состояния металлического пара в рассмат-

риваемом осесимметричном ПГК (см. рис. 1) используем систему уравнений, описывающих ламинарное движение сжимаемого газа [12]. Полагая, что аксиальная (в направлении оси канала) компонента скорости течения пара $u(r, z)$ существенно больше радиальной компоненты $v(r, z)$ и считая изменения всех величин наиболее существенными в радиальном направлении, эту систему уравнений можно записать в приближении пограничного слоя для внутренних осесимметричных течений [13]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv) + \frac{\partial}{\partial z}(ru) = 0; \quad (5)$$

$$\rho \left(v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \eta \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{d\bar{p}}{dz}; \quad (6)$$

$$\rho C_p \left(v \frac{\partial T}{\partial r} + u \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \chi \frac{\partial T}{\partial r} \right) + u \frac{d\bar{p}}{dz} + \eta \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2. \quad (7)$$

Здесь $\rho(T, \bar{p})$ — массовая плотность; $\eta(T)$ — коэффициент динамической вязкости; $\chi(T)$ — коэффициент теплопроводности пара; C_p — его удельная теплоемкость при постоянном давлении; $T(r, z)$ — пространственное распределение температуры в потоке пара. Поскольку в рамках приближения пограничного слоя давление по его сечению постоянно [13], в этих уравнениях используется соответствующее значение газостатического давления пара вблизи стенки ПГК $\bar{p}(z)$.

Распределение значений $d\bar{p}/dz$, а следовательно, и давления пара $\bar{p}$ по длине ПГК может быть найдено из интегрального условия баланса массового расхода пара через поперечное сечение ПГК [14] с учетом поступления пара в газодинамическую область (за счет испарения стенки) или его ухода (за счет конденсации на стенке канала):

$$\begin{aligned} G(z) &\equiv 2\pi \int_0^{R(z)} r \rho(r, z) u(r, z) dr = \\ &= G(0) + 2\pi \int_0^z R(r) \bar{p}(r) \bar{v}(r) dz. \end{aligned} \quad (8)$$



Здесь $G(0)$ — массовый расход пара в начальном сечении канала (при $z = 0$); величина $\bar{\rho}(z)$ выражается через плотность насыщенного пара $\rho_s(z)$, соответствующую заданной температуре поверхности ПГК $T_s(z)$, и скорость пара $\bar{v}(z)$, определяемую в каждом сечении канала с помощью уравнений (2) и соотношения (3) при подстановке в него найденного значения $\bar{p}(z)$.

Для замыкания системы уравнений (5)–(7) необходимо определить зависимости плотности, удельной теплоемкости и коэффициентов переноса металлического пара от температуры и давления. Учитывая сделанное ранее предположение о том, что пар является идеальным одноатомным газом, по аналогии с (3) можем записать

$$\rho = \frac{\bar{p}M}{kT}, \quad (9)$$

а его теплоемкость при постоянном давлении определить как [15]:

$$C_p = \frac{5}{2} \frac{k}{M}. \quad (10)$$

Что касается коэффициентов вязкости и теплопроводности металлического пара, то, например, в рамках модели твердых упругих шариков эти величины могут быть вычислены следующим образом [16]:

$$\chi = \frac{75}{64} \frac{\sqrt{k^3 T}}{\sqrt{\pi M} r_0^2}, \quad \eta = \frac{5}{16} \frac{\sqrt{k T M}}{\sqrt{\pi} r_0^2}, \quad (11)$$

где r_0 — эффективный радиус атома металла.

Для решения системы дифференциальных уравнений (5)–(7) необходимо также задать соответствующие краевые и начальные (входные) условия на границах расчетной области $\{0 \leq r \leq R(z); 0 \leq z \leq H\}$ (см. рис. 1). Граничные условия на оси ПГК выбираются из соображений, что течение пара характеризуется цилиндрической симметрией:

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0; \quad v = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = 0. \quad (12)$$

На боковой поверхности канала, точнее, на внешней границе кнудсеновского слоя, предполагается, что касательная к поверхности компонента скорости пара равна нулю, а его температура выбирается равной соответствующему значению температуры на границе газодинамической области, определяемому по известным значениям $T_s(z)$ и при помощи первого уравнения (2), т. е.

$$u = 0; \quad T(z) = \bar{T}(z) \quad \text{при } r = R(z). \quad (13)$$

Входные условия на дне ПГК задаются исходя из предположения, что здесь существует некото-

рая скорость пара u_0 , направленная вдоль оси Oz и постоянная по сечению канала:

$$u(r) = u^0; \quad v(r) = 0; \quad T(r) = \bar{T}(0) \quad \text{при } z = 0. \quad (14)$$

Здесь значения $\bar{T}(0)$, как и ранее, могут быть найдены с помощью первого уравнения (2) при подстановке в него $T_s(0)$ и $\bar{v}(0) = u^0$. Выбранные условия позволяют определить входящий в интегральный баланс (8) массовый расход пара в начальном сечении канала:

$$G(0) = \pi R^2(0) \bar{\rho}(0) u^0, \quad (15)$$

где $\bar{\rho}(0)$ — соответствующее указанным выше значениям температуры и скорости металлического пара значение его плотности, а также вычислить давление пара вблизи дна канала $\bar{p}(0)$, которое может быть рассчитано с помощью соотношения (3). Наконец, для нахождения неизвестного параметра u^0 можно использовать интегральное условие

$$\bar{p}(H) = \bar{p}(0) + \int_0^H \frac{d\bar{p}}{dz} dz, \quad (16)$$

где $\bar{p}(H)$ — давление металлического пара на выходе из канала, равное давлению во внешней газовой среде.

Этим исчерпывается описание самосогласованной математической модели процессов испарения металла, поверхностной конденсации и газодинамики металлического пара в осесимметричном ПГК.

Систему нелинейных дифференциальных уравнений (5)–(7) решали методом конечных разностей с использованием основной разностной схемы для интегрирования уравнений пограничного слоя [17]. Уравнения второго порядка (6), (7) аппроксимировали по неявной двухслойной шеститочечной разностной схеме, а первого порядка (5) — по явной четырехточечной. Полученную алгебраическую систему разностных уравнений решали методом прогонки с применением итераций.

На основе описанной вычислительной схемы создано соответствующее программное обеспечение и проведен детальный численный анализ тепловых и газодинамических характеристик течения металлического пара (железа) в ПГК заданной формы. При проведении расчетов использовали зависимости температуры поверхности расплава $T_s(z)$ и радиуса ПГК $R(z)$, полученные с помощью математической модели [3] применительно к условиям лазерной сварки низкоуглеродистой стали (мощность лазерного пучка составляет 2,5 кВт, его радиус в фокальной плоскости — 0,25 мм,



фокусное расстояние линзы — 150 мм, скорость сварки — 0,8 см/с, защитный газ — гелий, давление во внешней среде атмосферное). Форма и размеры такого канала представлены на рис. 2.

Радиальные распределения скорости и температуры металлического пара в контрольных сечениях рассматриваемого канала показаны на рис. 3. Как следует из приведенных здесь расчетных данных, аксиальная компонента скорости пара во всех сечениях ПГК имеет наибольшее значение на его оси и убывает до нуля по мере приближения к стенке канала (рис. 3, а), а ее профиль напоминает профиль скорости при течении Пуазейля [12]. На выходе из канала (при $z = H = 6,9$ мм) максимальная скорость пара достигает приблизительно 150 м/с.

Расчетные значения радиальной компоненты скорости оказываются существенно меньшими (рис. 3, б), что позволяет полностью оправдать использование приближения пограничного слоя, вместе с тем течение пара в радиальном направлении имеет достаточно сложную структуру. Вблизи дна ПГК (при $z = 1$ мм) радиальная скорость практически равна нулю, за исключением небольшой области, примыкающей к боковой стенке канала, где она имеет отрицательные значения, что соответствует движению пара от ис-

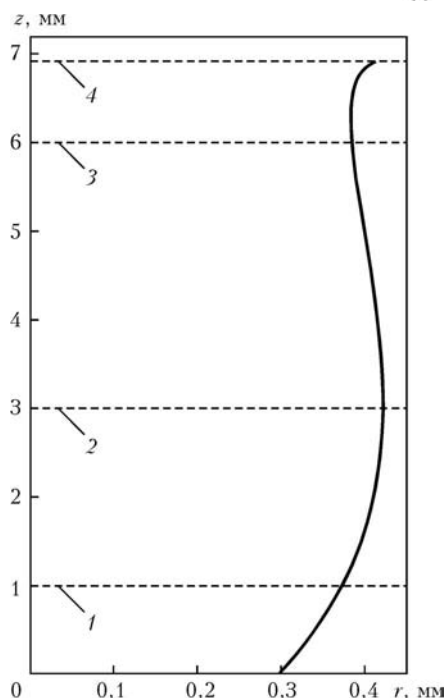


Рис. 2. Форма и размеры ПГК, используемые при выполнении расчетов: 1–4 — контрольные сечения канала

парящейся поверхности к оси ПГК (кривая 1 на рис. 3, б). При $z = 3$ мм значения радиальной скорости становятся положительными по всему

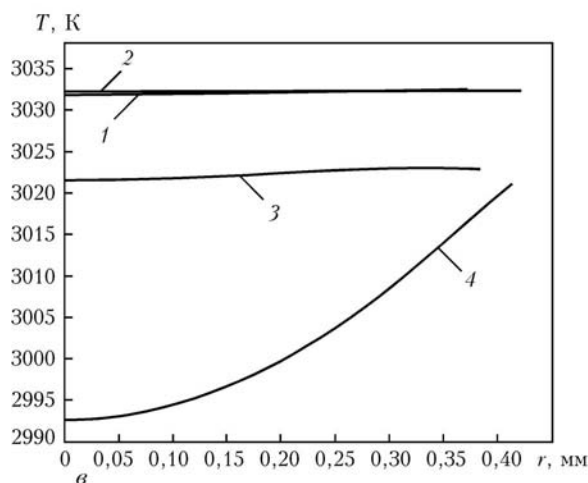
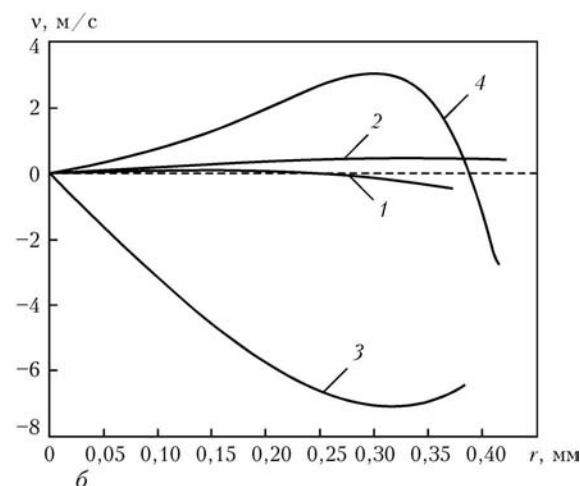
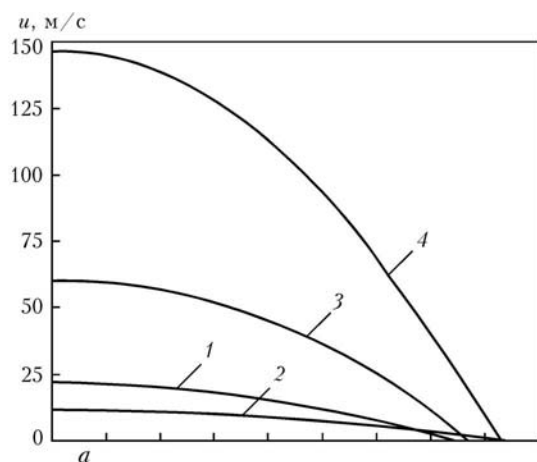


Рис. 3. Радиальные распределения аксиальной (а) и радиальной (б) компонент скорости v металлического пара, а также его температуры T (в) в сечениях ПГК: 1–4 — см. рис. 2

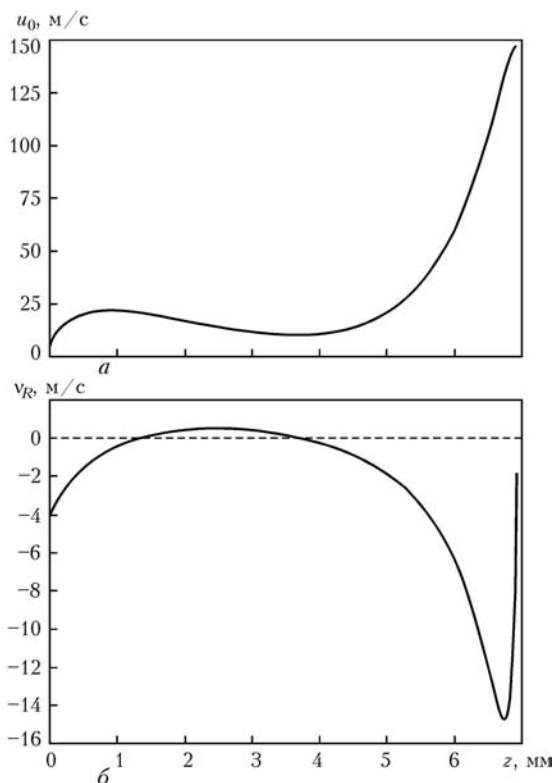


Рис. 4. Распределения аксиальной скорости u_0 металлического пара по оси ПГК (а) и радиальной скорости пара v_R вблизи поверхности расплава (б) по глубине канала

сечению канала (кривая 2), что означает переход от испарения стенки к поверхностной конденсации пара. Затем при $z = 6$ мм пар опять направляется от испаряющейся стенки к оси канала (кривая 3) и, наконец, в выходном сечении ($z = 6,9$ мм) пар в приосевой зоне ПГК движется в направлении стенки, а в пристеночной — к оси канала (кривая 4).

Расчет температуры металлического пара показал, что наименьшей температурой в любом сечении канала характеризуется пар, находящийся в приосевой зоне ПГК, причем по мере приближения к выходному сечению канала неравномерность распределения температуры усиливается (рис. 3, в). Это связано с известным эффектом охлаждения пара при его расширении [12, 15].

Распределения скорости пара на оси $u_0(z) \equiv u(0, z)$ и вблизи стенки канала $v_R(z) \equiv v(R, z) = -\bar{v}(z)$ по его глубине представлены на рис. 4. Как следует из рис. 4, а, движение металлического пара вдоль ПГК вначале ускоряется, потом несколько тормозится, а затем ускоряется снова. Это связано с изменением его массового расхода через поперечное сечение ПГК вследствие процессов испарения и поверхностной конденсации на стенке канала. Действительно, радиальная скорость пара у стенки канала (на границе газодинамической области) отрицательна вблизи дна ПГК (см. рис. 4, б), т. е. пар втекает в канал, что соответствует участку испарения; затем при $z > 1,4$ мм

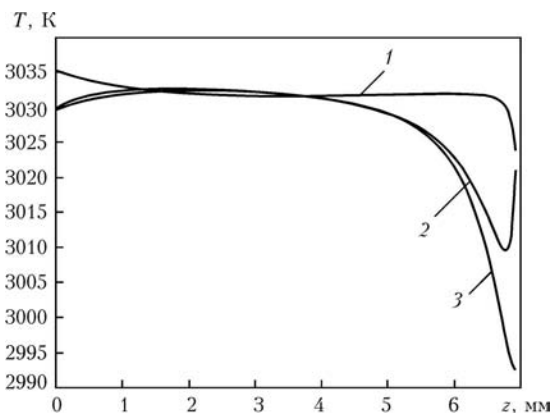


Рис. 5. Распределение температуры поверхности расплава (1), металлического пара вблизи этой поверхности (2) и на оси ПГК (3)

она становится положительной, что соответствует участку поверхностной конденсации и, как следствие, уменьшению значений G и u_0 ; наконец, при $z > 3,7$ мм поверхностная конденсация опять сменяется испарением стенки, причем эта величина достигает вблизи выходного сечения максимального значения — около 15 м/с (рис. 4, б).

Наличие участка поверхностной конденсации пара хорошо видно и на рис. 5, 6, где показано распределение температуры и давления пара по длине канала. Как следует из расчетных данных, представленных на этих рисунках, температура и давление пара вблизи стенки ПГК на участке $1,4 \text{ мм} < z < 3,7 \text{ мм}$ превышают соответствующие значения T_s и p_s (кривые 1, 2 на рис. 5 и 6), т. е. здесь имеет место конденсация металлического пара на поверхности канала. Что касается значений давления пара и его полного (включая реактивное) давления на стенку канала, то, например, вблизи выходного сечения ПГК значения указанных величин могут быть почти на $5 \cdot 10^3$ Па меньше, чем при использовании модели насыщенного пара (рис. 6). Таким образом, при определении формы ПГК, а следовательно, и распределения мощности лазерного излучения, поглощаемого свободной поверхностью расплава, следует учитывать газодинамику пара внутри канала.

Еще одним фактором, который может оказаться существенным при рассмотрении энергетического баланса поверхности ПГК, является теплообмен за счет процессов испарения и поверхностной конденсации металлического пара на стенке канала. На рис. 7 приведено распределение q по глубине канала теплового потока, переносимого металлическим паром через поверхность ПГК:

$$q(z) = \frac{\bar{p}(z)}{M} \bar{v}(z) \left[\lambda + \frac{5}{2} k \bar{T}(z) + \frac{1}{2} M \bar{v}^2(z) \right]. \quad (17)$$

Как следует из расчетных данных, представленных на этом рисунке, поверхность ПГК можно разделить на три участка. Участок положитель-

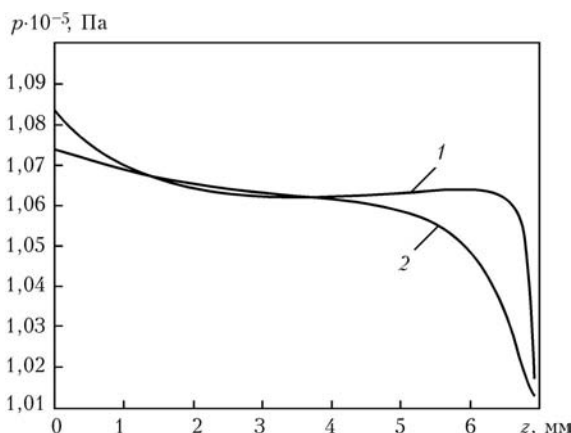


Рис. 6. Распределение давления p по глубине канала: 1 — давление насыщенного пара, соответствующее данному значению температуры поверхности ПГК; 2 — металлического пара, полученного в результате решения газодинамической задачи

ного теплового потока, направленного на стенку канала (нагрев за счет поверхностной конденсации пара и выделяющейся при этом энергии связи атомов в расплаве), разделяет два участка, где пар уносит энергию (охлаждение поверхности расплава в результате испарения). Максимальное по абсолютной величине значение теплового потока, уносимого паром с поверхности ПГК, достигается вблизи выхода из канала и составляет приблизительно $3 \cdot 10^7$ Вт/м². Такие существенные значения теплового потока свидетельствуют о необходимости его учета при анализе процессов теплообмена на поверхности сварочной ванны применительно к условиям лазерной сварки с глубоким проплавлением.

Чтобы охарактеризовать состояние металлического пара, заполняющего ПГК, можно использовать безразмерный параметр θ , определяющий степень переохлаждения пара [18]:

$$\theta = \frac{T_p - T}{T_p}, \quad (18)$$

где T_p — температура насыщенного пара при заданной плотности; T — фактическая температура пара. При таком задании степени переохлаждения условие $\theta > 0$ соответствует пересыщенному (переохлажденному) пару, а $\theta < 0$ — перегретому (в первом случае пар может конденсироваться в объеме ПГК, образуя частицы конденсата, рассеивающие лазерное излучение). Расчеты показывают, что исходя из состояния пара рассматриваемый ПГК можно разделить на три зоны. Там, где имеет место испарение стенки канала, пар оказывается пересыщенным, что соответствует данным [2]. На участке, где происходит поверхностная конденсация, он является перегретым. Степень переохлаждения металлического пара в исследуемом ПГК невелика и составляет всего

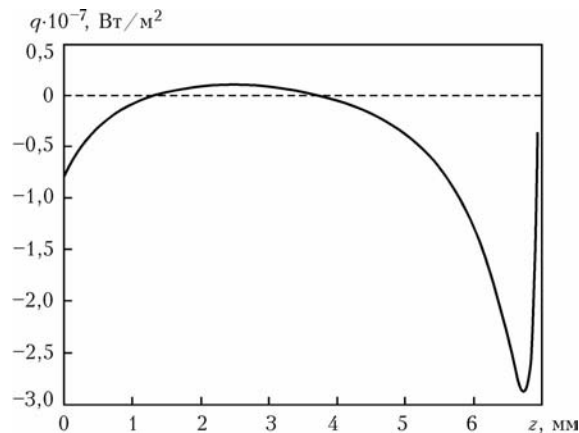


Рис. 7. Распределение q по глубине канала теплового потока, переносимого паром через его поверхность

несколько процентов, поэтому пренебрежение объемной конденсацией пара вполне оправдано.

Авторы благодарят проф. Г. А. Туричину за предоставленные им расчетные данные о форме, размерах и температуре поверхности парогазового канала при лазерной сварке низкоуглеродистой стали.

Работа была поддержана Национальной академией наук Украины и Сибирским отделением Российской академии наук в рамках интеграционного проекта 2.10 «Лазерная обработка материалов. Научные основы применения высококонцентрированных источников энергии при сварке металлов и сплавов».

1. Воздействие лазерного излучения на материалы / Р. В. Арутюнян, В. Ю. Баранов, Л. А. Большов и др. — М.: Наука, 1989. — 367 с.
2. Действие излучения большой мощности на металлы / С. И. Анисимов, Я. А. Имас, Г. С. Романов и др. — М.: Наука, 1970. — 272 с.
3. Лопота В. А., Сухов Ю. Т., Туричин Г. А. Модель лазерной сварки с глубоким проплавлением для применения в технологии // Изв. АН СССР. Сер. физ. — 1997. — **61**, № 8. — С. 1613–1618.
4. Heat transfer and fluid flow during keyhole mode laser welding of tantalum, Ti-6Al-4V, 304L stainless steel and vanadium / R. Rai, J. W. Elmer, T. A. Palmer et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2007. — **40**. — P. 5733–5766.
5. Kaplan A. A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile // Ibid. — 1994. — **27**. — P. 1805–1814.
6. Transition model for the keyhole during laser welding / V. V. Semak, W. D. Bragg, B. Damkroger et al. // Ibid. — 1999. — **32**. — P. 61–64.
7. Amara E. H., Fabbro R., Bendib A. Modeling of the compressible flow induced in a keyhole during laser welding // J. Appl. Phys. — 2003. — **93**, № 7. — P. 4289–4296.
8. Туричин Г. А. Гидродинамические аспекты устойчивости парогазового канала при лучевых видах сварки // Физ. и химия обработки материалов. — 1996. — № 4. — С. 74–82.
9. Mechanism of keyhole formation and stability in stationary laser welding / J. Y. Lee, S. H. Ko, D. F. Farson et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2002. — **35**. — P. 1570–1576.
10. Knight Ch. J. Theoretical modeling of rapid surface vaporization with back pressure // AIAA J. — 1979. — **17**, № 5. — P. 519–523.



11. Демченко В. Ф., Кривцун І. В., Нестеренков В. М. Модель процесів випаровування — конденсації на плоскій поверхні // Доп. Нац. академії наук України. — 2004. — № 1. — С. 90–94.
12. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: В X т. — М.: Наука, 1986. — Т. VI: Гидродинамика. — 736 с.
13. Лойцянский Л. Г. Ламинарный пограничный слой. — М.: Физматгиз, 1962. — 480 с.
14. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2 т. — М.: Мир, 1990. — Т. 1. — 384 с.
15. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: В X т. — М.: Наука, 1976. — Т. V: Статистическая физика. — 585 с.
16. Смирнов Б. М. Физика слабоионизованного газа. — М.: Наука, 1978. — 416 с.
17. Пасконов В. М., Полежаев В. И., Чудов Л. А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. — М.: Наука, 1984. — 286 с.
18. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — М.: Наука, 1966. — 688 с.

The self-consistent mathematical models are suggested to describe the processes of metal evaporation, surface condensation and gas-dynamics of the metal vapour inside a keyhole formed in molten metal in deep-penetration laser welding. Numerical analysis of thermal and gas-dynamic characteristics of a flow of vapour inside the keyhole in laser welding of steel has been conducted. The effect of gas-dynamic processes on the state of vapour in the keyhole, its pressure on the keyhole wall, and heat exchange in the molten pool induced by the processes of evaporation and condensation on its free surface has been studied.

Поступила в редакцию 26.08.2008

VI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ»

23–25 сентября 2009

г. Санкт-Петербург

Тематика конференции:

1. Физические основы лучевых технологий
2. Нанوفотоника
3. Математическое моделирование лучевых технологий
4. Технологии резки, прошивки отверстий, маркировки
5. Технологии сварки, наплавки и прототипирования
6. Оборудование для лучевых технологий
7. Контроль качества и безопасность лучевых технологий
8. Фотонные технологии живых систем и медицинское применение лазеров
9. Экономические аспекты лазерных и лучевых технологий, инновационные механизмы развития лазерных технологий и частное государственное партнерство в области высоких технологий

Основные даты

Окончание приема тезисов 1 мая 2009 г.
Окончание предварительной регистрации 1 сентября 2009 г.
Окончание приема текстов докладов 25 сентября 2009 г.

**Более подробную информацию Вы можете получить,
связавшись с международным
организационным комитетом:
195251, Россия, Санкт-Петербург,
Политехническая ул., д. 29,
Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет
Тел.: 8(812) 552-98-43; факс: 8(812) 535-46-98
E-mail: ilist@lrc.ru; web-site: www.lrc.ru, www.lot-spb.ru**





УДК 621.791.14.03

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА ФОРМИРОВАНИЕ ШВОВ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ТОЛЩИНОЙ 1,8...2,5 мм

А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, канд. техн. наук, чл.-кор. НАН Украины А. Я. ИЩЕНКО, С. В. ПОДЬЕЛЬНИКОВ, инж.
 (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Экспериментально определены геометрические размеры рабочих поверхностей инструментов и требования к подготовке кромок стыковых соединений алюминиевых сплавов, необходимая точность их сборки и фиксации. Установлены диапазоны изменения параметров процесса, обеспечивающие получение бездефектных сварных соединений.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, алюминиевые сплавы, параметры процесса, формирование швов, бездефектность

В последнее десятилетие происходит стремительное развитие процесса сварки трением с перемешиванием (СТП) и расширяются сферы его применения в судостроении, автомобильной промышленности, вагоностроении, при изготовлении авиационной и космической техники [1–3].

Принцип получения швов при СТП основан на нагреве металла в зоне соединения до пластического состояния в результате сил трения, перемещения и пластического деформирования его в закрытом объеме, ограниченном рабочими поверхностями инструмента и подкладкой (рис. 1). При этом металл не нагревается до температуры плавления, благодаря чему в швах и зонах термического влияния степень структурно-фазовых превращений намного меньше, чем при сварке плавлением. Улучшенные физико-механические свойства таких соединений обеспечивают более высокие эксплуатационные характеристики конструкций, изготовленных с применением СТП [4–7]. Однако, как и при любом способе сварки, получить бездефектные соединения при СТП удастся только при определенных параметрах процесса.

Цель данной работы — исследовать влияние основных параметров процесса СТП и технологических факторов на формирование качественных соединений алюминиевых сплавов толщиной 1,8...2,5 мм.

Для проведения исследований использованы листы из серийных алюминиевых сплавов различных систем легирования (АМц, АД31, АМг2, АМг6, В95, 1420 и 1460). Перед сваркой их очищали от смазочных материалов, а затем прово-

дили химическое травление по общепринятой технологии. Предварительная механическая зачистка поверхностей не производилась, так как оксидная пленка в процессе сварки разрушается, дисперсно измельчается и равномерно распределяется по всему объему шва вращающимся инструментом.

Результаты экспериментальных исследований показали, что качество формирования швов при СТП алюминиевых сплавов толщиной 1,8...2,5 мм главным образом зависит от таких параметров процесса, как размер и конфигурация рабочих поверхностей бурта и наконечника инструмента, усилия прижатия инструмента к поверхностям листов и глубины его погружения в свариваемый металл, частоты вращения инструмента и скорости сварки.

Инструмент должен обеспечивать нагрев металла в зоне сварки до пластического состояния, перемешивание его по всей толщине свариваемых кромок и перемещение в замкнутом объеме при избыточном давлении. Основное количество теплоты Q выделяется в контактной области в результате трения бурта и определяется по формуле [5]

$$Q = 2/3 \pi \mu P N (r_0^3 - r_n^3),$$

где μ — коэффициент трения; P — давление, оказываемое инструментом на свариваемые листы, Па; N — частота вращения инструмента, об/с; r_0 ,

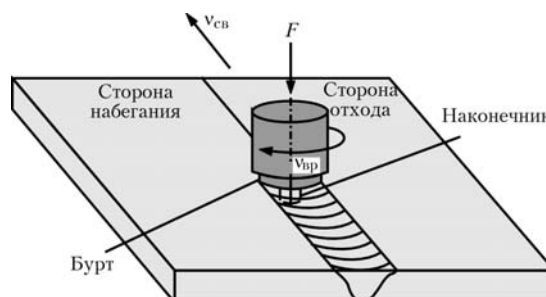


Рис. 1. Принципиальная схема процесса СТП

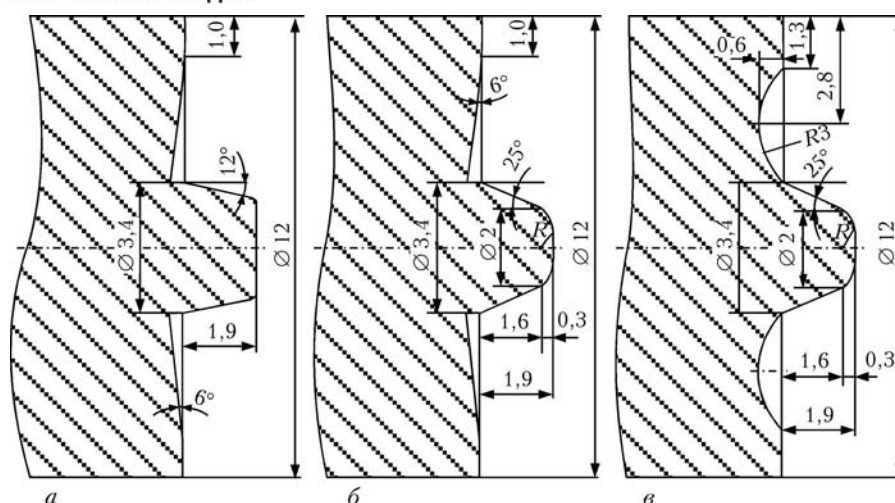


Рис. 2. Эскизы рабочих частей инструментов с конической (а, б) и полусферической (в) канавками на рабочей поверхности бурта и различной формой наконечников для СТП алюминиевых сплавов толщиной 2 мм

r_n — наружный радиус соответственно бурта и наконечника, мм.

При использовании для СТП инструмента с малым диаметром бурта объема пластифицированного металла может оказаться недостаточно для полного заполнения освобождающегося позади инструмента пространства, что приведет к образованию в швах дефектов в виде несплавления. Чрезмерно большой диаметр бурта способствует формированию широкой лицевой поверхности шва, значительному короблению сварных соединений и образованию дефектов вследствие перегрева металла в зоне сварки. Установлено, что для СТП алюминиевых сплавов толщиной 1,8...2,5 мм оптимальный наружный диаметр бурта инструмента должен находиться в пределах 10...12 мм. Кроме того, для обеспечения стабильности формирования швов на торцевой поверхности бурта необходимо делать небольшое кольцевое углубление, обеспечивающее плавное и непрерывное перемещение пластифицированного металла и формирование качественной лицевой поверхности швов. Однако размер его должен быть таким, чтобы при небольшом заглублении бурта инструмента перемещающийся металл постоянно находился под избыточным давлением.

Перемешивание металла по всей толщине свариваемых кромок в процессе сварки происходит за счет перемещения его вращающимся наконечником инструмента. Проведенные исследования позволили определить, что при сварке алюминиевых сплавов толщиной 1,8...2,5 мм получить качественные сварные соединения можно при использовании наконечника инструмента в виде простого усеченного конуса. Для обеспечения работоспособности наконечника в условиях воздействия на него больших изгибающих усилий, крутящего момента и сил трения диаметр его возле торца бурта должен составлять 3,2...3,6 мм, а при вершине — 2,4...2,6 мм. Во избежание нес-

плавления в корневой части шва длина наконечника должна составлять (0,90...0,95)δ. Плавное и равномерное перемещение пластифицированного металла в процессе сварки обеспечивается благодаря высокой чистоте обработки рабочих поверхностей инструмента. Любые заусенцы, выступы, вмятины или надрывы на этих поверхностях бурта и наконечника инструмента вызывают периодическое изменение траектории, скорости и количества перемещаемого металла, нарушая стабильность формирования и качество швов.

Эскизы некоторых разработанных образцов инструментов приведены на рис. 2. Рабочий инструмент рекомендуется изготавливать из инструментальных или нержавеющей мартенситных сталей [8]. Поэтому для сварки использован инструмент, изготовленный из инструментальной стали Р6М5 с высокими прочностными характеристиками при повышенных (около 600 °С) температурах.

Слабое прижатие инструмента к поверхностям деталей в процессе сварки или недостаточное заглубление бурта инструмента в свариваемый металл приводит к увеличению объема, который должен заполняться пластифицированным металлом при формировании шва, а следовательно, к снижению избыточного давления и образованию несплошностей в швах. В процессе экспериментальных исследований установлено, что формирование качественных швов обеспечивается при усилиях прижатия инструмента 5...10 кН и зависит от марки свариваемого сплава. При этом бурт инструмента должен погружаться в свариваемый металл на глубину 0,1...0,2 мм. Чрезмерное его заглубление приводит к перегреву металла и образованию на лицевой поверхности шва дефектов в виде надрывов (рис. 3, а). При небольшом погружении бурта инструмента в свариваемый металл в зоне сварки выделяется недостаточное количество тепла для обеспечения требуемого



Рис. 3. Внешний вид (X2) лицевой поверхности швов, полученных СТП алюминиевого сплава 1420 толщиной 2 мм при чрезмерном (а) и недостаточном (б) погружении бурта в свариваемый металл

уровня пластификации, необходимого для качественного формирования шва объема металла. Поэтому в таких случаях на лицевой поверхности шва образуются дефекты в виде несплавления (рис. 3, б). Кроме того, сварку необходимо выполнять «углом вперед» при наклоне инструмента на $2...3^\circ$. При этом вращающийся бурт своей задней кромкой оказывает дополнительное давление на свариваемый металл, уплотняя металл шва.

Существенное влияние на формирование швов оказывают частота вращения инструмента и скорость сварки. Тепловыделение в зоне сварки повышается с увеличением количества оборотов инструмента или уменьшением скорости перемещения его вдоль стыка. При определенном для данного сплава соотношении частоты вращения инструмента и скорости сварки выделяемой за счет трения теплоты может оказаться недостаточно для пластификации требуемого объема металла, чтобы заполнить всю полость, образуемую наконечником инструмента. В результате нарушается непрерывность потока, перемещающегося по сложной траектории металла, и в шве образуются внутренние не заполненные металлом полости (рис. 4, а). При сохранении той же скорости вращения инструмента и уменьшении скорости его перемещения пластифицированного металла становится больше, благодаря чему качество сварного шва улучшается (рис. 4, б). Однако при чрезмерном уменьшении скорости сварки происходит избыточное выделение тепла, приводящее к перегреву металла, оплавлению легкоплавких эвтектик на межзеренных границах и образованию внутренних дефектов в виде полостей и несплошностей (рис. 4, в).

Результаты экспериментов показали, что пластичные низколегированные сплавы (АМц, АМг2, АД31 и др.) успешно свариваются трением с перемешиванием в широком диапазоне изменения скорости сварки ($6...40$ м/ч) при частоте вращения инструмента 1420 или 2880 об/мин. Высокопроч-

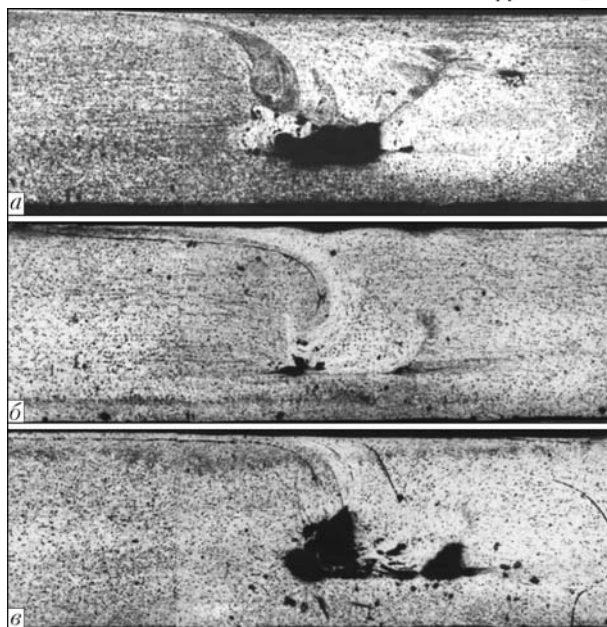


Рис. 4. Поперечные макрошлифы (X20) сварных соединений сплава АМг6 толщиной 2 мм, полученных СТП при постоянной частоте вращения инструмента 2880 об/мин и различной скорости сварки: а — $v_{св} = 38$; б — 20; в — 8 м/ч

ные сложнoleгированные сплавы (АМг6, 1460, В95 и др.) необходимо сваривать при более низкой (1420 об/мин) частоте вращения инструмента и при меньших ($6...14$ м/ч) скоростях сварки.

Для получения качественных соединений большое значение имеют точность сборки стыка под сварку и плотное прилегание кромок в зоне сварки к подкладке. Исследования поперечных макрошлифов швов, полученных СТП сплава АМг2 толщиной 2 мм, показали, что для бездефектных швов зазор между свариваемыми кромками должен составлять не более 15 % толщины свариваемого металла (рис. 5). Существенное влияние на качество формирования швов оказывает деформация свариваемых кромок, возникающая вследствие неточности их подгонки и сборки, ненадежности фиксации заготовок к подкладке или изменения теплофизических условий в процессе сварки. При завывании кромок со стороны отхода инструмента (где векторы направления и перемещения инструмента противоположны по направлению) часть пластифицированного металла выдавливается в процессе сварки на лицевой поверхности шва в виде грат (рис. 6). Поэтому для обеспечения качественного формирования швов деформация кромок не должна превышать 5 % толщины свариваемого металла.

Поскольку для СТП алюминиевых сплавов толщиной $1,8...2,5$ мм используются инструменты с очень тонкими наконечниками, то даже незначительное их отклонение от оси стыка может привести к нарушению качества швов. Исследования макрошлифов швов сплава АМг6 толщиной 1,8 мм показали, что допустимое отклонение инструмента от

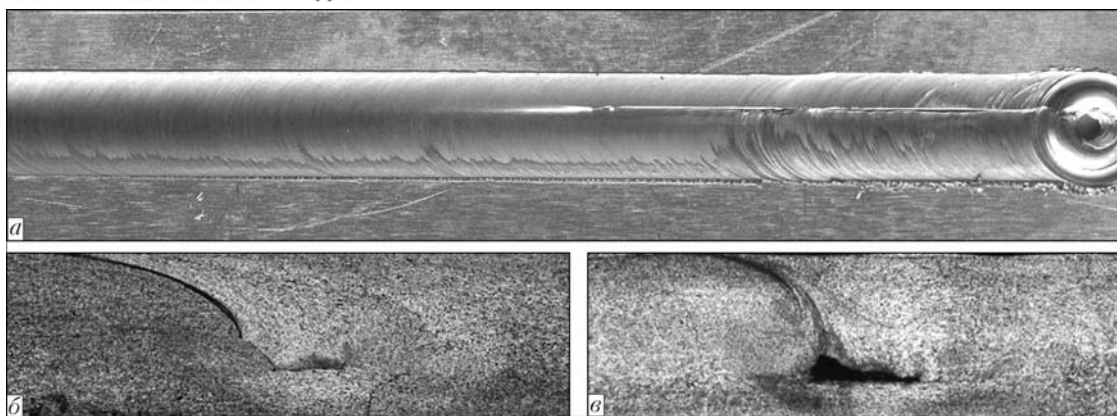


Рис. 5. Внешний вид лицевой поверхности шва (а, $\times 1,4$), полученного СТП при сборке стыка с переменным зазором (0,2...1,2 мм) между кромками, и поперечные макрошлифы сварных соединений сплава АМг2 толщиной 2 мм при зазоре 0,3 (б) и 0,5 мм (в)



Рис. 6. Внешний вид ($\times 2$) лицевой поверхности шва, полученного СТП сплава 1420 толщиной 2 мм при чрезмерном завышении кромки со стороны отхода инструмента

оси шва не должно превышать 0,5 мм. При большем их смещении возможно образование дефектов в виде несплавления, поскольку формирование шва по всей глубине свариваемых кромок происходит не по центру стыка.

Выводы

1. В результате проведенных исследований определены оптимальные размеры и формы рабочих поверхностей буртов, наконечников инструментов, диапазоны изменения основных параметров процесса и требования к сборке и фиксации кромок для получения качественных соединений типичных алюминиевых сплавов толщиной 1,8...2,5 мм.

2. Сварку следует выполнять при наклоне инструмента 2...3° «углом вперед», при постоянном прижатии и погружении бурта инструмента в свариваемый металл на 0,1...0,2 мм. Отклонение осей инструмента и стыка допускается не более 0,5 мм, зазор между свариваемыми кромками — не более

15 %, а депланация кромок — не более 5 % толщины свариваемого металла.

3. Бездефектные швы при СТП пластичных низколегированных сплавов могут быть получены СТП в широком диапазоне изменения частоты вращения 1420...2880 об/мин и скорости перемещения 6...40 м/ч инструмента. Для высокопрочных сложнолегированных сплавов рекомендуются пониженная частота (1420 об/мин) вращения инструмента и скорость сварки (6...14 м/ч).

1. *Pat. 5460317 US. Friction stir butt welding / W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham et al.* — Опыл. 1995.
2. *Arbegast W. J. Friction stir welding. After a decade of development // Welding J.* — 2006. — **85**, № 3. — P. 28–35.
3. *Enomoto M. Friction stir welding: research and industrial application // Welding Intern.* — 2003. — **17**, № 5. — P. 341–345.
4. *Defalco J. Friction stir welding vs. fusion welding // Welding J.* — 2006. — **85**, № 3. — P. 42–44.
5. *Hassan Kh. A. A., Prangnell P. B., Norman A. F. et al. Effect of welding parameters on nugget zone microstructure and properties in high strength aluminium alloy friction stir welds // Sci. and Technol. of Welding and Joining.* — 2003. — **8**, № 4. — P. 257–268.
6. *Третьяк Н. Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (Обзор) // Автомат. сварка.* — 2002. — № 7. — С. 12–21.
7. *Покляцкий А. Г., Иценко А. Я., Яворская М. Р. Прочность соединений тонколистовых алюминиевых сплавов, полученных сваркой трением с перемешиванием // Там же.* — 2007. — № 9. — С. 50–53.
8. *Tokisue H., Shinoda T. Applications of friction stir welding into light metals // J. Jap. Institute of Light Metals.* — 1999. — **49**, № 6. — P. 258–262.

Geometric dimensions of working surfaces of the tools, requirements to edge preparation of the butt joints on aluminium alloys, and desired accuracy of their assembly and fixation have been experimentally determined. The ranges of variations of process parameters, providing defect-free welded joints, have been established.

Поступила в редакцию 02.06.2008



УДК 621.791.052:536.453:620.169.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРОЩЕННОЙ ДИАГРАММЫ СТАТИЧЕСКОЙ КОРРОЗИОННОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ПОЧВЕННОЙ КОРРОЗИИ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **В. М. ШЕКЕРА**, канд. техн. наук, **Е. М. ОНОПРИЕНКО**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описана методика определения параметров упрощенной диаграммы статической коррозионной трещиностойкости для трубных сталей в среде почвенных водных растворов. Показана возможность построения упрощенных диаграмм на малых образцах типа Шарпи с предварительно созданной усталостной трещиной. Использование акустической эмиссии для фиксирования скачков роста трещины позволяет сократить время испытания до 5...7 сут.

Ключевые слова: диаграмма статической коррозионной трещиностойкости, магистральные трубопроводы, акустическая эмиссия, коэффициент интенсивности напряжений, скорость роста трещины

Для современных магистральных трубопроводов (МТ) большое значение имеет обеспечение ресурса безопасной эксплуатации путем адекватного реагирования на результаты регулярных технических диагностик состояния трубопровода и в первую очередь на выявляемые при этом различные дефекты несплошности материала, среди которых наиболее опасными являются коррозионные трещины. Такое адекватное реагирование в соответствии с идеологией «прогнозирование и предупреждение» («the fitness for service» [1]) предусматривает прогнозирование поведения обнаруженного дефекта на определенный срок эксплуатации и выработку рекомендаций для предупреждения неблагоприятных проявлений (отказов) вплоть до ремонта.

Прогнозирование поведения обнаруженной коррозионной трещины соответствующей формы и размера в известном поле статических механических напряжений, а также при известных тем-

пературном условии и коррозионной среде реализуется на основе диаграммы статической коррозионной трещиностойкости (ДСКТ) данного материала (рис. 1).

Такая диаграмма для трубных сталей связывает скорость роста трещины v в определенной точке ее контура θ (рис. 2) с коэффициентом интенсивности напряжений $K_I(\theta)$ в этой точке. ДСКТ имеет три характерные зоны: *I* — $0 < K_I < K_{ISCC}$, где преобладает механизм электрохимической коррозии и скорости $v(K_I)$, которые близки к таковым для равномерной коррозии; *II* — $K_{ISCC} < K_I < K_{IC}$, где преобладает механизм водородного охрупчивания [1, 2], а скорость роста трещин $v(K_I)$ значительно более высокая, чем в зоне *I*; *III* — $K_I > K_{IC}$, где спонтанный рост трещин соответствует хрупкому разрушению.

Для построения ДСКТ в общем случае требуются большие затраты времени, среди которых основную долю составляют затраты на получение зависимости $v - K_I$ в зоне *I*. Для практических прогнозных расчетов, связанных с оценкой риска

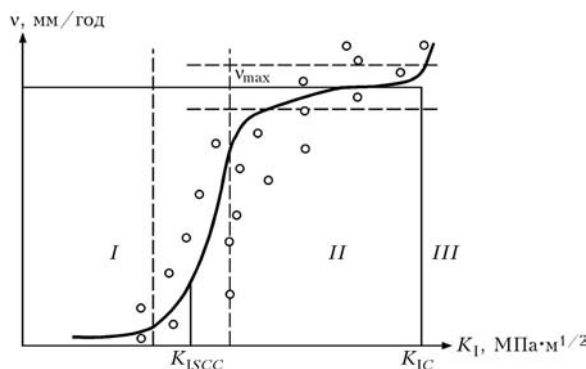


Рис. 1. Диаграмма статической коррозионной трещиностойкости: *I–III* и остальные обозначения см. в тексте

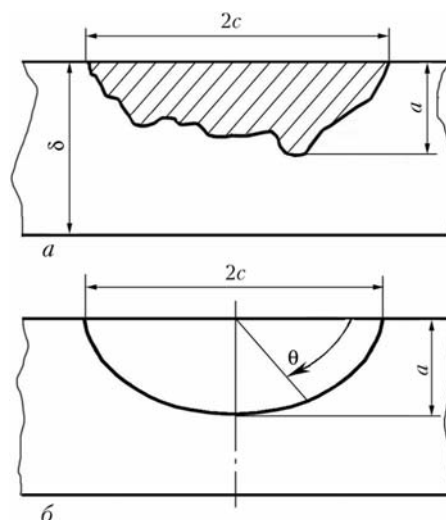


Рис. 2. Схема поверхностной трещины в стенке трубы (а) и ее описание полуэллиптической трещиной размером $a \times 2c$ (б)

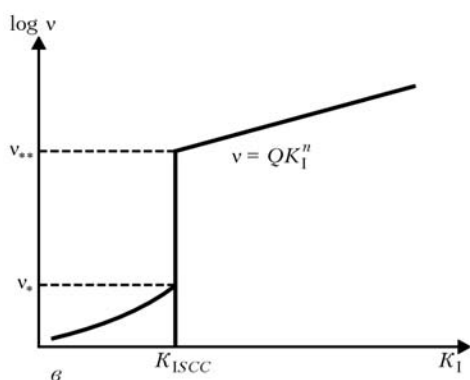
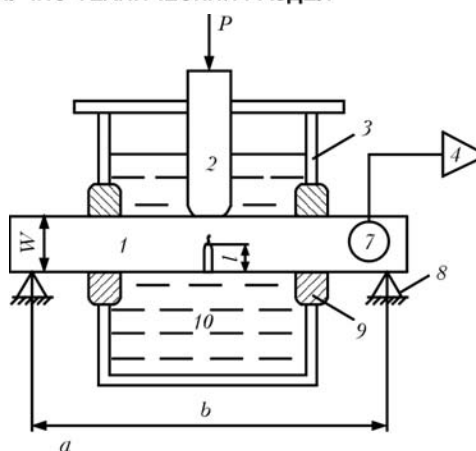


Рис. 3. Схема (а) и внешний вид установки (б) для получения упрощенной ДСКТ (б): 1 — образец; 2 — индентор; 3 — камера; 4 — усилитель; 5 — источник акустической эмиссии; 6 — регистратор; 7 — пьезоэлектрический датчик; 8 — опора; 9 — уплотнение; 10 — коррозионная среда

отказа от конкретной коррозионной трещины в стенке МТ, достаточно знания значений K_{ISCC} и зависимости $v - K_I$ в зоне II при $K_I \ll K_{IC}$, т. е. можно использовать упрощенную диаграмму ДСКТ, определяемую зависимостями:

$$\begin{aligned} v &= 0 \quad \text{при } K_I < K_{ISCC}; \\ v &= QK_I^n \quad \text{при } K_{ISCC} < K_I \ll K_{IC}, \end{aligned} \quad (1)$$

где K_{ISCC} , Q и n — параметры, определяемые экспериментально.

Важным параметром при оперативных условиях получения упрощенной ДСКТ является размер образцов (учитывая ограниченную (10...20 мм) толщину МТ), что существенно усложняет измерение кинетики роста коррозионной трещины при испытании.

С учетом отмеченного выше при получении экспериментальных данных для упрощенной ДСКТ применительно к МТ авторы использовали метод, описанный в работе [2], согласно которому геометрические измерения роста трещины в процессе опыта в значительной степени заменены прослушиванием ее роста с помощью акустической эмиссии. Схема такого опыта приведена на рис. 3, а, на рис. 3, б представлен внешний вид созданной в ИЭС им. Е. О. Патона экспериментальной установки для работы на образцах типа образцов Шарпи с предварительно выращенной усталостной трещиной при температуре агрессивной среды (почвенная коррозия) 10...60 °С.

Значения усилия P на инденторе задаются винтовым домкратом через тензометрическую скобу и контролируются в процессе испытания по заданной программе $P-t$.

Значение коэффициента интенсивности напряжения K_I связано с такими параметрами, как расстояние b между опорами, длина l трещины, высота W и толщина B образца (рис. 3), а также усилие P следующей зависимостью [3]:

$$\begin{aligned} K_I(l) = \frac{6P\sqrt{l}}{BW} \left\{ 1,93 - 3,07\left(\frac{l}{W}\right) + \right. \\ \left. + 14,53\left(\frac{l}{W}\right)^2 - 25,11\left(\frac{l}{W}\right)^3 + 25,8\left(\frac{l}{W}\right)^4 \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

При этом используется известное положение, что при $K_I > K_{ISCC}$ происходит скачкообразный рост трещины l , а значения скачков Δl пропорциональны K_I^2 , т. е.

$$\Delta l = \alpha K_I^2, \quad (3)$$

где α — коэффициент пропорциональности, который не зависит от силовых условий, а зависит только от свойств материала и коррозионной среды.

Поскольку скачок трещины сопровождается звучанием, то в схеме на рис. 3, а вместо измерения во времени очень малых приращений Δl (малое сечение образца) измеряют промежутки времени Δt между соседними прыжками роста



трещины. Геометрическим измерениям подлежит только начальный размер трещины l_1 и ее размер l_N в конце испытания после $n = 1, 2, \dots, N$ прыжков, фиксируемых соответствующей аппаратурой (см. рис. 3).

Для получения необходимого решения используются уравнения (2) и (3) в сочетании с зависимостями:

$$l_n = l_{n-1} + \alpha K_1^2(l_n), \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{l_N - l_1}{N \sum_{n=1}^N K_1^2(l_n)}, \quad (5)$$

$$v_n = \Delta l_n / \Delta t_n \quad (n = 1, 2, \dots, N). \quad (6)$$

Испытания начинаются при больших значениях K_1 из области $K_{ISCC} < K_1 < K_{IC}$, где K_{ISCC} и K_{IC} назначаются исходя из опыта. По мере накопления сигналов, соответствующих росту трещины, значения P и соответственно K_1 уменьшаются до минимальных, при которых практически отсутствуют сигналы за 20...40 ч. Соответствующее значение K_1 принимается за K_{ISCC} . Поскольку длительность испытаний составляет от 1 до 4 недель, то при средних скоростях роста, не превышающих 10...20 мм/год, изменение $l_N - l_1$ составляет менее 1 мм и требует тщательного измерения. Для этих целей используют электронный микроскоп «Cam-Scan» с 80-кратным увеличением.

На рис. 4 показана микроструктура образца с коррозионной трещиной из стали 17Г1С (l_1 — в начале и l_N — в конце), полученная при испытании его на прочность в 3%-м растворе NaCl. Точность измерения $l_N - l_1$ не хуже 0,005 мм.

На рис. 5 приведены экспериментальные данные, полученные при испытании этого же образца в 3%-м растворе NaCl в течение трех недель (рис. 6) при температуре около 15...25 °C (в отсутствии регулятора температуры). Химический состав стали 17Г1С следующий, мас. %: 97,11 Fe; 0,40 Ni; 0,06 Cr; 0,038 Co; 1,6 Mn; 0,04 Cu; 0,02 Ti; 0,57 Si; 0,15 Al; 0,18 C.

На рис. 6 видно, что имеет место достаточно высокий разброс значений реальной скорости роста трещин, рассчитанных по сигналам акустической эмиссии (при средней скорости $v_{cp} = 3,2$ мм/год), что в значительной степени обусловлено колебаниями температуры, неучитываемыми в ночное и дневное время. Кроме того, следует принять во внимание, что Δl , определяемая зависимостью (3), не одинакова по толщине образца B , т. е. регистрируемые пики акустической эмиссии соответствуют локальным приращениям трещины по ее длине. Этот процесс достаточно хаотичен, однако отражает скорость роста трещин в зависимости от значений K_1 и среднего значения

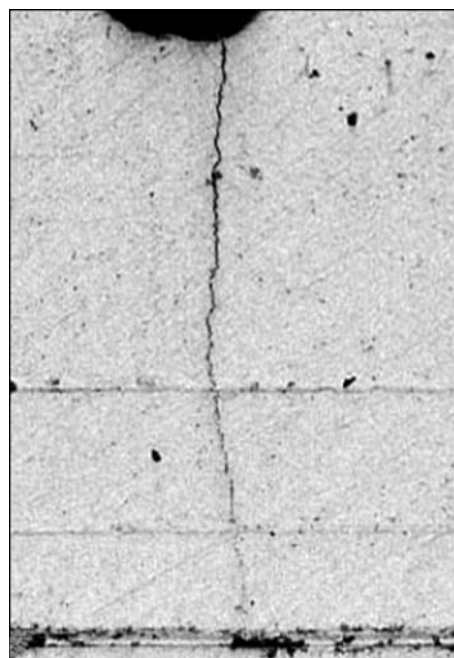


Рис. 4. Микроструктура образца из стали 17Г1С с коррозионной трещиной

скорости роста трещин v_{cp} по разности $l_N - l_1$ и общего времени испытания. Как видно из рис. 5, пороговое значение K_{ISCC} находится в пределах 11...13 МПа·м^{1/2}. Данные, представленные на рис. 5, 6, с определенной условностью можно использовать при оценке коррозионной статической трещиностойкости трубной стали 17Г1С в морской воде. Для определения почвенной коррозии, очевидно, требуется проведение испытаний в соответствующей коррозионной среде.

С учетом многообразия почвенных составов намечена целая программа исследований такого типа. На рис. 7 приведена ДСКТ, полученная для случая, когда для образцов из стали 17Г1С в качестве агрессивной среды использовали водную вытяжку почвы, взятую в районе г. Бородинка (почва № 1).

Для приготовления водной вытяжки почву предварительно высушили и просеяли, затем за-

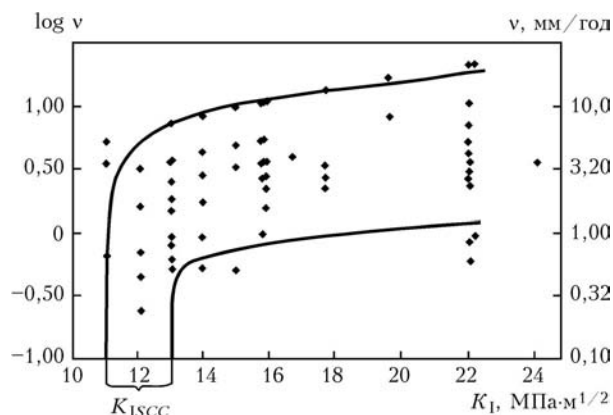


Рис. 5. ДСКТ, полученные по результатам трехнедельных испытаний образца из стали 17Г1С в 3%-м растворе NaCl при 15 < T < 25 °C

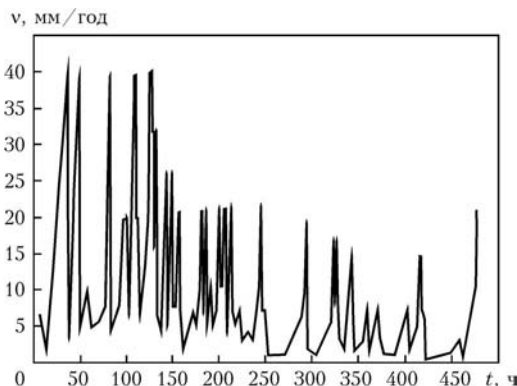


Рис. 6. Кинетика изменения скорости роста коррозионной трещины во время испытаний образца в соответствии с рис. 5

лили водопроводной водой для экстракции в течение 24 ч с достаточно интенсивным перемешиванием. Отстоянный несколько часов раствор вытяжки отфильтровали. В готовом состоянии он имел плотность 0,997 г/см³ и pH 8,2. Химический состав вытяжки, исследованный путем выпаривания определенного объема до получения сухого осадка на микроскопе «Philips Analytical X-ray Spectrometer», имел следующий химический состав, мас. %: 4,6 Na₂O; 6,8 SiO₂; 15,9 SO₃; 6,9 NaCl; 55,1 CaO; 0,02 TiO₂; 0,07 CuO; 6,9 MgO; 0,36 Al₂O₃; 0,46 P₂O₅; 0,23 Fe₂O₃; 0,027 NiO; 0,06 ZnO; 0,13 SrO; 2,3 K₂O.

Из приведенных данных видно, что химический состав водной вытяжки почвы № 1 заметно отличается от состава 3%-го раствора NaCl, в котором pH 7,0, а скорость роста коррозионной трещины примерно в 1,5 раза выше. Иными словами, по аналогии с равномерной коррозией [4] можно ожидать, что состав почвы оказывает определенное влияние на скорость роста трещин наряду с такими факторами, как температура и уровень напряжений в металле образца, поэтому оперативное определение ДСКТ для конкретных сочетаний труба–почва имеет большое значение для оценки риска, связанного с повреждением антикоррозионной изоляции МТ. Покажем это на простом примере.

Большинство МТ изготовлены из сварных продольношовных труб. Повреждение изоляции в зоне продольного шва связано со значительным риском развития локальной поверхностной коррозии. Это достаточно медленный процесс, контролируемый электрохимическим механизмом коррозии трубной стали, скорость развития которого зависит от степени геометрической и физической неоднородности в околошовной зоне сварного шва (последнее в определенной степени зависит от завода изготовителя — поставщика труб).

Если вовремя не остановить процесс коррозии (путем исправления поврежденной изоляции), то в околошовной зоне продольного шва развивается канавочный дефект [1] несплошности материала,

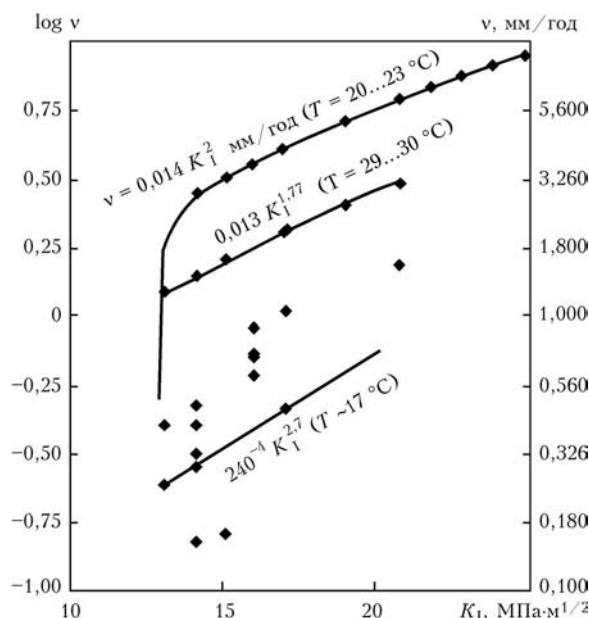


Рис. 7. ДСКТ образца из стали 17Г1С, испытанного в условиях почвенной коррозии

на дне которого при рабочих окружных напряжениях (с учетом концентрации напряжений) с большой вероятностью зарождается стресс-коррозионная трещина. Такая трещина развивается в основном по механизму электрохимической коррозии до тех пор, пока ее размеры с учетом окружных напряжений $\sigma_{\beta\beta}$ создают условия к преобладанию механизма водородного охрупчивания. Это будет иметь место, когда значения K_I на контуре трещины превысят пороговые, т. е. $K_I > K_{I,SCC}$. Можно показать, что при $K_{I,SCC} \approx 10...13 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ и окружных напряжениях в стенке трубы $\sigma_{\beta\beta} = 260...350 \text{ МПа}$ размер трещины $a \times 2c$ (см. рис. 2) вдоль сварного шва будет достаточно малым.

Для расчета значений K_I можно воспользоваться рекомендациями работы [5], приведенными в [6]. В этих рекомендациях при $a/c < 0,2$ (трещина вытянута вдоль сварного шва) значения K_I при $\theta = \pi/2$ (см. рис. 2) определяются простой зависимостью

$$K_I \left(\theta = \frac{\pi}{2} \right) = \sigma_{\beta\beta} \sqrt{\pi \frac{a}{1000}} M_K f(\alpha/\delta) [\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}], \quad (7)$$

где $f(\alpha/\delta) \approx \frac{1,12 + 5(\alpha/\delta)^4}{1 - \alpha/\delta}$ при $\alpha/\delta \leq 0,55$;

$$f(\alpha/\delta) \approx \frac{0,303(1 + 3,03 \frac{a}{\delta})^4}{\sqrt{a/\delta} (1 - a/\delta)^3} \text{ при } \alpha/\delta > 0,55;$$

M_K учитывает концентрацию напряжений в околошовной зоне шва и, согласно [5],

при $L < 2\delta$ и $\alpha/\delta < 0,05$ (L/δ)^{0,55}

$$M_K = 0,51(L/\delta)^{0,27} (\alpha/\delta)^{-0,31} \geq 1,0; \quad (8)$$



Результаты расчета K_I (МПа·м^{1/2}) по (7) и M_K по (8) при $\delta = 20$ мм, $L/\delta = 1,5$ и разной глубине трещины

Результаты расчета	$\sigma_{\beta\beta}$, МПа	a , мм						
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1,0	2,0
K_I в зоне продольного шва	260	15,2	15,8	16,7	17,6	18,4	21,0	22,6
	360	21,1	22,1	23,2	24,4	25,4	29,0	31,4
K_I в гладкой части трубы	260	5,2	6,4	7,9	9,2	10,3	14,6	20,5
	360	12,2	11,6	11,0	12,8	14,2	20,1	28,5
M_K	—	2,94	2,37	2,10	1,91	1,78	1,44	1,1

при $\alpha/\delta > 0,05(L/\delta)^{0,55}$

$$M_K = 0,83(\alpha/\delta)^{-0,15(L/\delta)^{-0,45}} \quad (9)$$

Приведенные в таблице результаты расчета $K_I(\pi/2)$ по (7) и (8) для стенки трубы толщиной $\delta = 20$ мм при $L = 30$ мм и $\sigma_{\beta\beta} = 260$ и 360 МПа в зависимости от глубины a (при $a/c < 0,2$) трещины, образовавшейся в зоне продольного шва и в гладкой части трубы, показывают, что в зоне продольного шва при $K_{ISCC} = 10...13$ МПа·м^{1/2} создаются условия для роста трещины по механизму водородного охрупчивания уже при $a = 0,1$ мм и $\sigma_{\beta\beta} = 260$ МПа, а в гладкой части трубы эти условия создаются при $a > 0,5$ мм.

С помощью ДСКТ на рис. 7 в случае ее соответствия почвенным условиям можно определить кинетику дальнейшего роста трещины во времени до риска появления сквозного дефекта либо перехода в стадию спонтанного роста (см. рис. 1, зона III).

В таблице приведены значения M_K (8), показывающие степень влияния геометрической неоднородности в районе сварного шва на K_I . Из таблицы видно, что это влияние резко снижается по мере увеличения глубины трещины и уже при $a > 2$ мм ($\delta = 20$ мм) значения M_K близко к 1. Из этого следует, что при заданных значениях K_{ISCC} снижение мембранных напряжений смещает наступление условий роста трещины по механизму водородного охрупчивания в зону расположения более глубоких трещин, где влияние геометрической неоднородности в районе сварного шва резко уменьшается.

Исходя из этих позиций кольцевые сварные швы в основном находятся в более благоприятных

условиях, чем продольные, антикоррозионная защита которых требует большого внимания.

Выводы

1. Для прогнозирования развития коррозионных трещин в МТ Украины необходимо иметь ДСКТ трубных сталей в соответствующих почвенных условиях.

2. С учетом многообразия возможных сочетаний указанных факторов, а также того, что для рассматриваемой проблемы наиболее важно знание развития коррозионной трещины при значениях K_I выше K_{ISCC} , в работе предлагается использовать подход, основанный на прослушивании роста коррозионной трещины методом акустической эмиссии [2].

3. На малых образцах можно достаточно оперативно получать необходимые ДСКТ для конкретных условий.

1. *Fitness-for-service: Recommended practice 579*. — Washington: American Petroleum Institute, 2000. — 625 p.
2. *Механіка руйнування та міцність матеріалів* / За ред. проф. З. Т. Назарчука: Довідник, посібник: В 6 т. — Т.5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика. — Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. — 1132 с.
3. *Механика разрушения и прочность материалов* / Под общ. ред. В. В. Панасюка: Справоч. пособие: В 2 т. — Т. 2: Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами / М. П. Саврух. — Киев: Наук. думка, 1988. — 619 с.
4. *Марченко А. Ф.* Почвенная коррозия трубопроводной стали и магистральных трубопроводов // Стр-во трубопроводов. — 1995. — № 1. — С. 29–34.
5. *Recommendations for fatigue design of welded joints and components*. — S.l., [1996]. — 117 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1539–96 / XV-845–96).
6. *Махненко В. И.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных сварных конструкций. — Киев: Наук. думка, 2006. — 618 с.

The paper describes the procedure of determination of parameters of a simplified diagram of static corrosion crack resistance for pipe steels in the soil water solution environment. Shown is the possibility of plotting simplified diagrams using small-sized Charpy-type samples with pre-induced fatigue crack. Use of acoustic emission for recording the crack growth jumps allows shortening the testing time to 5...7 days.

Поступила в редакцию 29.01.2008



СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

Чл.-кор. НАН Украины **О. К. НАЗАРЕНКО** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены основные результаты работ Института электросварки им. Е. О. Патона по созданию оборудования для электронно-лучевой сварки за последние 15 лет. Приведены технические характеристики созданной гаммы энергетических блоков (пушка–источник питания–система управления), а также некоторых установок для электронно-лучевой сварки.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, электронная пушка, источник ускоряющего напряжения, установка, компьютерное управление

С начала 1990-х годов на постсоветском пространстве прекратился серийный выпуск оборудования для электронно-лучевой сварки заводом «Электромеханика» (г. Ржев), заводом научно-исследовательского института «Исток» (г. Калининград), Сумским заводом электронных микроскопов и электроавтоматики. Распались многие творческие коллективы, основные усилия которых были направлены на создание и совершенствование оборудования, разработку и промышленное освоение технологии электронно-лучевой сварки. Лишь ИЭС им. Е. О. Патона и НИКИМТ, головной организации РФ по сварке в атомной энергетике и промышленности [1], удалось не только сохранить, но и развить научно-производственные возможности, а также привлечь заказы от российских предприятий и из дальнего зарубежья.

ИЭС им. Е. О. Патона в последние 15 лет наряду с различными технологическими исследованиями разработал и изготовил промышленное оборудование нового поколения. Речь идет о новых энергетических блоках в составе сварочная пушка–источник питания высоковольтных и низковольтных цепей–система управления параметрами пучка электронов и установках для электронно-лучевой сварки.

Совершенствование сварочных электронных пушек и источников питания. Сварочные пушки ИЭС им. Е. О. Патона предназначены для работы с двумя уровнями ускоряющих напряжений — 60 и 120 кВ. Особенностью их конструкции является возможность использования пушки как снаружи, так и внутри вакуумной камеры (рис. 1).

Эмиссионная система пушки отсекается от пролетного канала затвором и откачивается автономным турбомолекулярным насосом, выхлоп которого осуществляется в объем вакуумной ка-

меры через систему затворов. Благодаря этому вакуум в области эмиссионной системы практически не ухудшается в процессе сварки, что способствует предотвращению разрядов в пушке. Внутри камеры пушка перемещается по трем линейным и двум угловым координатам, что обуславливает необходимость достаточно протяженных (до 40 м) кабельных и водяных коммуникаций, уложенных в гибкие каналы — кабелеукладчики.

Электрический пробой вакуумной изоляции в пушке приводит к драматическим последствиям в случае высокой стоимости свариваемого изделия и невозможности ремонта сварного шва после нарушения его формирования. Рациональное построение электронно-оптической системы и конструкции сварочной электронной пушки повысило электрическую прочность вакуумной изоляции ускоряющего промежутка. Применение массивных дисковых катодов, нагреваемых электронной бомбардировкой, позволило избежать присущих прямонакальным катодам нарушений геометрии эмитирующей поверхности, связанных с ними пробоев и блуждания пятна по поверхности из-

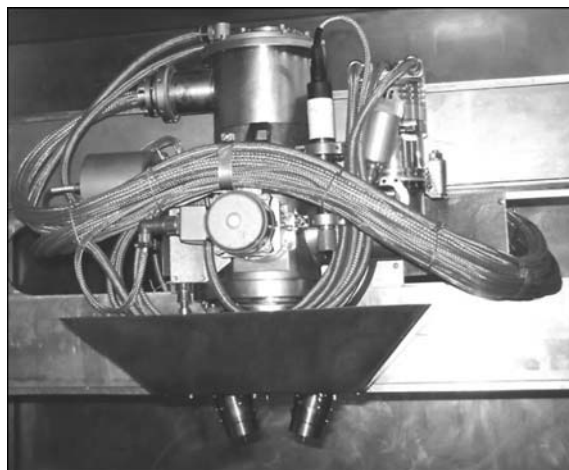


Рис. 1. Общий вид внутрикамерной сварочной электронной пушки с ускоряющим напряжением 60 кВ и мощностью пучка 60 кВт

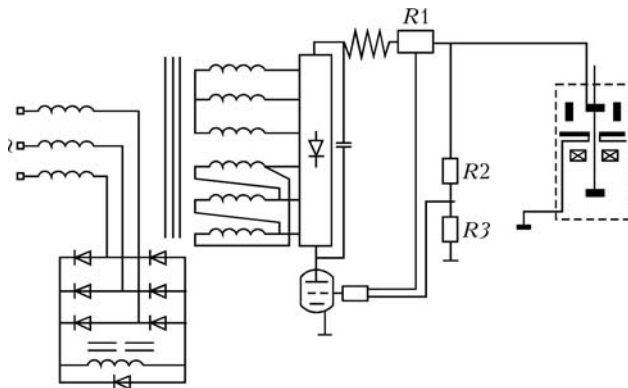


Рис. 2. Упрощенная блок-схема пушки и источника ускоряющего напряжения ЭЛА-60, снабженного проходной лампой ПП-2 (емкость фильтра $15 \cdot 10^{-9}$ Ф)

деля. Однако возможность появления пробоя при этом остается, а поэтому важно дальнейшее совершенствование источников ускоряющего напряжения.

Электронная лампа, включенная как линейный проходной элемент (рис. 2), уже на начальной стадии аномального нестационарного процесса «перехватывает» на себя ускоряющее напряжение [2]. В течение нескольких миллисекунд полностью восстанавливается электрическая прочность эмиссионной системы и ускоряющее напряжение на пушке.

Отключения источника питания электрической защитой не происходит даже при имитации вакуумного пробоя коротким замыканием на землю высоковольтного вывода (рис. 3).

Разряд сглаживающего фильтра эффективно прерывается проходной лампой и высвобождаемая при пробое энергия соизмерима с таковой в случаях применения высокочастотных источников питания одинаковой мощности [3]. Высокая стабильность поддержания ускоряющего напряжения и возможность предотвращения электрических пробоев позволяют обеспечить бездефектное формирование шва на наиболее критическом участке перекрытия кольцевого шва, выполненного на стальных толстостенных конструкциях (рис. 4).



Рис. 3. Проверка функционирования системы автоматического повторного включения источника питания путем его нагружения заземленной штангой

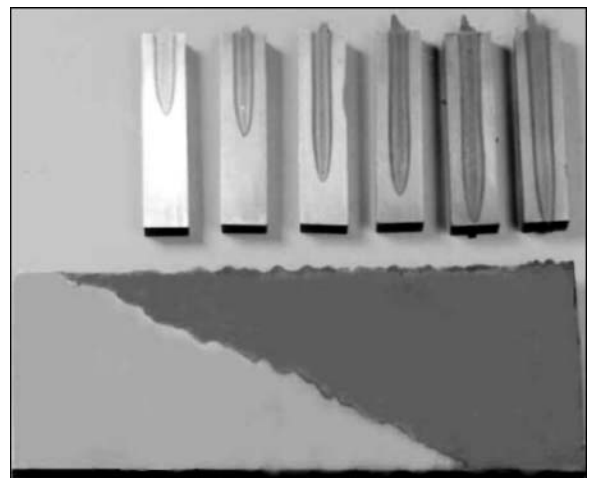


Рис. 4. Макрошлифы поперечных (вверху) и продольных (внизу) сечений литой зоны, полученной при замыкании кольцевого шва на теплоустойчивой стали толщиной 130 мм [4]

Высокочастотные источники питания выгодно отличаются от традиционных, работающих на промышленной частоте 50 Гц, со своими значительно меньшими габаритами, широким диапазо-

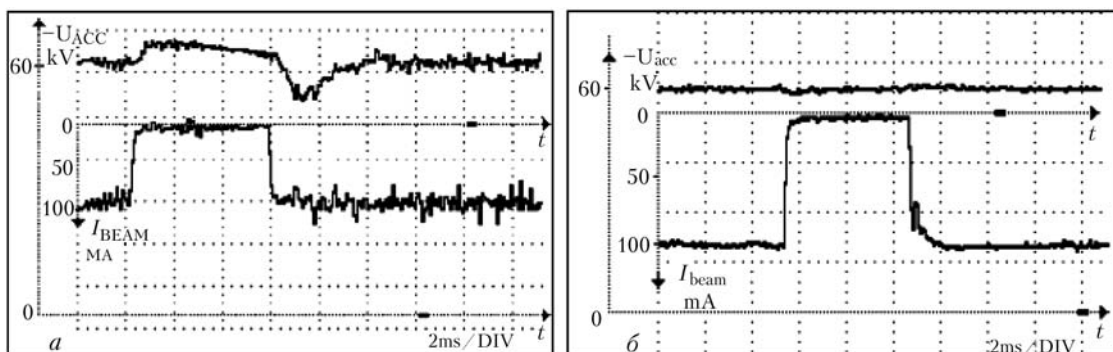


Рис. 5. Зависимость ускоряющего напряжения от импульсного изменения тока пучка в высокочастотном резонансном источнике питания (а) и источнике питания с проходной лампой (б)

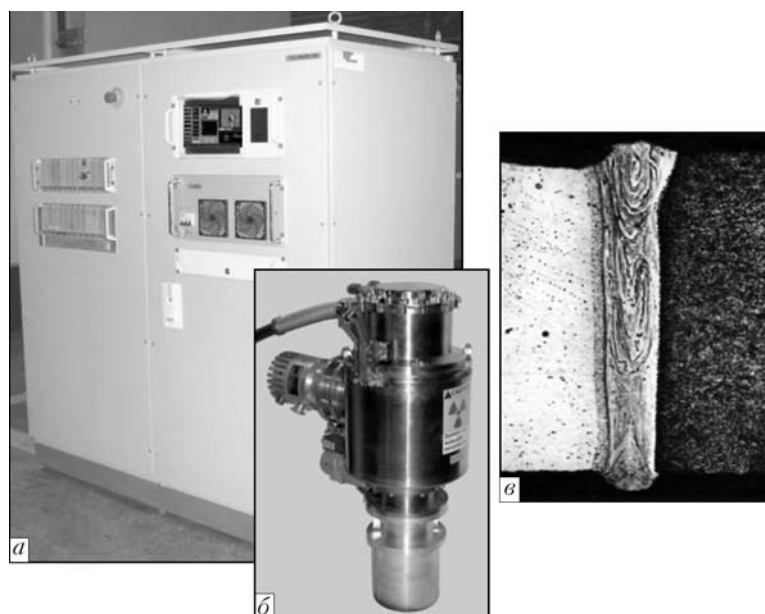


Рис. 6. Источник питания ЭЛА-120/6 (а), сварочная пушка со снятой рентгеновской защитой (б) и макроструктура сварного соединения сталей Р6М5 + 50ХФА толщиной 1,35 мм (в) при скорости сварки 7,8 м/мин; ускоряющем напряжении 120 кВ; токе пучка 12,5 мА; ширине литой зоны в верхней и корневой части шва соответственно 0,35 и 0,25 мм

ном регулирования ускоряющего напряжения. Они не требуют применения защитных линейных элементов, поскольку имеют малый запас энергии.

Однако высокочастотные источники питания отличаются значительно более мягкой нагрузочной характеристикой и не предназначены для работы в режиме импульсной модуляции тока пучка, поскольку не могут обеспечить требуемую стабильность ускоряющего напряжения (рис. 5). Между тем, импульсная модуляция тока пучка является эффективным технологическим приемом

и широко применяется при электронно-лучевой сварке не только тонколистовых материалов, но и металлов больших толщин.

На практике подтверждена эффективность применения высокочастотных источников питания при мощности пучка до 18 кВт и отсутствии жестких требований к импульсному изменению его тока. Примером тому является электронно-лучевая сварка непрерывных ленточных заготовок, в том числе из таких разнородных металлов, как инструментальная + углеродистая стали. Для соответствующих установок созданы и введены в промышленную эксплуатацию 10 комплектов энергетических блоков мощностью 120 и 6 кВт с компьютерным управлением (рис. 6). Ниже приведены основные технические характеристики промышленных энергоблоков.

Промышленные установки. Благодаря наличию в ИЭС им. Е. О. Патона установки с вакуумной камерой вместимостью 400 м³ есть возможность применения электронно-лучевой сварки для изготовления вакуумных камер промышленных установок. При этом нет необходимости в завершающей механической обработке сопрягаемых поверхностей.

Наиболее востребованными являются промышленные установки трех типов.

Первый тип — это установки с вакуумными камерами относительно небольшой (от 0,2 до

Основные технические характеристики энергоблоков

Основные параметры	На основе высокочастотных генераторов				На основе проходной лампы				
	ЭЛА-60/1,2	ЭЛА-60/6	ЭЛА-120/6	ЭЛА-120/18	ЭЛА-60/15	ЭЛА-60/30	ЭЛА-60/60	ЭЛА-120/60	ЭЛА-120/120
Мощность пучка максимальная, кВт	1,2	6	6	18	15	30	60	60	120
Ускоряющее напряжение, кВ	60	60	120	120	60	60	60	120	120
Масса, кг:									
электронной пушки	55	55	60	60	55	55	55	60	60
радиационной защиты пушки	—	—	130	130	—	—	—	—	130
источника питания	185	460	735	735	2500	2750	3000	5000	6000
Режим работы системы «Растр»:									
до и после сварки	+	+	+	+	+	+	+	+	+
в реальном времени	—	—	—	—	+	+	+	+	+
Глубина проплавления, мм:									
сталей	3	12	15	60	50	75	100	130	250
титановых сплавов	3,5	15	20	100	80	110	150	220	400
алюминиевых сплавов	5	30	35	140	120	150	200	240	450



Рис. 7. Установка СВ-112 для сварки малогабаритных изделий (в промышленной эксплуатации находится семь таких установок)

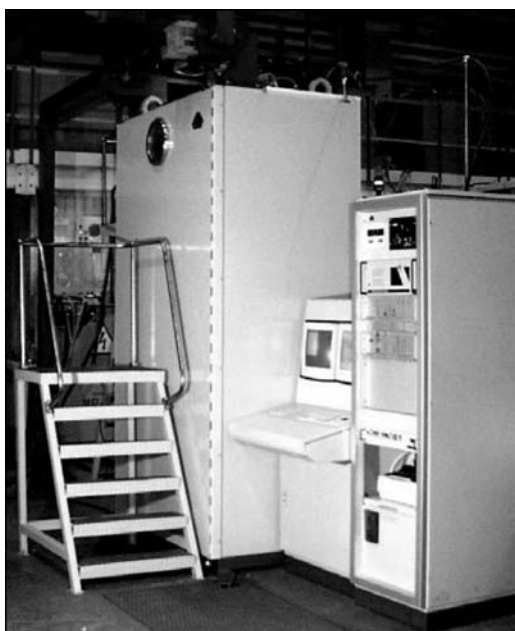


Рис. 8. Установка УЛ-178М для сварки узлов теплообменных аппаратов (ОКБМ им. И. И. Африкантова, г. Нижний Новгород)



Рис. 9. Тактовая установка УЛ-157 для сварки блоков шестерен (завод АВТО-ЗАЗ, г. Мелитополь)

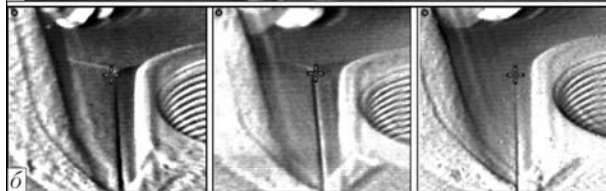
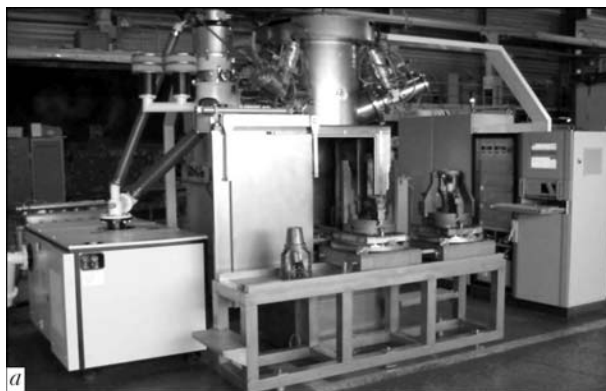


Рис. 10. Трехпушечная установка для сварки буровых долот (а), отображение стыков (б), полученное с помощью вторичных электронов на мониторе, и общий вид сваренных долот трех типоразмеров (в) (установки работают в объединении «Волгабурмаш», Самара, РФ; «Смит Тулз», Понка-Сити, США)



Рис. 11. Установка КЛ-132 с семикоординатной системой сварочных перемещений для изготовления изделий аэрокосмической промышленности

3,5 м³) вместимости, снабженные стационарной или скользящей вдоль одной из стенок сварочной пушкой (рис. 7, 8).

Установки второго, так называемого тактового типа используются, в частности, для сварки блоков шестерен коробок передач (рис. 9). К этому же типу установок можно отнести и высокопроизводительную установку для сварки корпусов бу-



ровых долот (рис. 10), которая оснащается тремя сварочными пушками, запитываемыми от одного источника ускоряющего напряжения. Одновременно осуществляется сварка трех продольных швов, что сводит к минимуму сварочные деформации и повышает производительность сварки. Процесс сварки отображается на мониторе в режиме реального времени, причем пучок каждой из трех пушек автоматически совмещается с соответствующим стыком с помощью системы вторично-электронного отображения поверхности «Растр» [5]. Процесс сварки длится менее одной минуты. Поэтому до погружения сваренного долота в охлаждающую жидкость подшарошечные области со смазкой и уплотнительными манжетами не успевают прогреться до опасных температур. Тактовое время выхода сваренного долота составляет менее 5 мин. Габариты вакуумной камеры позволяют осуществлять сварку долот всех типоразмеров, при этом меняется только сварочно-сборочный узел.

Третий тип — крупногабаритные универсальные установки, отличительной особенностью которых является применение внутрикамерных электронных пушек, перемещаемых в пределах до 12 м с максимальной скоростью 120 м/ч при точности позиционирования $\pm 0,05$ мм. Такое решение позволяет максимально повысить коэффициент использования внутреннего объема вакуумной камеры. Направляющие, вдоль которых перемещается сварочная пушка, закреплены непосредственно на стенках вакуумной камеры. Поэтому для минимальных деформаций стенок в процессе откачки камера выполнена в виде двух вакуумплотных, сравнительно тонкостенных (толщина каждой 8...12 мм) оболочек, соединенных между собой ребрами жесткости — шпангоутами [6].

Применение такой коробчатой конструкции стенок и дверей вместо обычной тавровой позволяет получить в 2 раза больший момент инерции и, как следствие, меньший прогиб при откачке камеры. Отказ от внешних ребер жесткости дал возможность улучшить внешний вид камеры (рис. 11) и устранить накопители пыли на ее внешних стенках, что особенно важно в условиях цеха.

Применительно к пространственно сложным конструкциям реализована семякоординатная система сварочных перемещений: пушки по трем линейным и двум угловым координатам, а свариваемого изделия — по двум угловым (вращение и наклон). Для синхронного управления сварочными перемещениями и параметрами сварочного пучка используется промышленная система с развитым интерфейсом CNC+PLC [7].

1. *Оборудование НИКИМТа для электронно-лучевой сварки* / В. А. Хаванов, С. Д. Братчук, В. А. Серьезнов, А. В. Казаков // Свароч. пр-во. — 2006. — № 9. — С. 25–31.
2. *Электронно-лучевая сварка* / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
3. *Назаренко О. К., Локишин В. Е.* Динамические характеристики высоковольтных источников питания для электронно-лучевой сварки // Автомат. сварка. — 2005. — № 1. — С. 36–39.
4. *Nesterenkov V. M.* Technology and equipment for electron beam welding of power engineering components // Power beam technology, Stratford-upon-Avon, UK, Sept. 23–26, 1990. — Abington, Cambridge: The Welding Institute, 1990. — P. 171–179.
5. *Наблюдение процесса электронно-лучевой сварки и автоматическое слежение за стыком* / О. К. Назаренко, В. И. Шаповал, Г. А. Лоскутов и др. // Автомат. сварка. — 1993. — № 5. — С. 35–38.
6. *Назаренко О. К., Нестеренков В. М., Непорожний Ю. В.* Конструирование и электронно-лучевая сварка вакуумных камер // Там же. — 2001. — № 6. — С. 50–53.
7. *Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия* / Б. Е. Патон, О. К. Назаренко, В. М. Нестеренков и др. // Там же. — 2004. — № 5. — С. 3–7.

The paper presents the main results of E.O.Paton Electric Welding Institute activities on development of electron beam welding equipment over the last 15 years. Technical data of the developed range of power units (gun–power source–control system), as well as of some of the electron beam welding machines, are given.

Поступила в редакцию 10.04.2008



АГЛОМЕРИРОВАННЫЕ ФЛЮСЫ — НОВАЯ ПРОДУКЦИЯ ОАО «ЗАПОРОЖСТЕКЛОФЛЮС»

В. В. ГОЛОВКО, д-р техн. наук, **В. И. ГАЛИНИЧ**, **И. А. ГОНЧАРОВ**, кандидаты техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Н. Я. ОСИПОВ, **В. И. НЕТЯГА**, **Н. Н. ОЛЕЙНИК**, инженеры (ОАО «Запорожстеклофлюс»)

Рассмотрены достоинства и недостатки применения плавящихся и агломерированных флюсов при дуговой сварке. Отмечены особенности новой синергетической технологии изготовления агломерированных флюсов в г. Запорожье.

Ключевые слова: дуговая сварка, высокопрочные низколегированные стали, агломерированный флюс, производство труб, технология изготовления флюса, свойства сварных соединений

При изготовлении сварных конструкций, аппаратов, изделий стали остаются самым распространенным конструкционным материалом, однако в последние годы в отечественной промышленности заметно изменилась их номенклатура. Если раньше большинство сварных швов выполняли на низкоуглеродистых сталях, а из низколегированных наибольшее распространение имели стали марок 09Г2С и 10ХСНД ($\sigma_b = 400...550$ МПа), то в настоящее время наблюдается постоянное увеличение объемов потребления высокопрочных низколегированных (ВПНЛ) сталей ($\sigma_b \geq 620$ МПа). Они отличаются не только повышенными прочностными характеристиками, но и более высокой вязкостью, пластичностью в результате снижения содержания вредных примесей, микролегирования и применения специальных режимов термомеханической обработки.

Новое поколение сталей потребовало новых сварочных материалов. Так, например, в ходе первых же работ по освоению технологии изготовления сварных конструкций из ВПНЛ сталей было установлено, что плавящиеся флюсы марганец-силикатного типа (АН-348А, ОСЦ-45, АН-60), которые имели до настоящего времени наиболее широкое применение, не в состоянии обеспечить возможность получения металла швов, близких по своим характеристикам к свойствам основного металла. Флюсы этих марок вытесняются из производства агломерированными флюсами алюминатно-основного или алюминатно-рутилового типов, так как они, как правило, имеют более высокую основность по сравнению с марганец-силикатными флюсами. Но, с другой стороны, почему на замену им не приходят плавящиеся флюсы более высокой основности? Для ответа на этот вопрос требуется более детально разобраться в

особенностях сварки под агломерированными флюсами.

Различия в технологии изготовления определяют преимущества и недостатки каждого из двух основных видов сварочных флюсов — плавящихся и неплавящихся. Плавящиеся флюсы в процессе изготовления доводятся до состояния плавления в газопламенных или электродуговых печах с последующей термической и механической обработкой полученного материала. Неплавящиеся (агломерированные или керамические) флюсы в процессе изготовления не подвергаются термической обработке при температурах, равных или превышающих температуру плавления смеси шихтовых компонентов.

Плавящиеся флюсы отличаются высокой однородностью состава зерен, повышенной стойкостью к истиранию и низкой склонностью к сорбированию влаги в процессе транспортирования, хранения и использования, но имеют ограниченные возможности влияния на металлургические процессы в зоне горения сварочной дуги и в сварочной ванне.

По сравнению с плавящимися неплавящиеся флюсы характеризуются более широкими возможностями влияния на развитие металлургических процессов при дуговой сварке под флюсом, но имеют два существенных недостатка: повышенную склонность к истиранию и высокую склонность к сорбированию влаги из окружающего воздуха.

Указанные недостатки неплавящихся флюсов определяются тем, что соединение отдельных шихтовых компонентов в зернах флюса происходит за счет адгезионных свойств специальных связующих веществ, механические свойства и способность к сорбированию атмосферной влаги которых существенно отличаются от плавящихся продуктов.

В случае сварки под агломерированным флюсом содержание кислорода в зоне горения дуги, при прочих равных условиях, выше по сравнению

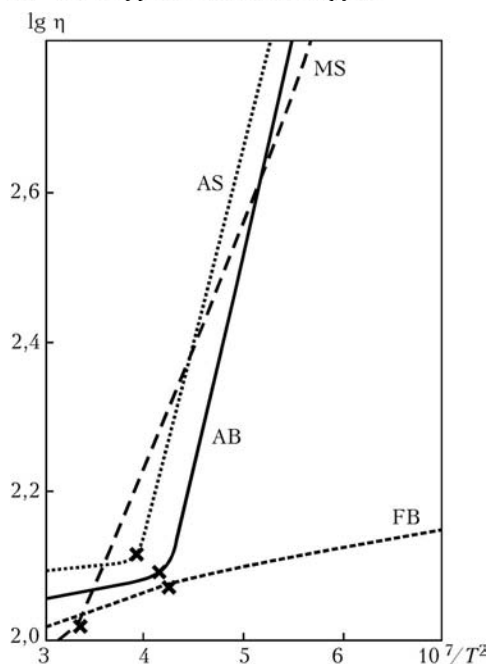


Рис. 1. Температурная зависимость вязкости флюсов

с плавным флюсом, что обусловлено отсутствием процесса плавления шихтовых компонентов при изготовлении флюса. Кроме того, наличие сухого остатка жидкостекольной связки в составе агломерированного флюса способствует увеличению стабильности горения сварочной дуги и ее удлинению, в результате время пребывания капля электродного металла в газовой фазе возрастает. При этом содержание кислорода в металле каплей может значительно превышать максимальную его растворимость в железе. Повышение содержания в расплавленном металле такого поверхностно-активного элемента, как кислород способствует изменению направления движения потоков металла в ванне от центробежного к центростремительному, что вызывает изменение формы металла шва [1]. Практика применения агломерированных флюсов показала, что при сварке под ними глубина проплавления основного металла примерно на 20 % выше, чем в случае использования плавных флюсов, что позволяет снизить погонную энергию процесса. Переход при сварке труб большого диаметра в заводских условиях с плавных флюсов на агломерированные позволил снизить на 25...30 % ширину швов и соответственно расход сварочной проволоки.

Состав шлаков агломерированных флюсов, как правило, отличается от эвтектического, характерного для плавных флюсов, поэтому они характеризуются более высокой температурой плавления и более высокой скоростью нарастания вязкости при снижении температуры. Данные, приведенные на рис. 1, показывают, что по своей способности к формированию сварного шва агломерированные флюсы алюминатно-основного

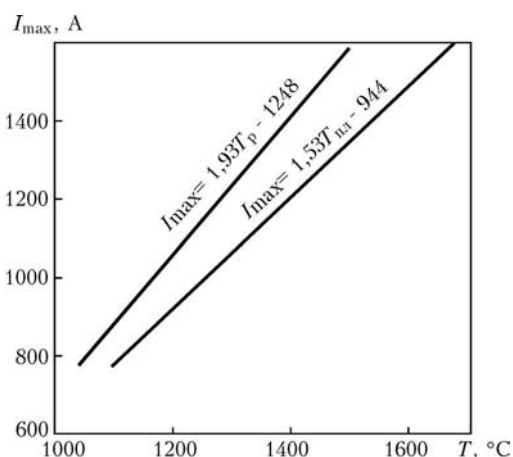


Рис. 2. Зависимость допустимой токовой нагрузки от температур размягчения и плавления сварочных флюсов [2]

(AB) типа близки к плавным флюсам марганец-силикатного (MS) и алюминатно-силикатного (AS) типов, при этом по показателю основности они находятся на одном уровне с плавными флюсами флюоритно-основного (FB) типа.

Температуры размягчения и плавления флюсов определяют еще одну важную характеристику — допустимую токовую нагрузку (допустимую плотность тока в сварочном электроде). Этот показатель самым непосредственным образом влияет на производительность процесса, его эффективность, возможность использования многодуговой сварки. При повышении сварочного тока увеличивается давление дуги, поэтому для сохранения шлаковой каверны вокруг зоны горения дуги требуется обеспечить определенные характеристики флюса: насыпную массу, температурную зависимость вязкости шлакового расплава и толщину стенок шлаковой каверны. Первая из этих величин определяется гранулометрическим составом флюса и не зависит от температуры. Вторая была рассмотрена выше, а третья определяется температурами размягчения T_r и плавления флюсов $T_{пл}$. На рис. 2 показана экспериментально установленная зависимость допустимой токовой нагрузки от T_r и $T_{пл}$.

Повышенная температура плавления агломерированного флюса способствует уменьшению его расхода на образование шлаковой корки и он ниже на 15...20 %, чем у плавных флюсов. Соответственно снижается и выделение сварочного аэрозоля.

Отсутствие процессов плавления в технологии изготовления агломерированных флюсов предопределяет, во-первых, более высокий их кислородный потенциал по сравнению с плавными флюсами и, во-вторых, гетерогенность (присутствие кристаллической и стекловидной фаз) шлака. При этом следует отметить, что, если при использовании плавных флюсов их окислительная способность связывается преимущественно с содер-



Результаты оценки гигиенических характеристик содержания токсических веществ в сварочном аэрозоле, выделяющихся при сварке под флюсом

Марка флюса	Валовые выделения аэрозоля, мг/мин	Фториды, %		Бифториды, % (II)	Соединения марганца, % (II)
		растворимые (II)	нерастворимые (III)		
АНКС-28	11,8	12,5	2,1	—	4,4
АН-60	13,5	19,0	1,3	11,4	7,6
АН-348А	15,8	17,1	2,5	12,3	11,5

Примечание. В скобках указан класс опасности: II — вещества высокоопасные; III — умеренно опасные.

жанием кремнезема (флюсы CS, MS, ZS, RS, AS типов), то агломерированные флюсы способны обеспечить требуемый уровень кислородного потенциала в результате введения в их состав высших оксидов металлов, карбонатов или других легкодиссоциирующих компонентов. Использование отмеченных ингредиентов при формировании состава агломерированных флюсов создает возможность обеспечения хорошей отделимости шлаковой корки с поверхности металла шва при сварке под флюсами повышенной основности [3].

В настоящее время областью наиболее широкого применения сварочных флюсов является изготовление труб большого диаметра. В связи с переходом трубосварочных заводов Украины и России на выпуск труб из ВПНЛ сталей возросли объемы потребления агломерированных флюсов алюминатно-основного или алюминатно-рутилового типов, поставляемых зарубежными изготовителями сварочных материалов (ОР 132, ОР 192, ОК.10.74 и др.). Производство сварочных флюсов в Челябинске, Запорожье, Никополе, Новомосковске имеет более чем 50-летнюю историю и, вполне естественно, такой опыт должен быть использован при дальнейшем совершенствовании имеющихся на этих заводах технологий. Неудивительно, что именно на Челябинском трубопрокатном заводе появилась первая в России технологическая линия производства агломерированных флюсов, продукция которой ориентирована, в первую очередь, на собственное трубное производство. Запорожский завод сварочных флюсов и стеклоизделий (ЗЗСФС) в свое время создавался и остается до настоящего времени самым крупным производи-

телем сварочных флюсов в Европе. Работники этого предприятия имеют многолетние устоявшиеся связи с потребителями своей продукции, производят постоянный мониторинг рынка. Руководством ЗЗСФС было принято решение об организации на собственных площадях участка по изготовлению высококачественных агломерированных флюсов производительностью 4 тыс. т в год.

В ходе обсуждения со специалистами ИЭС им. Е. О. Патона различных технологий изготовления сварочных флюсов были детально рассмотрены все достоинства и недостатки как газопламенного и электродугового процессов, так и агломерирования. В результате появилась идея создания процесса, который позволяет объединить преимущества, присущие технологии производства плавящихся флюсов, с таковыми, но характерными для технологии изготовления агломерированных флюсов (так называемый синергетический эффект).

Известно, что плавящиеся флюсы характеризуются высокой стойкостью против разрушения зерен в процессе транспортирования, хранения и использования, а также низкой склонностью к сорбированию атмосферной влаги. В то же время сварка под агломерированными флюсами в результате более высокой их металлургической активности обеспечивает повышенное содержание марганца, снижение содержания кремния в наплавленном металле, а также улучшение сварочно-технологических свойств в сравнении с плавящимися флюсами сопоставимого состава. Объединение трех технологий изготовления флюсов (газопламенной и электродуговой плавки, а также агломерирования) в одном процессе позволило существенно повысить качество конечного продукта вследствие синергетического эффекта от объединения преимуществ каждой из них.

Введение в состав шихты частиц плавящихся шлаков позволило снизить склонность гранул (зерен) флюса к механическому разрушению в процессе транспортирования, хранения и использования, а также уменьшить склонность флюсов к сорбированию атмосферной влаги, а технология агломерирования флюсов на заключительном этапе их изготовления разрешает обеспечить разви-

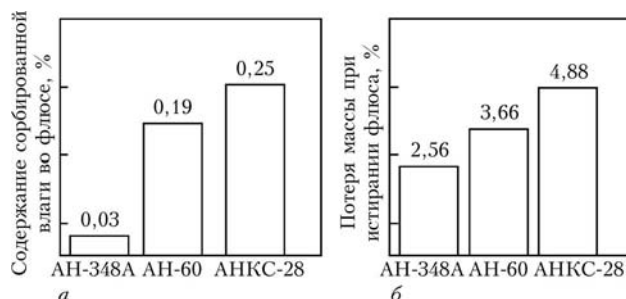


Рис. 3. Склонность флюсов к сорбированию влаги из окружающего воздуха (а) и к истиранию во флюсоотсосах (б)

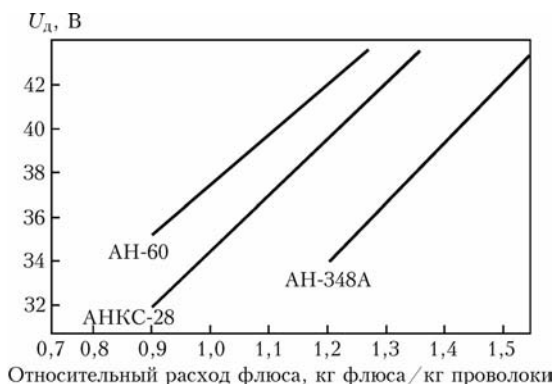


Рис. 4. Относительный расход флюсов при сварке проволокой $\varnothing$ 4 мм

тие металлургических процессов, характерное для неплавленных флюсов.

В настоящее время ЗЗСФС освоил промышленное производство агломерированных флюсов типа АНКС с использованием синергетической технологии их изготовления. В таблице и на рис. 3–5 приведены результаты сопоставления агломерированного флюса АНКС-28, изготовленного по синергетической технологии, с плавленными флюсами АН-348А и АН-60.

В таблице приведены данные, полученные в ходе испытаний, которые выполнены ИЭС им. Е. О. Патона и ЗЗСФС совместно с Институтом медицины труда АМН Украины. Для определения склонности к сорбированию влаги из окружающего воздуха навески флюсов после просушки выдерживали в течение семи суток в эксикаторе с относительной влажностью 78,8 % при температуре 20 °С. Склонность гранул флюса к истиранию при транспортировании по флюсоотсосу определяли по методике ИЭС им. Е. О. Патона [4]. Образцы наплавленного металла для определения ударной вязкости получали при односторонней сварке проволокой марки Св-07Г1НМА диаметром 4 мм. В ходе этих испытаний измеряли также относительный расход флюсов.

Приведенные данные показывают, что по своим эксплуатационным характеристикам (склонность к сорбированию влаги, стойкость против

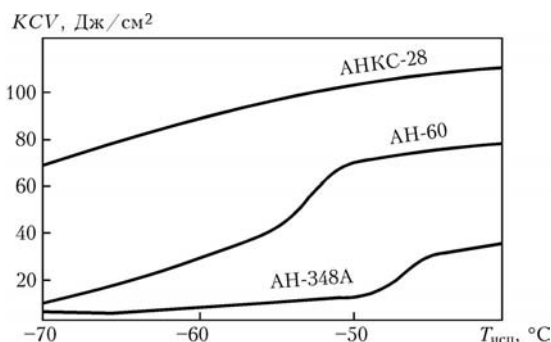


Рис. 5. Ударная вязкость наплавленного металла при сварке проволоки Св-07Г1НМА $\varnothing$ 5 мм под разными флюсами

истирания, относительный расход) агломерированный флюс АНКС-28 близок к плавленому флюсу АН-60, а по санитарно-гигиеническим показателям имеет заметные преимущества по сравнению с плавленными флюсами. Флюс АНКС-28 обеспечивает ударную вязкость наплавленного металла свыше 60 Дж/см² при температурах испытания до -70 °С.

Учитывая приведенные результаты, а также то, что себестоимость изготовления флюсов по синергетической технологии ниже по сравнению с флюсами, которые изготавливаются с использованием методов плавления, ЗЗСФС совместно с ИЭС им. Е. О. Патона рекомендуют потребителям флюс нового поколения АНКС-28 в качестве достойной замены флюсов АН-348А и АН-60.

1. Головки В. В. Влияние физико-химических свойств флюса на движение жидкого металла в сварочной ванне // Автомат. сварка. — 1994. — № 9/10. — С. 20–23.
2. Davis M. L. E., Bailey N. Have we the right ideas about fluxes? // Trends in steel and consumables for welding — an international conference, London 14–16 Nov., 1978. — Abington. — 1979. — VI. — P. 231–247.
3. Исследование отделимости шлаковой корки при сварке под керамическими флюсами алюминатного типа / И. К. Походня, В. В. Головки, Д. М. Кушнерев // Тез. докл. Всесоюз. конф. по сварочным материалам, 10–14 окт. 1983 г. Череповец. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. — С. 30–31.
4. Кушнерев Д. М., Головки В. В. Способ количественной оценки стойкости гранул флюса против истирания // Информ. материалы СЭВ по проблеме «Сварка». — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона. — 1984. — № 1. — С. 76–77.

The advantages and disadvantages of application of fused and agglomerated fluxes for arc welding are considered. The features of the new synthesized technology of manufacturing agglomerated fluxes in the city of Zaporozhje are noted. It is shown that as to their performance they are close to AN-60 fused flux, and are superior to the latter as to their sanitary-hygienic parameters.

Поступила в редакцию 18.07.2008

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СВАРКИ РЕЛЬСОВ В КНР

ПИН МА, асп. (НТУУ «Киевский политехнический институт»), А. В. БОНДАРУК, инж. («Электростык», г. Киев)

Представлены некоторые макроэкономические показатели КНР. Приведены планы развития транспортной системы страны. Описаны основные сварочные технологии, используемые при строительстве железнодорожного полотна. Представлено контактное сварочное оборудование и даны его основные технико-экономические характеристики. Внимание концентрируется на инновационных технологиях для строительства высокоскоростных магистралей. Выполнена оценка потенциальной потребности в новом оборудовании на базе укрупненных расчетов. Определены основные направления развития технологического потенциала в сфере оборудования для сварки рельсов.

Ключевые слова: контактная сварка, сварочное оборудование, промышленность Китая, транспортная инфраструктура, железнодорожные магистрали, перспективы развития

Экономика КНР является одной из ведущих в мире по показателям макроэкономического развития. С 1978 по 2003 гг. ежегодный рост ВВП страны составлял около 9,3 % (рис. 1).

Рассмотрим динамику развития экономики страны на примере транспортной инфраструктуры. За этот период протяженность автомобильных дорог увеличилась на 36,9, в то время, как железных — всего на 1,4 %. По статистическим данным доля грузовых железнодорожных перевозок составляет порядка 25 % общего мирового объема, при этом длина железнодорожных магистралей — всего 6 % мировых.

Для ликвидации дисбаланса Министерством государственного строительства КНР была разработана Программа строительства новых железных дорог на период с 2006 до 2020 гг. Согласно этой программе на этапе реализации XI пятилетнего плана (2006–2010 гг.) предстоит построить 18 тыс. км новых железнодорожных магистралей. Капитальные вложения в строительство должны составить 167 млрд дол. США. За период с 2011 до 2020 гг. планируется строительство еще более 10 тыс. км железных дорог. Кроме того, в последние годы ведется крупномасштабное строительство новых линий городского метро в главных мегаполисах страны (Пекин, Шанхай, Гуанчжоу, Шензен), инвестиции в которое не являются частью Программы (<http://www.cin.gov.cn>).

Кратко рассмотрим технологический процесс строительства железнодорожных магистралей с точки зрения объема работ по сварке рельсов.

С металлургических заводов на стационарные рельсосварочные предприятия поставляются рельсы длиной 25 м, которые сваривают в плиты длиной до 500 м, а затем укладывают в путь и

сваривают между собой мобильными полевыми комплексами типа К-922. Для получения одной плиты длиной 500 м требуется выполнить 20 сварок, т. е. 1 км однопутного пути — это 80 сварок. Обычно современные железнодорожные магистрали имеют как минимум два пути (или колеи) плюс разъезды на станциях для обеспечения совместного графика движения составов различных скоростных категорий. Поэтому при выполнении предварительных расчетов необходимого количества рельсов (до детального проектирования) длина магистрали обычно утраивается.

Для выполнения всего комплекса работ по сварке и укладке рельсов на всех участках железнодорожного пути используется четыре группы оборудования:

стационарное оборудование для контактной сварки, предназначенное для изготовления рельсовых плит длиной до 500 м на рельсосварочных предприятиях. Имеющийся для этого парк оборудования включает 4 шт. машин К-190, 3 шт. К-1000 (рис. 2) (разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона и изготовленные на КЗЭСО, Украина), 22 шт. GAAS-80 (рис. 3) (Шлаттер, Швейцария). Следует отметить, что из 22 ед. швейцарских машин восемь работают более шести лет, все машины К-190 уже отслужили более 10 лет и нуждаются в капитальном ремонте и модернизации, либо замене на новые;

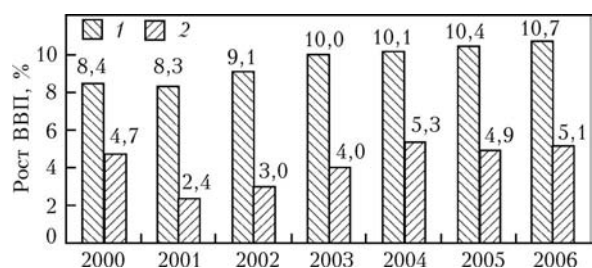


Рис. 1. Сравнительные показатели роста ВВП в КНР (1) и в мире (2)



Рис. 2. Стационарная машина К-1000

мобильное оборудование для контактной сварки, применяемое для соединения рельсовых плетей в пути. Это мобильные рельсосварочные комплексы на базе сварочных головок К-922 (16 шт.) (рис. 4). Сварочные головки разработаны и изготовлены в Украине (ИЭС им. Е. О. Патона и КЗЭСО), а системы управления и передвижные агрегаты — совместно с США, Канадой и КНР. Все комплексы начали работать в 2006–2007 гг. На рельсосварочных предприятиях имеются также сварочные машины К-920 и более старые К-900;

оборудование для газопрессовой сварки рельсов в полевых условиях. Это, как правило, устаревшие машины японского производства и их аналоги, изготовленные в КНР, которые по своим технико-экономическим показателям не могут конкурировать с новыми машинами для контактной стыковой сварки;

оборудование для алюмотермитной сварки в полевых условиях (рис. 5). Для этого используется комплект расходных сварочных материалов (на каждую сварку расходуется одна упаковка). В основном это сварочные материалы производства фирмы «РЭИЛТЕК» (Австралия, Франция). Эта технология главным образом применяется для соединения рельсов основного пути со стрелочными переводами на станциях, в местах, недоступных для мобильных сварочных машин. Доля алюмо-



Рис. 4. Мобильная машина К-922

термитной сварки в общем объеме сварочных работ в условиях КНР ничтожно мала.

Большая часть новых строящихся железных дорог планируется как высокоскоростные магистрали (со скоростью движения поездов по главному пути до 380 км/ч), поэтому к качеству сварных соединений рельсов предъявляются более высокие требования, чем обычно. Эти требования могут быть удовлетворены только при использовании самого современного сварочного оборудования с компьютерным управлением цикла сварки (рис. 6), минимизацией влияния человеческого фактора, автоматизированной регистрацией параметров процесса и заключением о качестве каждого получаемого сварного соединения.

По оценкам авторов таким оборудованием на данный момент являются лишь современные машины типа К-1000 для сварки в стационарных заводских условиях и комплексы на базе машин К-922 и К-920 в полевых условиях.

Следует также отметить, что машины типа К-922 (рис. 7) на данное время не имеют аналогов в мире и являются единственным оборудованием, позволяющим выполнять сварку замыкающих стыков рельсовых плетей, в результате чего получается так называемый бархатный путь для высокоскоростных магистралей, работающих в климатических условиях с большой разницей между летними и зимними температурами.



Рис. 3. Стационарная машина GAAS-80



Рис. 5. Машина для алюмотермитной сварки



Рис. 6. Интерфейс системы компьютерного контроля параметров и оценки качества сварки



Рис. 7. Сварка рельсов передвижным комплексом К-922

Выполним оценку потенциальной потребности в новом рельсосварочном оборудовании на период до 2020 г. по следующим двум позициям:

протяженности новых строящихся железнодорожных магистралей;

необходимости замены изношенных рельсов на уже существующих магистральных. Как известно, средний срок эксплуатации рельсов основного пути составляет 5 лет, после чего изношенные рельсы подлежат замене на новые.

Рассмотрим объем сварочных работ по первой из названных выше позиций. До 2020 г. в КНР будет построено более 28 тыс. км новых железных дорог, для чего потребуется уложить 84 тыс. км однопутного пути, а это 6 млн 72 тыс. сварных стыков.

По состоянию на 2007 г. общая протяженность действующих железных дорог КНР составляет 72 тыс. км и к 2010 г. должна увеличиться до 90 тыс. км, а к 2020 г. — более чем до 100 тыс. км. Для упрощения расчетов принимаем общую длину обслуживаемого пути на период с 2008 до 2020 гг. (13 лет) равной 90 тыс. км. Как уже отмечалось, после пяти лет эксплуатации рельсы подлежат замене. Поэтому на уже существующих магистральных их нужно будет менять $13:5 = 2,6$ раза.

Таким образом, за рассматриваемый период времени подлежат замене 234 тыс. км пути, а это 18 млн 720 тыс. сварок. Всего по двум позициям получается, что за 13 лет необходимо будет выполнить 25 млн 440 тыс. сварных стыков или ежегодно 1 млн 957 тыс. стыков. Еще раз отметим, что в расчетах не учтено строительство городских линий метро. Для удобства дальнейшего изложения округляем годовой объем сварочных работ до 2 млн сварок.

Some indices of macro economy of China are given. Plans of development of the country transport system are presented. Main welding technologies used for construction of the railway bed are considered. Resistance welding equipment is described, and its basic technical-economic characteristics are presented. The focus is on innovation technologies for construction of high-speed railroads. Potential demand for new equipment is estimated on the basis of detailed calculations. Main lines of development of the technological potential in the field of equipment for rail welding are defined.

В общем объеме сварочных работ доля участия стационарного оборудования обычно составляет около 90 % (или 1,8 млн для рассматриваемого случая), соответственно оставшиеся 10 % (0,2 млн) — доля мобильных сварочных комплексов. Годовая производительность одной стационарной машины составляет около 25 тыс. циклов сварки при двухсменном режиме работы, а производительность мобильного комплекса — примерно 3 тыс. циклов сварки. Такая разница обусловлена большими затратами времени на вспомогательные операции по подготовке пути под сварку. Таким образом, для своевременного выполнения запланированных Программой работ потребуется 72 стационарные машины и 67 мобильных комплексов.

По данным авторов парк стационарных сварочных машин в КНР на 2008 г. насчитывает 22 ед. машин GAAS-80 и 3 ед. машин K-1000 (всего 25 шт.). Мобильных комплексов на базе машин K-922 12 ед. Учитывая представленные авторами расчеты, уже сейчас необходимо пополнить парк стационарных машин на 50 ед. и мобильных комплексов на 55 ед.

Выводы

1. Рассмотрен опыт применения различных технологий сварки рельсов при строительстве новых и ремонте существующих железных дорог в Китае.

2. Посредством предварительных технико-экономических расчетов выполнен прогноз потребности в новом оборудовании для сварки рельсов на период до 2020 г.

Поступила в редакцию 19.06.2008



СВАРКА СТЫКОВЫХ ШВОВ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ТРУБОПРОВОДОВ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСОМ МЕТАЛЛА

М. В. КАРАСЕВ, д-р техн. наук, **Д. Н. РАБОТИНСКИЙ**, инж. (ЗАО НПФ «ИТС», г. С.-Петербург, РФ),

А. Н. АЛИМОВ, инж. (ООО «АРКСЭЛ», г. Донецк),

В. Г. ГРЕБЕНЧУК, канд. техн. наук (ЦНИИС НИЦ «Мосты», г. Москва, РФ),

С. В. ГОЛОВИН, канд. техн. наук (ООО «Институт ВНИИСТ», г. Москва, РФ),

Р. РОЗЕРТ, канд. техн. наук («Drahtzug Stein», Германия)

Приведены результаты разработки технологии сварки стыковых швов трубопроводов в монтажных условиях. Отмечены преимущества новых видов порошковых проволок с рутитовым типом сердечника, реализуемых при использовании выпрямителя ВД-506ДК. Даны рекомендации по выбору защитных смесей и режимам сварки.

Ключевые слова: дуговая сварка, бесшовные порошковые проволоки, мостовые конструкции, трубопроводы, технология сварки, металл шва, механические свойства

С 2005 г. группа предприятий ИТС в тесном взаимодействии с ведущими отраслевыми институтами России (ЦНИИС НИЦ «Мосты» и ООО «Институт ВНИИСТ») и разработчиками и производителями порошковых проволок (фирмой «Drahtzug Stein», Германия и ее украинским партнером ООО «АРКСЭЛ») начала исследования и эксперименты по созданию технологии сварки стыковых швов в монтажных условиях с целью разработки технологии сварки для таких объектов, как нефтегазовый комплекс, строительство мостов, резервуаров и др.

С учетом повышенных требований к надежности всей технологии сварки в различных климатических условиях в качестве базовых были выбраны бесшовные порошковые проволоки и сварочные выпрямители серии ВДУ, которые показали высокую надежность при сварке в судостроении и могли удовлетворять требованиям нормативной документации в указанных выше отраслях.

С применением новых сварочных установок и качественными изменениями в стабильности их работы на различных режимах, которые ранее считались неблагоприятными по технологическим соображениям, появилась необходимость разработки сварочных материалов, способных полностью реализовать новые возможности оборудования при полуавтоматической и автоматической сварке. Эти возможности включают обеспечение более стабильного перехода легирующих элементов в металл шва в широком диапазоне режимов сварки и соответственно получение тре-

буемых структуры и свойств металла швов, управление поведением сварочной ванны при сварке в различных пространственных положениях.

В работах [1, 2] подробно описаны параметры режимов механизированной сварки в защитных газах проволокой сплошного сечения с использованием традиционных сварочных выпрямителей типа ВДУ-506, ВДУ-601, ВС-600 и др. В основном речь идет о работе с проволокой сплошного сечения Св-08Г2С диаметром 1,2...1,6 мм в сочетании с защитным газом CO_2 или смесью газов 82 % $\text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$ в диапазоне токов дуги 140...450 А и напряжении на дуге 17...34 В.

Недостатком использования названной выше традиционной сварочной техники и проволоки сплошного сечения для механизированной сварки в защитных газах является сложность работы сварщика по управлению течением металла в сварочной ванне и формированию шва, особенно в пространственных положениях, повышенное разбрызгивание в области токов 180...230 А, недостаточная стабильность и управляемость сварочной дуги. При использовании порошковых проволок стабильность процесса сварки повышается, но требуется увеличение сварочного напряжения (как правило, до 27 В и более), что в сочетании с традиционными сварочными выпрямителями затрудняет сварку корневого слоя стыковых швов, вызывает перегрев свариваемого изделия и требует введения дополнительных технологических приемов (например, керамических подкладок) для формирования требуемого проплавления кромок. Для сварки на керамических подкладках приходится увеличивать зазор между свариваемыми кромками, что приводит к перерасходу присадоч-



ного материала и снижает производительность процесса сварки. Кроме того, при сварке трубных стыков сварку предпочтительно выполнять с одной стороны и применение подкладок здесь проблематично.

Для работы с порошковыми проволоками группой предприятий ИТС предложен новый для России класс сварочных выпрямителей, обеспечивающих увеличение стабильности горения дуги в области малых напряжений (14...21 В) и возможность сварки «на весу» с гарантированным проплавлением кромок и формированием обратного валика шва с благоприятной формой и плавными переходами к основному металлу. Отличие этих источников от традиционных сварочных выпрямителей заключается в том, что при коротком замыкании дугового промежутка или при снижении действующего напряжения на дуге в процессе роста капли происходит подача импульса дополнительной энергии в дуговой промежуток от отдельного встроенного источника энергии. При этом осуществляется стабилизация напряжения на дуге на участке сварочной цепи «дрессель выпрямителя — дуга». Серийно выпускаются два вида таких выпрямителей: ВД-506ДК (серия 04), у которых дополнительная энергия формируется при разряде индуктивного накопителя, и ВДУ-511, у которых дополнительная энергия формируется при разряде батарей конденсаторов.

Использование указанных выпрямителей обеспечивает серьезные технические и экономические преимущества перед сварочными установками, описанными выше. По сравнению с традиционными выпрямителями эти преимущества заключаются в том, что новые выпрямители стабильно работают во всем диапазоне токов дуги, которые необходимы сварщику для формирования гарантированного провара в различных технологических условиях, т. е. сварщик может выбирать режим сварки, исходя из условий получения максимальной производительности процесса, которую допускает конструкция сварного соединения. Кроме того, у этих выпрямителей высокая скорость отработки динамических процессов в цепи прохождения сварочного тока, что обеспечивает эффективную сварку порошковыми проволоками на токах до 500 А и возможность регулирования напряжения на дуге в широких пределах. Все это позволяет сварщику производить сварку как корневого, так и заполняющих слоев шва без риска появления дефектов сплавления и с гарантией благоприятного формирования обратного валика при односторонней сварке «на весу».

Сочетание технологических возможностей выпрямителей ВД-506ДК и ВДУ-511 с особенностями переноса металла и формирования шва при использовании порошковых проволок открыло новые возможности для создания технологии

сварки стыковых швов трубопроводов и мостовых конструкций в монтажных условиях со свободным формированием.

Как известно, имеется большое разнообразие типов порошковых проволок по виду сечения и технологии формирования оболочки. Например, бесшовные порошковые проволоки (Drahtzug Stein, FILEUR, Nittetsu), изготавливаемые прокаткой и волочением заранее сваренной и заполненной порошком трубы, имеют большое количество технологических переделов, поэтому являются более дорогостоящими, чем проволоки с негерметичным продольным швом. Вместе с тем бесшовные порошковые проволоки допускают нанесение на поверхность медных или других покрытий, улучшающих электрический контакт поверхности проволоки с токоподводящим мунштуком, и обеспечивают низкое содержание диффузионно-подвижного водорода в металле сварных швов, что важно при сварке ответственных соединений из сталей повышенной прочности.

Технология производства различных типов проволок влияет на специфику их применения. Для сварки стыковых швов трубопроводов и мостовых конструкций в монтажных условиях в качестве базовой нами была выбрана бесшовная порошковая проволока с двумя типами флюсового наполнителя, соответственно проволока с металлпорошковым и рутиловым сердечником.

Металлопорошковая проволока имеет очень малую долю флюсовых добавок (до 0,5 %) и в процессе сварки не оставляет на поверхности шва шлаковой корки. Это позволяет с успехом использовать ее для сварки «на весу» корня стыковых швов с гарантированным проваром и отличным формированием обратного валика шва, сваривать заполняющие слои без зачистки шлака в промежутках между проходами, минимизировать риски появления шлаковых включений в корне и шве в целом.

Металлопорошковые проволоки POWER BRIDGE 50M и POWER BRIDGE 60M разработаны ЗАО НПП «ИТС» (С.-Петербург), фирмой «Drahtzug Stein» (Германия) и ОАО ЦНИИС НИЦ «Мосты» на базе серийной металлопорошковой проволоки MEGAFIL 710M специально для механизированной сварки в защитных газах в климатических условиях России в сочетании с выпрямителями ВД-506ДК и ВДУ-511. Эти выпрямители обеспечивают три специфических режима переноса электродного металла — «короткой дугой» (процесс ВКЗ с вынужденными короткими замыканиями), «средней дугой» (захоленная струя) и «длинной дугой» (струйный перенос электродного металла) [1–3]. Эти проволоки выпускаются в Германии на фирме «Drahtzug Stein» и отличаются от прототипа MEGAFIL 710M дополнительным микролегированием титаном и ни-

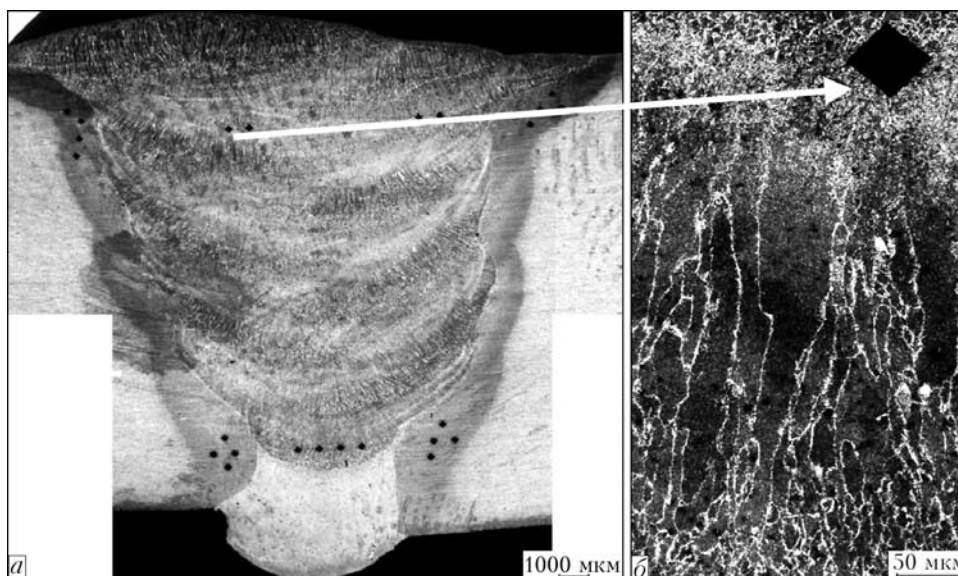


Рис. 1. Макро- (а) и микрошлиф (б) многослойного сварного соединения, выполненного металлопорошковой проволокой POWER BRIDGE 60M (наблюдается подавление роста кристаллитов на начальной стадии их роста)

кем через металлопорошковый сердечник, оптимизацией содержания марганца, кремния и соотношением между ними, ограничением содержания серы и фосфора до 0,010%. При разработке новых проволок были также учтены особенности переноса электродных капель в области короткой сварочной дуги, «захожденной» струи и «длинной дуги» [1].

При использовании выпрямителей ВД-506ДК и металлопорошковой проволоки типа POWER BRIDGE диаметром 1,2 или 1,6 мм возможна сварка в диапазоне токов 250...480 А при напряжении 22...28 В. Производительность процесса достигает 8 кг/ч в результате возможности увеличения сварочного тока без ухудшения качества сварного соединения. Сварка возможна как в смеси газов, так и в чистом CO_2 . Процесс сварки стабилен во всех пространственных положениях, разбрызгивание электродного металла незначительно, сварщик легко управляет течением металла в сварочной ванне и формированием шва.

Микролегирование является очень важной особенностью металлопорошковой проволоки. В сочетании с оптимальным содержанием традиционных раскислителей сварочной ванны кремния и марганца микролегирование позволяет при охлаждении сварочной ванны обеспечивать наличие многих центров кристаллизации, что дезориентирует направленный рост дендритов и уменьшает их размер. Это приводит к образованию благоприятной мелкозернистой структуры шва и повышает его эксплуатационные характеристики, в частности пластичность и ударную вязкость при температурах до -60°C без снижения прочности.

Существует множество элементов (титан, бор, ванадий и др.), применяемых для микролегирования. При создании проволок POWER BRIDGE

для этой цели использован титан в сочетании с никелем. Наличие дозированного количества титана способствует образованию игольчатого феррита внутри зерен, подавляет выделение первичного феррита по границам зерен. При этом содержание титана в металле шва не должно превышать 0,050 %. Зародышами для формирования игольчатого феррита внутри аустенитного зерна являются в данном случае дисперсные частицы оксида титана.

На рис. 1 показан эффект измельчения структуры при использовании проволоки POWER BRIDGE 60M.

Важным фактором для эффективного действия микролегирующих добавок является обеспечение оптимальных размеров сварочной ванны путем правильного выбора напряжения на дуге и характера переноса капель электродного металла. Выпрямители ВД-506ДК, ВДУ-511 в отличие от других источников питания позволяют выполнять сварку в широком диапазоне режимов с практически неизменным размером капель электродного металла, что и обеспечивает постоянство состава наплавленного металла и его оптимальное микролегирование. В табл. 1 приведены механические свойства металла швов, сваренных порошковой проволокой POWER BRIDGE 60M с использованием различных составов окислительных защитных газов. Полученные значения свойств соответствуют требованиям технической документации для сварных мостовых конструкций из сталей 15XCHД, 15XCHДА и 10XCHДА.

Проволока POWER BRIDGE 50M используется для сварки со свободным формированием вертикальных швов резервуаров из стали 09Г2С в условиях Крайнего Севера, когда требуется обес-

Таблица 1. Механические свойства металла швов, полученных с использованием порошковой проволоки POWER BRIGE 60M

Состав защитного газа	σ_b , МПа	σ_T , МПа	KCV, Дж/см ² , при температуре		
			-40 °C	-50 °C	-60 °C
82 % Ar + 18 % CO ₂	610...650	510...570	70...90	50...65	35...45
75 % Ar + 25 % CO ₂	580...610	470...490	90...110	—	50...70
CO ₂	570...600	470...490	90...100	—	50...70

печь большую ударную вязкость при температурах до -50 °C.

Применение металлопорошковых проволок также эффективно при орбитальной сварке неповоротных стыков трубопроводов больших толщин, когда требуется увеличение ударной вязкости в корневой части шва.

Разработку порошковых проволок рутилового типа POWER PIPE 60R и POWER PIPE 90R проводили специально для автоматической орбитальной сварки в защитных газах неповоротных стыков трубопроводов из трубных сталей типа K54-K60 и K65 (X80) с использованием комплекса «ПРОТЕУС» [4]. Эти проволоки также выпускаются в Германии на фирме «Drahtzug Stein» из герметичной бесшовной трубки с флюсом внутри. От стандартной продукции они отличаются тем, что обеспечивают микролегирование шва титаном, бором и никелем, измененное соотношением марганца и кремния, ограничение содержания серы и фосфора до 0,010 %. При разработке этих проволок были скорректированы рецептуры шлаковой составляющей флюсового сердечника для исключения риска образования шлаковых включений при сварке короткой дугой и «захоженной» струей [1].

Применение порошковых проволок с рутиловым типом сердечника с негерметичным швом часто характеризуется затрудненным формированием шва при свободном его формировании в вертикальном и потолочном положениях.

При разработке порошковых проволок POWER PIPE 60R и POWER PIPE 90R доля рутилового быстрокристаллизующегося шлака была увеличена до уровня, который обеспечивает гарантированное благоприятное формирование шва без провисаний и

подтекания сварочной ванны на всем протяжении неповоротного стыка трубы.

При использовании выпрямителей ВД-506ДК и порошковых проволок рутилового типа POWER PIPE 60R (90R) диаметром 1,2 мм при сварке неповоротных стыков труб сварочный ток составляет 190...280 А при напряжении 22...27 В. Производительность процесса достигает 7 кг/ч. После сварки корневого слоя шва не более чем через 10 мин выполняется горячий проход в направлении сверху вниз, который выполняется с минимальной погонной энергией (0,5...0,6 кДж/мм²) на высокой линейной скорости 40...45 см/мин и токе дуги 190...220 А. Затем в направлении снизу вверх вы-

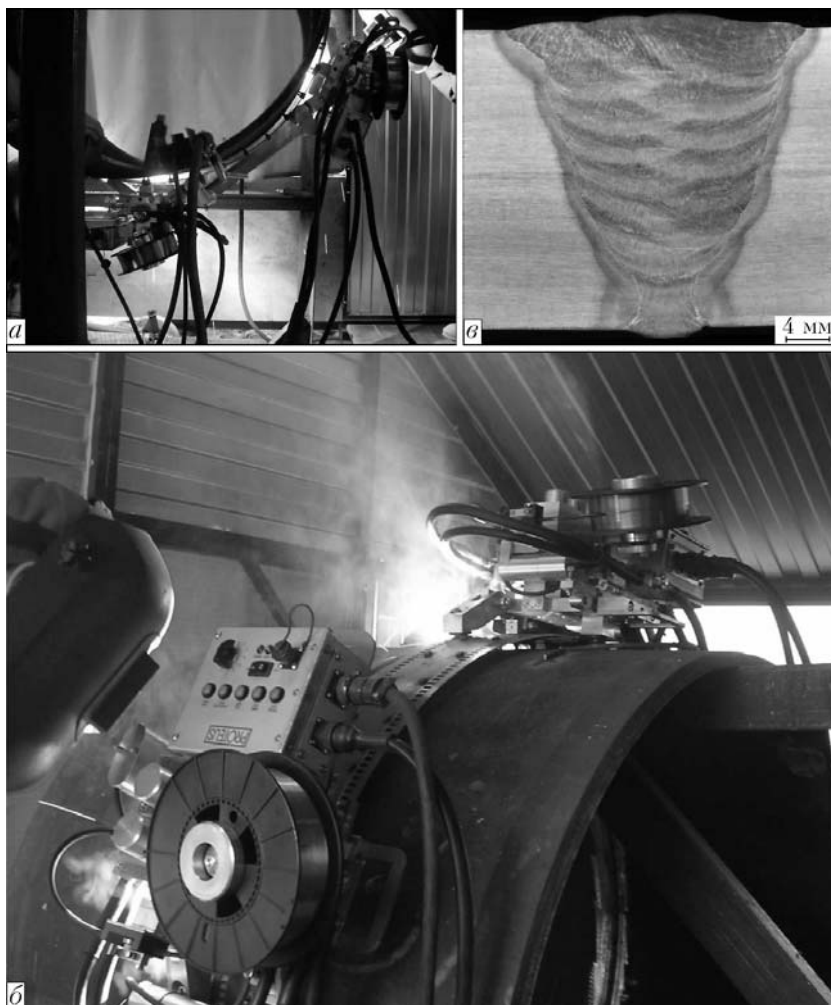


Рис. 2. Начало (а) и конец (б) процесса автоматической сварки неповоротного стыка трубопроводов на комплексе «ПРОТЕУС» и шлиф сварного соединения трубопровода из стали К65 толщиной 27,7 мм (в)



Таблица 2. Механические свойства металла швов при сварке порошковой проволокой POWER PIPE 60R

Марка стали	Состав защитного газа	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	KCV, Дж/см ² , при температуре	
					–20 °С	–40 °С
K60, K56	82 % Ar + 18 % CO ₂	600...620	490...520	25...27	120...160	90...120
K54	75 % Ar + 25 % CO ₂	560...590	480...500	25...27	100...140	80...110
K65	82 % Ar + 18 % CO ₂	650...700	570...600	21...22	—	90...110, корень ≥ 60

полняются заполняющие и облицовочные проходы. В зависимости от толщины стенки трубы и требований к ударной вязкости сварного соединения выбирается режим сварки и схема раскладки валиков. При выборе режимов сварки особое внимание обращается на то, чтобы погонная энергия не превышала 1,5 кДж/мм² (рис. 2, а).

При сварке трубных сталей типов K54 и K65 важную роль играет выбор смеси защитных газов при использовании одной сварочной проволоки POWER PIPE 60R для сварки и корня, и заполняющих слоев. Незначительное изменение окислительной способности защитного газа может повлиять на эксплуатационные характеристики металла шва. В качестве примера в табл. 2 приведены результаты механических испытаний металла стыковых швов труб, сваренных в неповоротном положении с использованием комплекса «ПРОТЕУС» и порошковой проволоки POWER PIPE 60R.

В заключение следует отметить, что разработка и серийный выпуск выпрямителей нового поколения типа ВД-506ДК, ВДУ-511, обеспечивающих стабильную работу при различных напряжениях на дуге и реализующих все известные виды каплепереноса электродного металла, позволил перейти к разработке новых технологий механизированной сварки в защитных газах многослойных стыковых швов при строительстве

мостов и прокладке трубопроводов в монтажных условиях.

Разработаны новые бесшовные металлопорошковые проволоки POWER BRIDGE 60M и POWER BRIDGE 50M для механизированной сварки конструкционных сталей типа 10XCHД, 15XCHД, 09Г2С и порошковые проволоки рутилового типа POWER PIPE 60R и POWER PIPE 90R для автоматической сварки трубных сталей в защитных газах во всех пространственных положениях.

Реализация технологических возможностей новых порошковых проволок с помощью выпрямителей ВД-506ДК, ВДУ-511 обеспечивает требуемые эксплуатационные характеристики сварных соединений, а также позволяет существенно увеличить производительность процесса сварки стыковых швов в монтажных условиях.

1. Исследование влияния режимов полуавтоматической сварки в смесях газов и вида переноса электродного металла на химический состав и механические свойства сварного соединения / М. В. Карасев, А. П. Ладыжанский, С. В. Головин и др. // Трубопровод. трансп. Теория и практика. — 2006. — № 1. — С. 48–53.
2. Новые разработки НПО «СЭЛМА-ИТС» для дуговой сварки в защитных газах / М. В. Карасев, Д. Н. Работинский, Г. В. Павленко и др. // Автомат. сварка. — 2004. — № 5. — С. 40–45.
3. Особенности современных установок для механизированной сварки плавящимся электродом в защитных газах / М. В. Карасев, Е. М. Вышемирский, В. И. Беспалов и др. // Там же. — 2004. — № 12. — С. 38–42.
4. Работинский Д. Н., Сальников М. Ю. Минимизация затрат при проведении сварочных работ на трубопроводах // Территория нефтегаз. — 2008. — № 6. — С. 134–135.

Results of development of the technology for butt welding of pipelines under field conditions are presented. Advantages of the new types of flux-cored wires with a rutile type core, used with the VD-506DK rectifier, are considered. Recommendations are given for selection of shielding gas mixtures and welding conditions.

Поступила в редакцию 11.08.2008



СЕРИЯ МАШИН «ЧАЙКА» ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ЛЕНТОЧНЫХ ПИЛ, ПРОВОЛОК И СТЕРЖНЕЙ

В. Г. ЧАЙКА, Б. И. ВОЛОХАТЮК, Д. В. ЧАЙКА, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности существующих технологий контактной стыковой сварки сопротивлением и оплавлением ленточных пил, прутков и проволоки. Отмечены современные производители машин и недостатки, присущие их использованию. Описаны преимущества новой серии машин «Чайка».

Ключевые слова: контактная сварка, сварка оплавлением, сварка сопротивлением, пилы, ленточные ножи, прутки, проволоки, недостатки машин, новая серия машин, преимущества

К настоящему времени назрела необходимость рассмотрения в печати особенностей применения машин для контактной стыковой сварки ленточных пил, проволок и стержней. Необходимость обусловлена тем, что, предлагая к реализации оборудование, продавец не предоставляет в нужной мере его характеристики, особенности и различия существующих технологий сварки. В итоге потребитель очень часто бывает не удовлетворен результатами его использования. Поэтому назрела необходимость прояснить эти вопросы.

Стыковая сварка включает нагрев торцов деталей и их осадку. По видам нагрева различают два способа контактной стыковой сварки — сопротивлением и оплавлением, которые отличаются как по сложности конструкции сварочных машин, реализующих эти технологии, так и по качеству получаемых соединений [1]. В машинах для сварки сопротивлением подвижный зажим обычно приводится в движение усилием пружины, а в машинах для сварки оплавлением — специальным приводом (электрическим, пневматическим, гидравлическим и др.), который отвечает за программу изменения скорости при оплавлении и осадке.

При контактной сварке сопротивлением детали предварительно сжимают с заданным усилием, а затем включают сварочный трансформатор. По деталям протекает сварочный ток и зона стыка постепенно нагревается до температуры, близкой к температуре плавления. Торцы деталей размягчаются и под действием приложенного усилия пружины происходит их осадка. Детали деформируются в стыке, формируется физический контакт и образуется соединение. Сварочный ток выключается в процессе осадки. Нагрев сопротивлением деталей, особенно таких, как ленточные пилы, происходит очень неравномерно из-за

случайного расположения участков контактирования, что является основной проблемой при сварке сопротивлением. Заметим, что равномерность нагрева зависит и от конструкции вторичного контура сварочной машины, при расположении зажимов лент не симметрично по отношению к оси сварочного трансформатора она ухудшается. Неравномерность нагрева возрастает с увеличением ширины свариваемых лент, и обеспечить распределенный равномерный контакт вдоль стыка лент шириной более 20 мм невозможно. В торцах лент, установленных в зажимы сварочной машины, контакт традиционно образуется с одной стороны стыка. В процессе сварки участок первоначального контактирования в течение более длительного периода времени подвергается термическому воздействию и нагревается до более высоких температур, что приводит к перегреву металла на данном участке со всеми вытекающими из этого последствиями — ростом зерен, выделением примесей по границам зерен и др. Пластические и прочностные свойства металла данной зоны снижаются, и улучшить их высоким отпусканием невозможно.

Обеспечение равномерного нагрева и соответствующего температурного поля — это только первое условие успешного процесса сварки. Второе условие включает формирование сварного соединения в процессе пластической деформации нагретых торцов во время осадки. На процесс образования сварного соединения при стыковой сварке решающее влияние оказывают оксидные пленки на торцевой поверхности деталей, которые затрудняют межатомное взаимодействие и препятствуют формированию прочных металлических связей. При сварке сопротивлением в процессе осадки происходит лишь частичное разрушение и удаление оксидов, что определяет относительно низкую пластичность получаемых соединений.

Машины для контактной стыковой сварки сопротивлением достаточно широко распространены благодаря простоте и низкой цене. Их использование оправдано в тех случаях, когда к сварным



соединениям не предъявляют жестких требований. На рынке предлагаются такие машины для сварки пил сопротивлением, как IDEAL BSS-016, BSS-025 (Германия), G20-40 GRIGGIO (Италия), SM-60 (Китай) и др., а также их копии САП-40, Г-45 (Украина), САКС-051, УСЛ-50 (Россия). Это по сути одни и те же машины, которые изначально были предназначены для сварки пил шириной до 20 мм. Вследствие малого спроса на машины из-за ограничения ширины свариваемых лент поставщики их переоборудуют на использование зажимов для сварки лент шириной 40, 50 и даже 60 мм (необоснованно с точки зрения возможностей технологии сварки сопротивлением и в ущерб качеству сварки).

При сварке оплавлением вначале на детали подают напряжение от сварочного трансформатора, а затем их сближают с заданной скоростью. В результате чего между деталями непрерывно возникают и разрушаются электрические контакты, торцы оплавляются до получения на них сплошного слоя жидкого металла. Затем скорость сближения деталей резко увеличивается, торцы смыкаются и в результате осадки образуется сварное соединение [2]. Ток выключается во время осадки деталей. Для процесса оплавления характерны высокие локальные плотности тока в контактах и малая средняя плотность тока (значительно ниже, чем при сварке сопротивлением). Механизм нагрева при оплавлении можно представить следующим образом. В процессе сближения деталей между участками поверхности торцов образуются электрические контакты. Вследствие большой плотности тока металл контактов быстро нагревается и взрывообразно разрушается. Одновременное и многократное образование и разрушение контактов происходит по всей площади поперечного сечения стыка, что обеспечивает его равномерный нагрев. В течение последующей осадки происходит удаление из торцов оксидов и формирование металлических связей в зоне соединения. Механические свойства таких соединений значительно выше, чем при сварке сопротивлением, хотя и в данном процессе есть резервы их улучшения. Повышение скорости закрытия искрового зазора и скорости осадки позволит обеспечить получение более мелкозернистой структуры и дополнительное снижение содержания оксидов в металле шва. Скорость растет с увеличением усилия осадки и уменьшением массы подвижного зажима. Однако увеличить скорость на существующем оборудовании затруднительно, так как большие усилия осадки приводят к потере устойчивости торцов лент, а масса подвижного зажима не может быть изменена. Особенно мала скорость осадки при сварке сечений, которые являются минимальными для сварочной машины (из-за малых усилий осадки). Кроме того, повы-

шение скорости крайне желательно при сварке сложносвариваемых сталей и сплавов. К таким сталям относятся пружинные и быстрорежущие стали, из которых изготовлены биметаллические пилы и на которых, как известно, получить стабильное качество сварки на существующих машинах задача трудновыполнимая.

Одной из главных характеристик процесса оплавления является его устойчивость, которая обеспечивается 3...5-кратным запасом электрической мощности машины [3]. При большой мощности даже кратковременный срыв оплавления с переходом на нагрев сопротивлением (кратковременное короткое замыкание) приводит к резкому увеличению тока и перегреву металла в зоне соединения. Поэтому разработка сварочных машин с меньшим запасом электрической мощности, обеспечивающих высокое и стабильное качество соединений, весьма актуальна.

Предлагаемые на рынке машины для контактной стыковой сварки оплавлением IDEAL BAS-050, BAS-060 и др. (Германия), FULGOR FW400, (Италия), FL50 (Россия) выполнены по традиционной однотипной схеме и в основном отличаются друг от друга мощностью и внешним видом. Машины украинских производителей Г-22 и облагороженная внешне, но ухудшенная по жесткости конструкции ее копия МС4 — тяжелые, не надежные и не отвечают настоящему времени.

Наиболее широко используются, несмотря на высокую стоимость, машины фирмы «IDEAL» (Германия), поскольку позволяют получать стабильное качество сварки. Машины доступны, так как выпускаются серийно, могут комплектоваться пирометрами для автоматического поддержания температуры при термообработке, что часто является аргументом в пользу их выбора. Хотя, по нашему мнению, этот аргумент является ошибочным и вот почему. Поскольку автоматическая система термообработки, включающая пирометр, измеряет и поддерживает температуру в точке (приблизительно на площади 1 мм²), необходимо, чтобы при термообработке температура металла по ширине ленты была одинаковой. На практике равномерный нагрев и соответственно удовлетворительная работа автоматической системы термообработки зависят от качества подвода электрического тока, которое сохраняется лишь для ограниченного количества сварок. Поэтому производитель рекомендует снимать токоподводящие губки с машины и производить их шлифовку на шлифовальном станке через каждые 10...20 сварок (в зависимости от ширины свариваемых лент). С увеличением количества сварок токоподвод недопустимо загрязняется, и равномерность нагрева ленты ухудшается (неравномерность нагрева может достигать 120 °С) (рис. 1). В этом случае машина будет выполнять термообработку стыка по

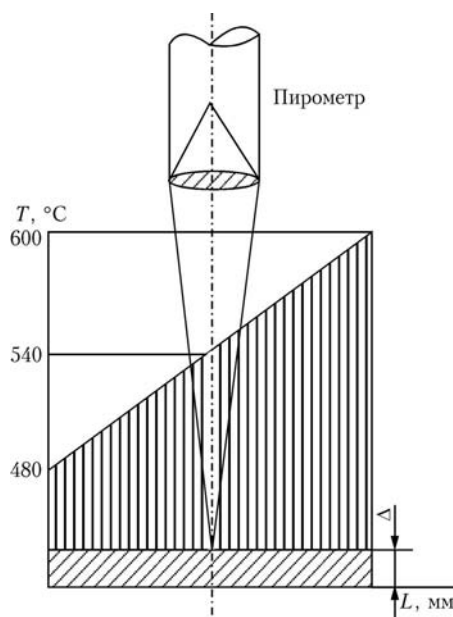


Рис. 1. Схема распределения температуры вдоль шва при термообработке (L , Δ — ширина и толщина ленты, мм)

измерениям пирометра для $540\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом реальное распределение температуры в шве не будет соответствовать показаниям пирометра, что скажется на качестве соединения. Поэтому, по нашему мнению, наиболее рационально выполнять термообработку вручную, визуально оценивая усредненную температуру стыка. В зависимости от неравномерности нагрева сварщик сможет корректировать как температуру, так и длительность нагрева. Неравномерность нагрева не должна быть очень большой, токоподводы необходимо шлифовать, но с большей периодичностью. По нашим наблюдениям, в процессе обучения сварщик достигает приемлемой квалификации уже в течение первого дня обучения.

Существующие контактные машины для сварки сопротивлением и оплавлением исчерпали свои технологические возможности по улучше-



Рис. 2. Машина МКССО-60Б для сварки ленточных пил

нию качества сварки ленточных пил и имеют следующие недостатки:

а) обеспечение устойчивости оплавления путем повышения запаса электрической мощности при срыве оплавления и кратковременных коротких замыканиях приводит к резкому увеличению тока сварки и к перегреву металла в зоне соединения;

б) расположение зажимов свариваемых деталей несимметричное по отношению к оси сварочного трансформатора не обеспечивает равномерного нагрева лент при термообработке (электромагнитное поле трансформатора смещает линии тока);

в) большие массы подвижных зажимов обуславливают малые скорости осадки при сварке лент меньших сечений и соответственно низкое качество сварки;

г) процесс оплавления сопровождается выделением большого количества частиц металла в виде брызг и аэрозоли. Поэтому во всех сварочных машинах чрезвычайно уязвимы подшипники каретки подвижного зажима и поверхности медных токоподводящих губок. Для шлифовки то-

Технические характеристики машин для контактной стыковой сварки оплавлением «Чайка»*

Машина	Максимальный первичный ток (при сварке), А	Ширина/толщина свариваемых лент, мм	Диаметры свариваемых проволок и стержней из низкоуглеродистых сталей, мм	Количество сварок (лент) в час	Время сварки, с	Напряжение сварки, В	Усилие осадки, Н	Масса, кг
МКССО-40БУ	10	$\frac{10...40}{0,6...1,3}$	1,0...8,0	30...40	0,9...2,0	2,8...3,2	200...400	105
МКССО-60	15	$\frac{20...60}{0,7...1,3}$	1,5...9,0	30...40	1,0...2,0	2,8...3,4	200...700	105
МКССО-60Б	15	$\frac{10...60}{0,6...1,3}$	1,5...9,0	30...40	1,0...2,2	2,8...3,4	200...700	105
МКССО-80	20	$\frac{30...80}{0,8...1,2}$	3,5...12,0	10...40	1,5...2,5	2,9...3,8	400...1200	125

* Во всех представленных машинах первичное напряжение сети 380 В, охлаждение водяное автономное, регулировка термообработки плавная, габаритные размеры 280×540×430 мм.



коподводов необходимо их снятие со сварочной машины.

С учетом всех перечисленных недостатков была разработана и внедрена в производство серия машин для стыковой сварки оплавлением [4]. Основные особенности разработанных машин следующие:

1) привод оплавления пружинно-гидравлический (без гидростанции). Привод осадки пружинный с динамической регулировкой усилия непосредственно в процессе осадки;

2) максимальная (заложенная в конструкцию) скорость при закрытии искрового зазора и в процессе осадки при сварке всех сечений на всех режимах сварки;

3) каретка подвижного зажима не имеет трущихся частей (не имеет подшипников) и не требует специального обслуживания в процессе эксплуатации машины;

4) зажимы лент раскрываются таким образом, что обеспечивают полный доступ к токоподводящим губкам для их очистки после каждой сварки;

5) взвод силовой пружины, управление циклом сварки, регулировка температуры при термообработке, т.е. полное управление машиной осуществляется одним рычагом (нет кнопок управления);

6) трансформатор сконструирован с учетом обеспечения устойчивого оплавления при мини-

мальном запасе мощности, потери мощности от магнитных потоков рассеяния сведены к минимуму.

Технические характеристики машин для контактной стыковой сварки оплавлением «Чайка» приведены в таблице, внешний вид машины МКССО-60Б — на рис. 2. Разработанное оборудование запатентовано и сертифицировано, имеет высокую надежность и обеспечивает стабильное качество сварных соединений как прутков и проволок, так и ленточных пил. В процессе ее эксплуатации установлено, что процент брака при сварке биметаллических пил фирмы FENES, ВАНСО и EBERLE по сравнению со сваркой на машине BAS-050 снизился в четыре раза и составил 0,5 %.

1. Орлов Б. Д., Чакалев А. А., Дмитриев А. Л. Технология и оборудование контактной сварки: Учебник / Под общ. ред. Б. Д. Орлова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1986. — 352 с.
2. Кучук-Яценко С. И., Лебедев В. К. Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1976. — 328 с.
3. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для контактной сварки. Элементы теории. — М.: Машиностроение, 1969. — 440 с.
4. Пат. 77255. Машина для контактной стыковой сварки оплавлением «ЧАЙКА» / В. Г. Чайка. — Оpubл. 15.02.2006; Бюл. № 11.

Peculiarities of available technologies for resistance and flash butt welding of band saws, rods and wires are considered. Current manufacturers of machines and characteristic drawbacks of their application are noted. Advantages of a new series of the «Chaika» machines are described.

Поступила в редакцию 17.07.2008

НОВАЯ КНИГА

Троицкий В. А. Пособие по радиографии сварных соединений. — Киев: Феникс, 2008. — 312 с.

В пособии обобщен практический опыт специалистов Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины в области радиационного контроля, содержатся рекомендации, необходимые при повышении квалификации специалистов, выполняющих радиографический контроль. Рассмотрены различные вариации цифровой радиографии, приведены сведения о новых стандартах, гармонизированных с европейскими, даны рекомендации по выбору источников излучения, выполнен анализ многочисленных излучателей, применяемых для контроля качества сварных соединений. Даны понятия автоматизации процесса расшифровки радиограмм, цифровой радиографии, классности сварных соединений и критерии их балльной оценки.

Приведены примеры характерных радиограмм, результаты их расшифровки, а также вопросы для самоподготовки и рекомендуемая литература.

Настоящее пособие будет полезно дефектоскопистам, специализирующимся в области радиографии, в их практической работе.





ИЗОБРЕТЕНИЯ СТРАН МИРА*

Сварочная проволока сплошного сечения из ферритной нержавеющей стали и способ изготовления проволоки. Проволока содержит 11...20 % хрома; 0,02...2,0 % алюминия; 0,2...1,0 % титана; до 0,03 % углерода; до 3 % кремния; до 3 % марганца; до 2 % никеля; до 3 % молибдена; до 1 % кобальта; до 2 % меди; до 0,02 % кислорода; до 0,04 % азота; тантал и/или ниобий, масса которых в 8 раз больше массы углерода и азота; 0...0,04 % фосфора; 0...0,2 % серы; 0...0,5 % ванадия; 0...0,05 % вольфрама; 0...0,02 % циркония; 0...0,02 % бора; 0...0,005 % кальция; 0...0,005 % магния; остальное — железо. Патент Великобритании 2422617. K. Masaaki, N. Satoru, A. Yukio et al. (Nippon Welding Rod Co, Ltd.).

Способ повышения устойчивости и несущей способности детали по технологии сварки трением вращающимся инструментом. Деталь имеет корпус и фланец, который подвергается воздействию нагрузки. Для повышения устойчивости и несущей способности фланца в нем вырезают конусное отверстие и вставляют в него конусный торец цилиндрической детали. Затем деталь прижимают к стенке отверстия и приводят во вращение, используя ее как инструмент для сварки трением. В результате цилиндрическая деталь приваривается к фланцу и образует дополнительную опору, повышающую устойчивость и воспринимающую нагрузку на фланец. Патент Германии 10337971. K. U. Kainer, N. Hort, H. Dieringa et al. (Gkss-Forschungszentrum Guthacht GmbH).

Способ и устройство для лазерной гибридной сварки. Согласно способу гибридной сварки на зону сварного шва между двумя частями изделия воздействуют по меньшей мере одним лазерным лучом и одной электрической дугой и во время сварочного процесса осуществляют оптимальное перекрытие зоны сварного шва лазерным лучом в зависимости от контура и реальной геометрии сварного шва. Регулирование оптимального перекрытия зоны сварного шва лазерным лучом осуществляют путем смещения блока фокусирования лазерного луча и при необходимости источника лазерного излучения и/или путем перестановки блока фокусирования лазерного луча при использовании сварочной горелки, расположенной относительно частей изделия в оптимальной позиции. Патент Германии 10304709. C. Draser, P. Nausch (Daimlerchrysler Ag).

Способ сварки рельсовых стыков. Изобретение относится к области сварки, а именно к сварке рельсов железнодорожного пути. На кромках рельсов или кромке одного из рельсов выполняют поперечный разрез по вертикальной плоскости от головки до начала подошвы рельса. Выполняют горизонтальный разрез по торцевой поверхности рельсов или рельса перпендикулярно по отношению к ранее произведенному разрезу и снимают на торцевой поверхности подошвы фаску под углом 45° с образованием у основания подошвы притупления. Устанавливают рельсы с необходимым технологическим зазором. Вводят внутрь зазора сварочную проволоку вместе с изолированным концевым наконечником электрододержателя сварочного полуавтомата. Осуществляют электродугую сварку непрерывно по всей высоте рельса с использованием боковых формирующих накладок-кристаллизаторов в зоне сварки на сварочном токе, обеспечивающих образование жидкой ванны во всем объеме технологического

зазора. Жидкую ванну в корне шва получают за счет расплавления кромок основного металла рельсов. Повышаются механические свойства сварного шва и производительность процесса, а также облегчается труд сварщиков. Патент России 2304495. Г. Г. Воробьев, Е. С. Куликов, А. Н. Пурехов и др.

Присадочный материал на основе никеля. Изобретение относится к сплавам на основе никеля в качестве присадочного материала в сварных конструкциях в виде «лапши» или в виде сварочной проволоки. Присадочный материал на основе никеля для сварки высокопрочных никелевых сплавов содержит, мас. %: 0,02...0,05 углерода; 10...18 хрома; 4...6 молибдена; 10...18 кобальта; 2...6 ниобия; 0,5...1,3 алюминия; 0,5...5 вольфрама; 0,3...1,0 титана; 0,5...1,0 циркония; 0,02...0,04 магния; 0,02...0,05 лантана; остальное — никель. Повышается прочность сварного соединения при комнатной и повышенных температурах, жаропрочности сварных соединений. Повышаются ресурс и надежность сварных конструкций горячего тракта двигателей. Патент России 2304499. В. И. Лукин, Л. Л. Старова, В. Г. Ковальчук и др. (ФГУП «ВИАМ»).

Флюс для электродуговой сварки. Изобретение может быть использовано при механической сварке с повышенной скоростью для восстановления изношенных деталей, работающих в условиях абразивного износа. Флюс для электродуговой сварки содержит, мас. %: 28...32 SiO₂; 28...32 MnO; 19...23 MgO; 9...11 CaO; 4...6 CaF₂. Отношение содержания основных и кислых оксидов выбрано из условия получения основности флюса 1,40...1,48. Содержание Al₂O₃, Fe₂O₃, S и P не должно превышать соответственно 2; 1,5; 0,2 и 0,2 %. Использование предлагаемого флюса позволяет наплавлять детали из конструкционных сталей с высокими качественными показателями: износостойкость наплавленных поверхностей составляет 156 % по отношению к ненаплавленным. Патент России 2304500. В. К. Петряков, М. В. Ерюшев, А. Л. Нестеров и др. (ФГОУ ВПО «Саратовский ГТУ»).

Способ и машина дуговой сварки, оснащенная устройством местного охлаждения участков сварного шва. Машина содержит горелку, которая соединяет смежные кромки листовых заготовок с помощью сварочной проволоки, а также устройство, которое направляет охлаждающую среду на свариваемые заготовки с боковых сторон горелки, охлаждая участки заготовок, подверженные тепловому воздействию, расположенные с наружных сторон сварочной ванны. Конструкция машины позволяет повысить механические свойства сварного соединения, например прочность и вязкость разрушения на излом, при изготовлении сварных сосудов, работающих под давлением. Повышение прочностных характеристик достигается за счет подавления образования карбидов в зоне теплового воздействия, в результате чего исключается последующая термообработка сварного сосуда. Патент США 7091447. K. I. Sung, I. T. Eun (Korea Power Engineering Co., Inc.).

Способ сварки трением вращающимся инструментом и сварной узел, полученный этим способом. Соединяемые кромки заготовок, изготовленных из материалов, имеющих различные физические и/или механические свойства, вводят в контакт, внедряют рабочую часть вращающегося инструмента в материал из одной заготовки рядом со стыком и перемещают инструмент параллельно стыку. При этом рабочая часть инструмента не внедряется в материал другой заготовки, в то время как заплечик вращающегося инструмента

*Приведены сведения о патентах, опубликованных в реферативном журнале «Изобретения стран мира» № 8, 2008 г.



входит в контакт с поверхностью этой заготовки. В процессе сварки пластифицируется только материал первой заготовки. Пластифицируемый материал первой заготовки прилагает давление к кромке второй заготовки в условиях высокой температуры, в результате чего в зоне стыка протекают процессы диффузии между атомами материалов заготовок. После охлаждения между заготовками образуется диффузионное сварное соединение. Патент США 7097091. Н. Okamura, K. Aota, M. Sakamoto (Hitachi, Ltd.).

Способ и станок для лазерной сварки с предварительным подогревом свариваемых деталей. Станок содержит лазер, генерирующий излучение, направляемое на свариваемые детали. Перед сваркой лазер устанавливают таким образом, что точка фокуса лазерного излучения расположена выше поверхности деталей, а затем сканируют поверхность деталей расфокусированным лазерным лучом, предварительно нагревая детали. После этого лазер опускают вниз, в результате чего точка фокуса переносится на поверхность деталей, и сваривают детали, не изменяя мощность лазера. Способ может использоваться для сварки ручной горелкой, в которой смонтирован лазер на аллюминиевом гранате, легированном неодимом. Свариваемыми деталями могут быть жаропрочные детали газотурбинного двигателя. Патент США 7094988. C. R. Taylor (Honeywell International, Inc.).

Способ анализа напряжений в конструкции. Для определения структурных напряжений в зоне усталостных деформаций конструкции совместно применяют средства моделирования, расчета и непосредственных измерений. Определяют значения узловых сил и смещений в зоне усталости или равновесные эквивалентные простые напряженные состояния в зоне усталости, которые соответствуют элементарной строительной механике. Определение не зависит от размера ячейки и, в частности, хорошо подходит для конструкций с усталостью в сварных соединениях. Патент США 7089124. D. Pingcha, Z. Jinmiao, H. J. Kyun (Battelle Memorial Institute).

Порошковая проволока для дуговой сварки на постоянном токе прямой полярности. Проволока содержит стальную оболочку, заполненную порошками графита и соединений калия, которые стабилизируют дугу при сварке на постоянном токе прямой полярности. В частности, сердцевина проволоки содержит порошок графита и порошок сложной соли титановой кислоты, содержащей калий и марганец (K_2MnTiO_4), а также порошок сульфата калия (K_2SO_4). Проволока уменьшает разбрызгивание расплавленного металла и коробление сварного шва при скоростной сварке. Патент США 7087860. A. Nikodym, S. Barhorst (Hobart Brothers Company).

Активный флюс для дуговой сварки неплавящимся электродом в среде защитного газа. Флюс содержит оксид переходного металла из IVa группы периодической системы элементов за исключением Hf или смесь чистого переходного металла и оксида переходного металла из группы VIa периодической системы за исключением W. Атомы кислорода в смеси составляют 24...50 %, в то время как атомы металла

находятся в пределах 50...76 %. Для обеспечения провара сварного шва содержание атомов кислорода не должно быть менее 24 %. Однако высокое содержание атомов кислорода вызывает повышенную конвекцию ванны расплава. Для подавления влияния повышенного содержания атомов кислорода необходимо не менее 50 % атомов металла. Повышенное содержание атомов металла также является источником конвекции в ванне расплавленного металла, поэтому содержание атомов металла не должно превышать 76 %. Патент Японии 3810924. T. Okaniwa, W. Tani, M. Nakano et al. (Nof Corp.).

Сварочная проволока и способ ее изготовления. Поверхность проволоки покрывают смазочным маслом, температура застывания которого $\leq 5^\circ\text{C}$, а иодное число ≤ 40 . В качестве смазочного масла предпочтительно использовать синтетическое эфирное масло, имеющее структуру эфира неопентилполиола. Масло также содержит спирт, выбираемый из группы, в которую входят неопентилгликоль, триметилпропан, пентаэритрит, и насыщенную жирную кислоту с 12...14 атомами углерода. В качестве смазки также применяют твердую смазку, выбираемую из группы соединений, содержащую MoS_2 , WS_2 , политетрафторэтилен и графит. Количество твердой смазки составляет 0,01...2 г на 10 кг проволоки. Количество жидкого масла находится в пределах 0,1...1,5 г на 10 кг проволоки. Такая проволока легко подается в зону сварки в широком интервале температур окружающей среды. Патент Японии 3813360. S. Inone, T. Ono, K. Ishikura et al. (Nippon Steel Welding ProdEnd).

Флюс для мягкой пайки. Флюс содержит смолу, модифицированную канифолью, типа смолы натурального каучука, гидрированной канифоли, полимеризованной смолы и модифицированной смолы; соль галоидоводородной кислоты и органическую кислоту. В качестве разбавителя флюс содержит моногексилевый эфир диэтиленгликоля, дибутиловый эфир диэтиленгликоля и α -терпинол. Содержание эфира жирной кислоты в полиглицерине находится в пределах 0,1...30 % массы флюса, более предпочтительно, 0,5...20 %. Флюс хорошо смешивается с порошком припоя при образовании паяльной пасты. Флюс, остающийся после пайки, не образует трещин и обладает гибкостью при сильном изменении температуры. Патент Японии 3812859. E. Asami, T. Takamiyagi (Nippon Hada Kk).

Порошковая проволока для сварки нержавеющей стали. Проволока состоит из наружной оболочки, изготовленной из нержавеющей стали, и флюса, заполняющего оболочку, состоящего 18...25 % массы проволоки. Флюс содержит 0,2...1,2 % SiO_2 ; 0,2...0,9 % ZrO_2 и 4,0...6,0 % TiO_2 . Титан добавляют в виде ферротитана, составляющего 0,3...0,9 % массы проволоки. Отношение масс ферротитана и металлического титана находится в пределах 20...60 — 40...80 %. Проволока, используемая при вертикальной и потолочной сварке нержавеющей стали, стабилизирует дугу и снижает разбрызгивание расплавленного металла. Патент Японии 3805602. H. Nagasaki, M. Mizumoto, D. Watanabe et al. (Nippon Steel Corp.).



По зарубажным журналам*

PRZEGŁAD SPAWALNICTWA (Польша) 2008. — № 4 (пол. яз.)

Nowacki J., Urbanski M., Zajac P. Дуговая сварка порошковой проволокой дуговых стальных сталей при изготовлении судов для транспортировки химических веществ, с. 3–10.

Klimpel A., Czuprynski A., Gorka J., Kik T., Dratwa D. Испытания технологии сваркопайки плазменной дугой прямого действия в процессе выполнения соединений солнечных коллекторов, с. 11–16.

Krawczyk S., Skorupa A. Исследования механических свойств сварных соединений ER-F при повышенных температурах, с. 21–23.

Jezierski G. Компьютерная радиография — непрямая цифровая радиография, с. 24–28.

Wegrzyn T., Szopa R., Miroslaw M. Неметаллические включения в наплавленном металле защитных электродов, используемых для сварки низкоуглеродистой и низколегированной стали, с. 29–32.

Cukrowski P., Pakos R. Оценка размеров отражателя в процессе ультразвуковых испытаний с помощью программы «DGS» (распределенная САПР) — применяемый алгоритм. Ч. 2, с. 33–38.

PRZEGŁAD SPAWALNICTWA (Польша). — 2008. — № 5 (пол. яз.)

Krzysztof Luksa K., Klimpel A. Роботизированная сварка стыковых и тавровых швов листового металла толщиной 3,0 мм из алюминий-магниевого сплава, с. 3–5.

Ambroziak A. et al. Испытания тонкостенных стальных соединений, выполненных точечной сваркой и электрозаклепками, с. 6–11.

Kaydalov A. Сварка кольцевых швов стальных труб — подготовка кромок, с. 12–16.

Iwaszko J. et al. Модификация поверхностного слоя быстрорежущих сталей, полученных методом порошковой металлургии, благодаря использованию сварочных источников питания, с. 29–35.

Jasinski W., Zawada P. Изменение микроструктуры соединений сварных железных суперсплавов IN 519 и H39WM в процессе эксплуатации, с. 36–42.

SCHWEISSEN und SCHNEIDEN (Германия) 2008. — № 4 (нем. яз.)

Новые члены правления DVS: Ф. Глюклих и Лотар Валинг, с. 177–178.

Wiesner A. Недостаток специалистов в технике соединения, с. 180–182.

Scheermann H. В мае 2008 г. сварочная выставка в Пекине и в Москве, с. 183–184.

Новая технология штамповки с заклепками для автомобиля «Ауди» (Промышленное объединение Бельгоф, г. Билефельд), с. 186–187.

Выжигание загрязнений лазером, с. 187–188.

Bach F.-W. et al. Исследование влияния шероховатости субстрата и фракций напыляемого материала для сцепляемости термически напыляемого слоя, с. 192–199.

Dilthey U. et al. Разработка недорогих сплавов на основе железа для наплавки покрытий с высокой износостойкостью, с. 200–204.

Zwoch S. et al. Разработка техники ультразвукового контроля для оценки качества приварки шпилек, с. 205–210.

Grages H. et al. Исследование деформации стальных балок путем приварки различных соединительных элементов, с. 211–215.

Peter H.-J. Индукционная пайка — проверенный способ соединения с инновационным потенциалом будущего, с. 216–221.

Новые книги и журналы, с. 221–226.

* 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).



SUDURA (Румыния) 2008. — Ан. XVIII, № 1 (рум. яз.)

Stelling K. et al. Аттестация способа гибридной сварки с помощью лазера Nd:YAG с использованием порошкового присадочного материала, с. 5–10.

Birdeanu V. Импульсная лазерная микросварка в промышленном применении, с. 12–19.

Molnar R. Компетентность или эффективность? Выбор защитных газов для дуговой сварки плавящимся электродом

в среде защитного газа с помощью технических характеристик процесса, с. 21–25.

Thurner S. Высокопроизводительная дуговая сварка плавящимся электродом в среде защитного газа — варианты для повышения производительности, с. 29–33.

TRANSACTIONS of JWRI (Япония) 2007. — Vol. 36, № 2 (англ. яз.)

Yamamoto K. et al. Цифровое моделирование поведения паров металла при ТИГ сварке в среде аргона, с. 1–4.

Kawahito Y. et al. Адаптивный контроль зазора при стыковой сварке импульсным ИАГ-лазером, с. 5–10.

Kawahito Y. et al. Исследование явлений сварки нержавеющей стали мощным волоконным лазером, с. 11–16.

Umeda J. et al. Полезное для окружающей среды повторное использование сельскохозяйственных отходов для приготовления кремнезема высокой степени чистоты из рисовых отходов, с. 17–22.

Takao Y. et al. Генерация частиц путем столкновения плазменной струи электродного типа, с. 23–28.

Kondoh K. et al. Местное появление жидкой фазы олова на поверхности порошка из сплава алюминия во время нагрева, с. 29–32.

Imai H. et al. Характеристики горячепрессованного алюминиевого сплава, полученного порошковой металлургией при использовании процесса распыления воды при активном вращении с быстрым затвердеванием порошка, с. 33–38.

Serikwa T. et al. Сравнительное исследование пленок Mg–Si, нанесенных методом распыления на постоянном и высокочастотном токе, с. 39–44.

Morks M. et al. Микроструктурные, коррозионные характеристики и микротвердость композиционных покрытий W–Ni, напыленных плазмой, с. 45–50.

Kurokawa K. et al. Образование окалины SiO₂ при высокотемпературном окислении WSi₂, с. 51–56.

Miyamoto Y. et al. Обработка трехмерных керамических устройств с помощью системы стереолитографии CAD/CAM и последовательного спекания, с. 57–60.

Kuroda T. Внутреннее трение при попадании водорода в дуплексные нержавеющие стали

Murakawa H. et al. Простая модель конечных элементов для исследования микроструктуры относительно вязкости дуплексной высокопрочной стали, с. 67–72.

Kim Y.-C. et al. Механические характеристики швов, выполненных с помощью недавно разработанной сварочной проволоки с фазовым превращением при низкой температуре, с. 73–80.

Sakino Y. et al. Остаточные напряжения в структуре и в зоне угловых швов на сталях после лазерной проковки, с. 81–86.

EL-Sheikhy et al. Явление ветвления трещины в циркониевом покрытии, напыленном плазмой, с. 87–94.

Setuhara Y. et al. Разработка плазменного реактора с большой площадью шкалы измерения с помощью модулей низкоиндуктивной антенны для гигантской электронной обработки, с. 95–98.

Ohara S. et al. Синтез керамических композиционных наночастиц с помощью пиролиза пульверизованного слоя, с. 99–101.

TWI CONNECT (Англия) 2008. — Issue 153. March /April (англ. яз.)

Композиционные материалы находят новое применение, с. 1.

Расчет выделения углерода в процессе производства, с. 3.

Проектирование. Ч. 4, с. 4–5.

Недорогая технология бессвинцовой пайки позволяет повысить конкурентоспособность малых или средних предприятий, с. 8.

VARILNA TEHNIKA (Словения) 2007. — Let. 56, № 4 (слов. яз.)

Lakota I. et al. Характеристики и свойства новых порошковых проволок, с. 21–28.

Uran M. et al. Описание технологии контактной точечной сварки узлов автомобильных кузовов, с. 29–37.

Quitino L. et al. Обзор международной системы обучения и аттестации персонала в области сварки, с. 39–47.

WELDING and CUTTING (Германия) 2008. — № 2 (англ. яз.)

Недорогая технология бессвинцовой пайки, позволяющая повысить конкурентоспособность европейских предприятий, с. 70.

Шланг «Rolliner» для подачи проволоки позволяет снизить трение и износ, с. 73–74.

Преимущества оцинкованной ленты оцинкованных труб следующего поколения, с. 75–77.

Термическое напыление — хорошее дополнение к твердому хромовому покрытию, с. 82–84.

Reisgen U., Dilthey U., Aretov I. Повышение стойкости к горячим трещинам в процессе сварки сплавов на основе

никеля с применением процессов дуговой сварки под флюсом холодной проволокой, с. 90–98.

Ciszewski C. Новая экспериментальная концепция соединения соединений чугуна со сплавом меди (85 %) и чугуна с алюминием с помощью сварки трением, механические и пластические свойства таких соединений, с. 104–110.

Bernhard Wielage B. et al. Исследования по высокоскоростному термическому напылению с подачей проволоки, с. 116–120.



АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ (ПО ИТОГАМ РАБОТЫ РАСШИРЕННОГО СОБРАНИЯ АССОЦИАЦИИ «ЭЛЕКТРОД» ПРЕДПРИЯТИЙ СТРАН СНГ)

3–5 июня 2008 г. Ассоциация «Электрод предприятий стран СНГ» совместно с ОАО «Межгосметиз-Мценск» провели в г. Мценске собрание ассоциации с обсуждением актуальных проблем производства сварочных материалов на предприятиях СНГ. В работе конференции приняли участие руководители и главные специалисты государственных и акционерных предприятий, известные ученые, технологи, конструкторы и другие специалисты, работающие в области производства и потребления сварочных материалов. 52 участника представляли 33 предприятия и организации.

Ниже тезисно представлены основные выступления, прозвучавшие на собрании.

В. П. Костюченко (ген. директор ОАО «Межгосметиз-Мценск») вначале отметил актуальность и полезность собраний, которые периодически организует ассоциация, необходимость коллективного обсуждения и выработки рекомендаций по повышению эффективности производства. Затем остановился на состоянии производства сварочных материалов на своем предприятии, которому в 2009 г. исполнится 10 лет. Оно производит порядка 250 т электродов в месяц. Номенклатура включает около

100 марок, в том числе электродов общего назначения, высоколегированных наплавочных, для сварки цветных металлов и др. С 1999 г. предприятие ежегодно удваивает объемы производства (в 2007 г. произведено продукции на 600 млн руб.). Спрос на продукцию растет и производство продукции будет развиваться, улучшая качество. Большие перспективы роста потребления электродов намечаются в энергетике. Основную долю производства сегодня все же составляет сварочная омедненная проволока.

В последние два года освоено производство проволок больших диаметров (итальянские линии). Проволоки диаметром 4 и 5 мм потребляют машиностроительные заводы и трубосварочные производства. ОАО «Межгосметиз» поставляет проволоки на все трубосварочные заводы России. Это престижно и в то же время очень ответственная задача, так как требует обеспечения самого высокого качества проволок. Предприятие этому аспекту уделяет постоянное внимание. С 2002 г. производство сварочных материалов сертифицировано по ISO 9000. Имеются сертификаты НАКСа, Укрсепроза, Беларуси, Речного и Морского регистра. На ряд



Участники конференции



проволок имеются сертификаты DNW и Ллойд-регистра.

В 2008 г. освоено производство проволоки с полированной поверхностью (неомедненной), которую ранее на рынок предложил «ЭСАБ». При этом катанка используется молдавского производства. Она позволяет производить проволоки по современной технологии (без термообработки и травления для удаления окалины). В перспективе освоение производства керамических флюсов для трубной отрасли. Предполагается приобретение линий у западных фирм. Есть планы и по освоению производства порошковых проволок. Необходимо наряду с развитием производства стремиться к обеспечению ее рентабельности. С этой целью продолжена закупка новых итальянских линий с тем, чтобы в 2008–2009 гг. удвоить производство омедненной проволоки. Новые направления по флюсам и порошковым проволокам будут развиваться уже в 2009 г., расширяя линейку нашего присутствия на рынке сварочных материалов.

И. В. Игнатченко (исполн. директор Ассоциации «Электрод», г. Киев) отметил, что одним из важнейших на сегодня направлений деятельности ассоциации является производство конкурентоспособных сварочных материалов, соответствующих требованиям ВТО. Только так можно защитить наш рынок от вторжения продукции зарубежных стран. Причем требования ВТО коснутся не только сварочных материалов, но и поставщиков сырьевых компонентов. Далее были проанализированы результаты производства сварочных материалов в 2007 г. Объемы выпуска материалов ежегодно увеличиваются и их рост зависит от производства промышленной продукции стали и проката в России и Украине, о чем свидетельствуют следующие данные. В 2007 г. металлурги России и Украины произвели 113,9 млн т стали, 94,49 млн т проката, из них Россия — 72,39 млн т стали и 59,63 млн т проката. Увеличение по сравнению с 2006 г. у стали составило 2, у проката — 2,8 %. Украина выпустила 41,61 млн т стали, 34,86 млн т проката. Увеличение стали составило 1,5, проката — 2,5 %. Общий объем производства покрытых сварочных электродов в 2007 г. в странах СНГ составил 345,0 тыс. т, из них 77,3 % приходится на предприятия Российской Федерации, 17,1 % на Украину и 5,6 % на остальные страны СНГ. В прошлом году общий объем производства электродов увеличился по сравнению с 2006 г. на 6,6 %, в том числе в Российской Федерации на 4,3 %, а в Украине на 10 % объем производства электродов по назначению с рутильменитовым покрытием составил 203,8 тыс. т, с основным — 119,3 тыс. т. Выпуск электродов специального назначения для сварки высоколегированных сталей и цветных металлов составил 21,73 тыс. т. В Российской Федерации изготовлено электродов 266,6 тыс. т, в том числе с рутильменитовым пок-

рытием 149,2 тыс. т, с основным 96,6 тыс. т, специальных 20,8 тыс. т, в Украине 52,2 тыс. т, в том числе с рутильменитовым покрытием 37,8 тыс. т, с основным 20,6 тыс. т, специальных электродов 0,845 тыс. т. Наметила положительная тенденция в увеличении производства электродов малого и среднего диаметра от 2,0 до 4,0 мм. Их выпуск суммарно составил 304,4 тыс. т, увеличение по сравнению с 2006 г. составило 9 %. Электродов диаметром 5,0 и 6,0 мм изготовлено соответственно 40,6 и 0,8 тыс. т. В результате произведено 9,1 % электродов до 5,0 мм.

Общий объем выпуска легированной сварочной проволоки диаметром до 2,0 мм для механизированной сварки в защитных газах составил 53,2 тыс. т, из них диаметром 0,8...1,4 мм — 18,8 тыс. т.

В Российской Федерации изготовлено 39,6 тыс. т, из нее 0,8...1,4 мм — 18,8 тыс. т, а в Украине 13,6 тыс. т, из них диаметром 0,8...1,4 мм — 5,8 тыс. т.

По сравнению с 2006 г. общий объем выпуска сварочной проволоки увеличился на 14 %. В Российской Федерации на 11,3, а в Украине на 20 %, особенно следует подчеркнуть положительный рост производства сварочной омедненной проволоки, которая соответствует мировым стандартам и поставляется в нужном количестве на шпулях и катушках с рядной намоткой массой от 3 до 15 кг. Основными поставщиками такой проволоки являются предприятия-члены ассоциации: ОАО «Межгосметиз-Мценск», Череповецкий, Орловский и Волгоградский заводы, ОАО «Северстальметиз» и ОАО «ММК-Метиз». Сварочной и наплавочной порошковых проволок в 2007 г. изготовлено 4823,7 т, из них сварочной 2299,6 т, наплавочной 2500,2 т, исключая 1500 т проволоки для внепечной обработки. Увеличение производства порошковой проволоки в России по сравнению с 2006 г. составило 32 %, а в Украине, наоборот, уменьшилось на 23 %.

Сварочных флюсов произведено в 2007 г. 37,817 тыс. т, в том числе в Российской Федерации 8,6 тыс. т из них 7300 т керамического флюса, в Украине 29,154 тыс. т.

Общий объем производства сварочного флюса по сравнению с 2006 г. уменьшился на 2,3 %.

Объем производства сварочного флюса по сравнению с 2006 г. уменьшился на 1 %, а в Украине увеличился на 3 %.

В 2007 г. общий объем производства сварочных материалов составил 440,8 тыс. т, в том числе для механизированной сварки 113,7 тыс. т. На долю выпуска сварочных материалов для механизированной сварки приходится 26 % общего выпуска.

Таким образом, по-прежнему основную долю сварочных работ в странах СНГ осуществляют покрытыми электродами. Но, несмотря на существующий уровень механизированной сварки, положение



начало изменяться в лучшую сторону. В настоящее время в наших странах имеется достаточно производственных мощностей по производству сварочных материалов как для ручной, так и механизированной сварки. Однако по-прежнему из-за медленного роста выпуска промышленной продукции существующие мощности не загружены. К сожалению, продолжают создаваться новые производства по изготовлению электродов без учета их необходимости.

3. А. Сидлин (техн. директор ООО «Техпром», г. Москва) остановился на особенностях производства и поставки сырьевых материалов. Ситуация с качеством, ценами и объемами поставок он рассмотрел на региональном и международном уровне. Истощаются мировые запасы сырья, выработаны месторождения, которые в прошлом рассматривались как моноведущие. Изменилась стратегия сырьевых производителей. Раньше основной упор делался на извлечении целевого продукта, а сопутствующие материалы оставались в хвостах, отвалах, отходах. Сейчас стали извлекать из них сопутствующие материалы. Известно, что один и тот же материал разных месторождений ведет себя по-разному в технологии электродного производства и влияет на качество конечной продукции. Требования производителей сварочных материалов к сырью значительно более жесткие, а объемы потребления существенно ниже, чем в других отраслях производства. Сегодня в металлургических вузах появилась новая дисциплина — сырьевая база металлургического производства и ее влияние на свойства металла. Сегодня поставки и цены на марганцевые материалы повысились, а вторично добывающих удорожали. По подтвержденным данным запасы марганцевых руд в России составляют всего 2,8 % общемировых запасов, причем при среднем содержании в руде около 20 % марганца. В Украине сосредоточено 42,6 % мировых запасов марганцевых руд. Содержание марганца в руде Габона — около 50 % при запасах около 4,5 % мировых. Китайская марганцевая руда — это 2,5 % подтвержденных запасов при 50%-м содержании марганца в руде.

Если проанализировать цифры ведущих стран, где запасы марганца более 2,5 %, то сегодня в Украине сосредоточены основные месторождения. Однако они уже во многом исчерпаны, требуют больших вложений, а сегодня есть лишь желание снять сливки и немедленно. Поэтому нельзя ожидать, что трудности с ферромарганцем, ферросиликомарганцем, марганцем металлическим, которые есть сегодня, завтра станут меньшими. Это объективные причины. Другой вопрос, что ценовая политика поставщика различная.

Если говорить о сырьевой зависимости стран от других поставок, то по целому ряду материалов, например, российские заводы существенно зависят сегодня не только от Украины, но и от ряда других

стран. Это и страны ближнего зарубежья, ранее входившие в состав СССР. Сегодня уже в реально значимых объемах на рынок России поступают материалы из дальнего зарубежья — Бразилии, Китая. Это и дальше будет наблюдаться, так как цены на них вполне приближаются к ценам, которые сегодня есть на нашем рынке.

Другая проблема — то, что освоение нового материала требует больших затрат не только временных, но и энергетических, т. е. тех людей, которые занимаются внедрением. Не следует ожидать быстрого внедрения, быстрой разработки и применимости новых месторождений, при этом объемы, которые есть у электродчиков (а эти объемы на фоне объемов применения тех же видов сырья скажем в большой металлургии), малозначительны для поставщика, в то время требования наши как потребителя достаточно жесткие. Если посмотреть на потребность плавикового шпата, то объем, который необходим для производства сварочных материалов, составляет порядка 4 тыс. т в год — это мизерная цифра по сравнению с применением плавикового шпата скажем в большой металлургии и в других областях. Потребность по ферромарганцу это 5 тыс. т, рутила и ильменита в сумме около 16 тыс. т, мрамора примерно 11 тыс. т. Это очень небольшие объемы с точки зрения поставщиков.

Поскольку предъявляются достаточно жесткие требования, то надеяться на то, что поставщики снизят цену нельзя. Поэтому единственная возможность — это создавать конкурентную среду для поставщиков материалов. Внедрение новых материалов следует начать на самих рудниках. Вот, например уже упоминаемый плавиковый шпат. Сейчас есть реальное предложение на его поставку из Таджикистана с Такобского месторождения, бывшего Средмашевского месторождения, замороженного примерно 15 лет. Сегодня есть реальная возможность получения оттуда этого материала. Но этот материал требуется, кроме всего прочего, испытать, и надо чтобы организации пошли на это. На первом этапе этот материал может быть дороже, но он существенно превышает качество по содержанию вредных примесей и в последующем с учетом ситуации, которая есть в Таджикистане с учетом стоимости рабочей силы, он должен быть, безусловно, дешевле того материала, который применяется сегодня.

В Аппатитах был организован специальный участок сфена под требования электродчиков. Были разработаны и изготовлены опытные установки, на которых шел промышленный выпуск сфена. В течение ряда лет на сфеновом концентрате, который является заменителем ильменита и применение которого позволяло сдерживать рост цен на ильменитовый концентрат, было изготовлено несколько тысяч тонн электродов. Но при той цене, которая была вначале — эта цена была выгодна для электродчи-



ков, но потом один из электродных заводов, соревнуясь с другими, согласился на более высокую цену, чтобы получить конкурентное преимущество и иметь такую возможность за счет объемов стал получать сфеновый концентрат по более высокой цене. Это позволило поставщику предположить, что электродные заводы действительно могут применять этот материал. В дальнейшем цена была повышена, и от этого сфенового концентрата отказались все потребители именно из-за цены, а сам производитель уже не пошел на снижение, получилось чисто управленческое решение. Таким образом материал, в который было вложено много сил, на проверку, испытания, отработку опытных электродов, в маркетинг, практически сегодня не поставляется. Что касается таких новых материалов, как рутил и ильменит производства Казахстана, то опять-таки необходимы вложения в само предприятие и последующие затраты на то, чтобы материал проверить, пробить согласие изготовителей сварочных материалов. Все это требует вложений. Использование такого материала из Казахстана может изменить ситуацию с рутилом на внутреннем рынке и России, и Украины. Причем одновременно это скажется и на поставщиках с Вольногорска, который четко отслеживает возможности и те цены, по которым идет поставка сегодня. А иногда достаточно небольшой подвижки по сырью, стоимость которого является решающей для стоимости материалов, что повлечет соответствующий интерес потребителя к продукции. А здесь цены могут сыграть решающее значение.

Кучерова М. И. (нач. тех. отд. ЗАО «ЭЛЗ») остановилась на новых видах сырья, которые были испытаны за последние полгода на предприятии — это молотый Коелгинский мрамор, у которого хороший постоянный грансостав. Материал поставляется в бигбегах. Переход на молотый мрамор был связан с реконструкцией предприятия и было подсчитано, что выгоднее было бы перейти на молотый мрамор, чем заново организовывать его переработку, сушку.

А. В. Жолус (ген. директор ЗАО «Шельф») затронул вопросы поставки поташа на российский рынок. В 2005 г. Пикалевский глиноземный завод прекратил его выпуск. В настоящее время поташ

поставляется из Китая. К сожалению, продолжается рост цены на него.

С. А. Дорошенко (гл. инженер ГП ОЗСМ ИЭС им. Е. О. Патона) высказал предложения о защите корпоративных интересов предприятий, входящих в ассоциацию. С этой целью следует обращаться от ее имени с рекомендательными письмами к предприятиям-поставщикам сырья с тем, чтобы они оперативно учитывали интересы предприятий, производящих электроды.

В. А. Зыскин (зам. ген. директора ОАО «Дорогобужкотломаш») осветил вопросы производства ферротитана, используемого в электродном производстве. В частности, отметил сложности по обеспечению его гетерогенности. На предприятии обработана технология получения ферротитана с использованием плазменной плавки на субкритических температурах. Это позволяет резко повысить однородность слитков. Построен цех мощностью 100 т ферротитана в месяц. Уже 9 заводов получают его стабильно.

А. В. Баранов (зам. ген. директора ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей») рассказал кратко о деятельности института, более подробно остановился на вопросах, связанных с применением различных видов сырья для производства сварочных материалов. В частности, интерес вызвала у собравшихся информация о новых подходах к оценке пригодности минерального сырья, учитывающей взаимодействие компонентов с жидким стеклом, особенно использования кварцевых песков и кварцитов, плавикового шпата.

И. Н. Ворновицкий (науч. сотр. НПО «ЦНИИТМАШ») остановился на необходимости совершенствования методики оценки качества покрытых электродов. В «ЦНИИТМАШ» этими вопросами занимаются в течение ряда лет и на сегодня предлагается порядка 15...18 показателей качества, разделенных на 3 группы.

Многие выступления вызвали оживленную дискуссию участников. После обмена мнениями было принято совместное решение, которое содержит практические рекомендации для достижения большей эффективности работы предприятий в сфере производства электродов.

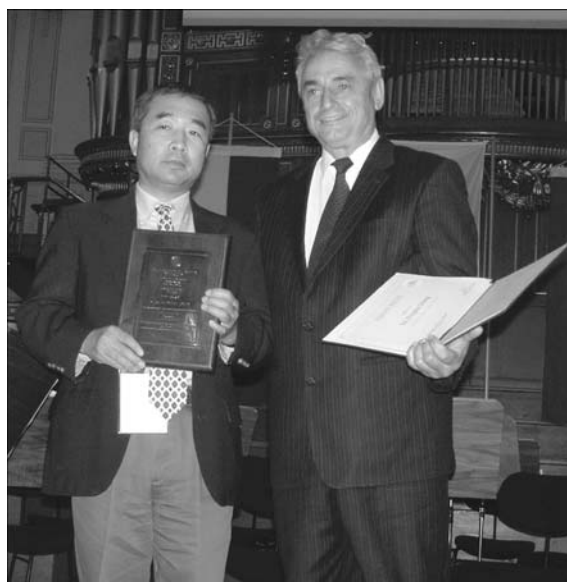
П. В. Игнатченко, инж.



61-я ЕЖЕГОДНАЯ АССАМБЛЕЯ МЕЖДУНАРОДНОГО ИНСТИТУТА СВАРКИ

С 6 по 11 июля 2008 г. в Граце (Австрия) состоялась 61-я Ежегодная ассамблея Международного института сварки (МИС). Организаторами ассамблеи выступили Центральный институт сварочной техники (SZA), Австрийское общество сварщиков и Технологический университет города Грац. В работе ассамблеи приняло участие около 500 делегатов из 47 стран. Из 51 страны-членов МИСа на ассамблеи отсутствовали делегации Аргентины, Греции, Индонезии, Израиля, Ливана, Ливии и Малайзии. В то же время в ассамблеи участие на правах наблюдателей приняли страны, которые подали заявки на присоединение к МИСу: Литва, Объединенные Арабские Эмираты и Турция. Традиционно наибольшие делегации прислали Япония (77 человек), Германия (56 человек) и США (36 человек), что наблюдается уже на протяжении последних 15–20 лет. Затем по количеству делегатов следуют Швеция (30), Франция (25), Словакия (18), Канада (17), Англия (16), Финляндия (16), Австралия (13), Италия (13), Голландия (10), Корея (10), Россия (10), Украина (10). Делегации остальных стран состояли из нескольких представителей. От страны-организатора (Австрии) в ассамблеи приняло участие 35 человек.

В настоящее время в МИСе функционирует более 20 комиссий и других структурных подразделений по следующим направлениям: высоко- и низкотемпературная пайка, термическая резка и процессы газопламенной обработки; дуговая сварка и сварочные материалы; сварка сопротивлением и холодная сварка, а также родственные процессы соединения материалов; лучевые способы сварки; контроль и обеспечение качества сварных конструкций; терминология; охрана труда; поведение металлов при сварке; сварные конструкции, предотвращение разрушения; сосуды, работающие под давлением, котлы и трубы; дуговые сварочные процессы и технологии; усталостная прочность сварных узлов и конструкций; обучение и подготовка; конструирование, анализ и производство сварных конструкций; сварка полимеров и технологии клеи; обучение, подготовка и аттестация; внедрение и аккредитация; неразъемные соединения для новых материалов и покрытий для авиастроения; автомобильный транспорт; окружающая среда; управление качеством при сварке и родственными технологиями; стандартизация; подводная сварка; физика сварки; стратегия исследований в сварке и сотрудничество. В целом они довольно полно охватывают область сварки во всей ее многогранности, включая этапы исследования,



Вручение премии имени Евгения Патона

обучения, практического применения, стандартизации, сотрудничества и пр. Участие национальных делегаций в работе ассамблей МИСа является очень полезной, так как на таком форуме имеется возможность ознакомиться с современным состоянием дел в той или иной области сварки, особенно по направлениям, по которым у себя на родине работы не проводятся в силу тех или иных причин. При этом наблюдается интересная зависимость, выраженная в том, что страны с развитым сварочным производством и наукой присылают на ассамблеи МИСа самые многочисленные делегации (Япония, Германия, США). Это можно объяснить тем, что участие в работе ассамблей МИСа позволяет поддерживать и далее повышать достигнутый уровень развития сварочного производства и науки у себя в стране.

Во время торжественного открытия ассамблеи состоялось вручение международных премий ряду ученых за наиболее выдающиеся работы в области сварки и родственных технологий. В этом году международной премии имени Евгения Патона был удостоен д-р Пингша Донг (США). От имени МИСа и Национального комитета по сварке Украины премию вручил академик НАН Украины К. А. Ющенко.

Первые три дня работы 61-й Ассамблеи МИСа были посвящены заседаниям комиссий, рабочих групп и других подразделений. Представители Украины приняли участие в работе 13 комиссий Совета стандартизации, Совета по международной

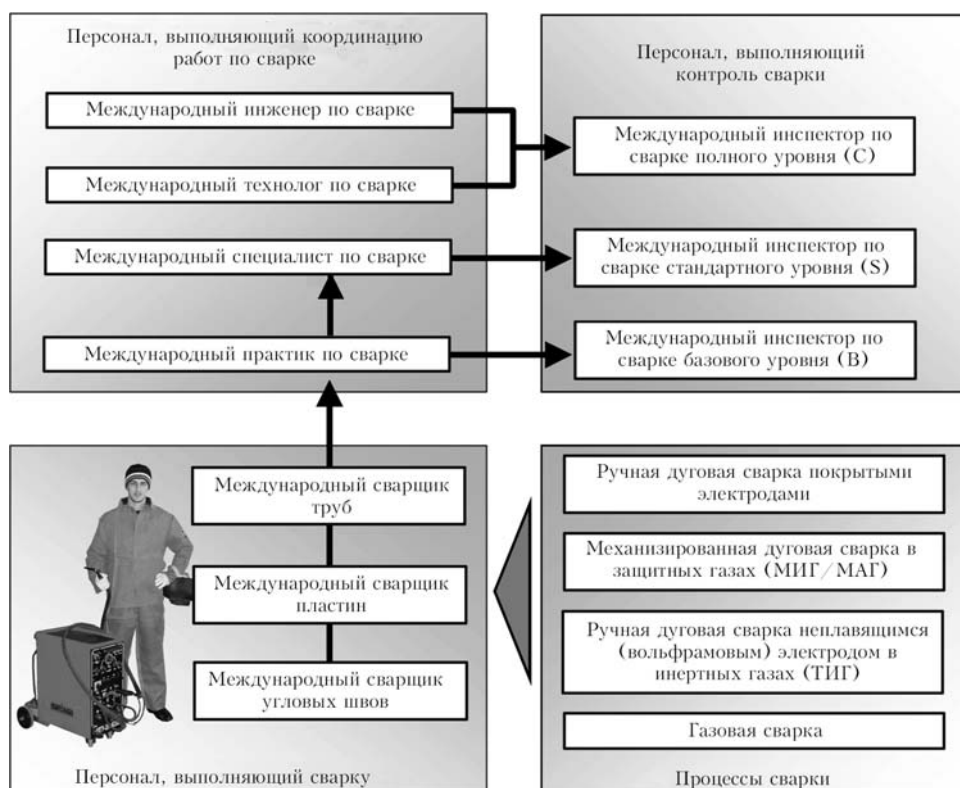


Схема международной системы подготовки персонала сварочного производства

квалификации и аттестации персонала и сертификации сварочного производства, а также в работе исследовательской группы SG-212.

Основные вопросы, которые обсуждались на заседаниях рабочих групп по обучению, подготовке и аттестации, внедрения и аккредитации, касались проблемы оптимизации организационных документов международной системы сертификации сварочного производства и международной системы аттестации (т.е. сертификации) персонала сварочного производства, которые в настоящее время разрабатываются МИС. Аналогичные системы функционируют в рамках Европейской сварочной федерации (ЕСФ) с 1991 г., однако область их распространения, естественно, ограничивается только Европой. После того, как эти системы будут запущены в действие, завершится создание полной всеобъемлющей системы подготовки и сертификации персонала сварочного производства, а также сертификации самого сварочного производства. Предполагается, что системы сертификации персонала и самого сварочного производства под эгидой МИСа начнут действовать уже с 2009 г.

Основополагающим стандартом этой системы будет стандарт ISO 3834, который регламентирует требования к качеству сварки плавлением и введен в виде гармонизированного национального стандарта Украины. В частности, в этом стандарте особенно подчеркивается, что производитель должен располагать соответствующим персоналом, осуществляющим надзор за выполнением сварки, и который

должен обладать достаточными полномочиями и нести полную ответственность за обеспечение качества сварки.

На заседаниях рабочих групп рассмотрены также вопросы совершенствования эффективности международной системы подготовки и персонала сварочного производства, которая применяется уже в 36 странах, включая Украину. Она схематически представлена выше.

Уполномоченным национальным органом, который аккредитован МИСом для осуществления этой деятельности на территории Украины, является Межотраслевой учебно-аттестационный центр ИЭС им. Е. О. Патона. Центр получил аккредитацию на подготовку всех указанных в приведенной схеме международных специалистов сварочного производства.

В 2008 г. истек трехлетний срок пребывания Криса Смоллбоуна (Австралия) на посту президента МИСа. Его сменил доктор-инженер Улрих Дилтай (Германия), который до этого занимал различные посты в руководстве МИСа.

Во время работы 61-й Ассамблеи МИСа была проведена также ежегодная Ассамблея ЕСФ и заседание ее технических комитетов. Это уже обычная практика последних лет, вызванная двумя причинами. Первая — это желание сократить излишние финансовые расходы национальных комитетов по сварке, и вторая главная заключается в том, что после того, как система гармонизированного обучения персонала сварочного производства была передана



в ведение МИСа, а также в связи с осуществляемой в настоящее время передачей МИСу и системы сертификации сварочного производства, область исключительной деятельности ЕСФ существенно сокращается (в ведении ЕСФ остались практически только около 10 программ подготовки персонала сварочного производства, которые пока не охвачены МИСом — это курсы подготовки европейского специалиста по термическому напылению, европейского сварщика пластмасс, оператора установок для термообработки сварных соединений и др.

После окончания работы 61-й Ассамблеи МИСа состоялась международная конференция «Безопасность и надежность сварных конструкций в энергетике и обрабатывающей промышленности» (10–11 июля 2008 г.), на которой было представлено около 100 докладов.

Очередная 62-я Ассамблея МИСа состоится 6–11 июля 2009 г. в Сингапуре. В 2010 г. почетная миссия устроителя ассамблеи МИСа будет предоставлена Украине.

В. Е. Пономарев, канд. техн. наук

А. С. ЗУБЧЕНКО — 70



Исполнилось 70 лет Александру Степановичу Зубченко, заместителю директора по научной работе ОКБ «ГИДРОПРЕСС», доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки РФ, заслуженному машиностроителю. А. С. Зубченко родился в 1938 г. Окончил Львовский политехнический институт в 1960 г. и аспирантуру при ЦНИИТМАШ (г. Москва) в 1966 г.

Начальный период его трудовой деятельности связан с проблемами химического машиностроения: созданием крупногабаритных реакторов для производства аммиака, змеевиковых конструкций для пиролиза, выпарных аппаратов для содовых производств, химического оборудования для высокоагрессивных сред.

Наиболее значимые научные результаты достигнуты им в период работы в ЦНИИТМАШ в должностях старшего научного сотрудника, заведующего лабораторией, заместителя генерального директора по науке, генерального директора. А. С. Зубченко непосредственно участвовал в техническом перевооружении заводов и становлении отрасли энергетического машиностроения. Под его руководством и при его непосредственном участии были решены проблемы изготовления оборудования для тепловых, атомных и гидроэлектростанций, в том числе разработаны применяемые в настоящее время основные и сварочные материалы, современные технологические процессы и технологическое оборудование. Проведены обширные исследования свойств материалов и конструкций, результаты которых положены в основу расчетов прочности, обоснования надежности, ресурса и продления срока службы потенциально опасного оборудования.

А. С. Зубченко — участник ликвидации последствий аварии на ЧАЭС.

А. С. Зубченко внес большой вклад в сооружение атомных энергоблоков с реакторами мощностью 1000 МВт на российских и зарубежных АЭС. Даже в сложный «перестроечный» период под его руководством было обеспечено изготовление конкурентоспособного атомного оборудования для АЭС в ИРИ, Китае и Индии. Высокие научные и производственные достижения А. С. Зубченко отмечены государственными наградами, ему присвоено звание «Заслуженный деятель науки РФ» и «Заслуженный машиностроитель». А. С. Зубченко является лауреатом премий Совета Министров СССР и Правительства РФ.

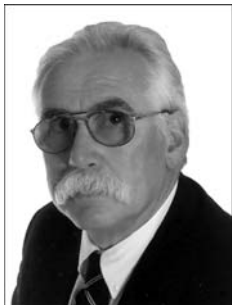
Будучи специалистом международного уровня в области теории и практики современных машиностроительных технологий, А. С. Зубченко большое внимание уделяет подготовке научных кадров высшей квалификации, под его руководством защищено 25 кандидатских и 2 докторские диссертации. Им опубликовано свыше 200 научных статей и 4 монографии, получено более 50 авторских свидетельств и патентов на изобретения. А. С. Зубченко состоит во многих редколлегиях научных изданий, участвует в работе диссертационных советов ОКБ «ГИДРОПРЕСС» и МГТУ им. Н. Э. Баумана по присуждению ученых степеней, является сопредседателем Межгосударственного совета по сварке и родственным процессам, избран действительным членом РИА.

В настоящее время А. С. Зубченко активно участвует в решении вопросов материаловедения на стадиях проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации оборудования АЭС в ОКБ «ГИДРОПРЕСС».

Дирекция, сотрудники ИЭС, редколлегия журнала горячо поздравляют Александра Степановича с 70-летием и желают ему крепкого здоровья, долгих лет жизни, творческих успехов и благополучия!



ПАМЯТИ Х. ГЕРОЛЬДА



12 августа 2008 г. на 63-м году ушел из жизни профессор доктор Хорст Герольд, директор Института материаловедения и сварки, заведующий кафедрой сварки Магдебургского университета им. Отто фон Гирике.

Свой трудовой путь он начал в 1969 г., закончив Ростовский университет и получив диплом инженера-судостроителя. На

протяжении 15 лет работал в отделе технического контроля, службе главного сварщика, а затем возглавил научно-исследовательскую лабораторию комбината по производству легких металлоконструкций. В 1976 г. защитил кандидатскую диссертацию, а в 1980 г. — докторскую, специализируясь в области свариваемости различных конструкционных материалов. С 1984 г. Х. Герольд начал преподавательскую деятельность на должности доцента кафедры сварки в г. Кетен, а с 1988 г., став профессором Магдебургского университета, возглавил и на протяжении многих лет бессменно руководил кафедрой сварки и Институтом лучевых и соединительных технологий, преобразованного в 2006 г. в Институт материаловедения и сварки. С 1998 по 2000 гг. Х. Герольд занимал должность декана машиностроительного факультета Магдебургского университета. Х. Герольд был постоянным делегатом от ФРГ в различных комиссиях Международного института сварки, активным членом ряда ра-

бочих групп Немецкого сварочного общества (DVS). Признанием его заслуг было награждение почетным кольцом DVS.

Х. Герольд был почетным доктором НТУУ «Киевского политехнического института», почетным профессором Пермского государственного технического университета, почетным членом Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ.

Он уделял много внимания развитию научно-технического сотрудничества со странами Восточной Европы в области сварки и родственных технологий. Всегда был желанным гостем и надежным партнером в совместных проектах для ученых и специалистов ИЭС им. Е. О. Патона и сварочного факультета НТУУ «КПИ».

Х. Герольд — автор более 660 публикаций, многочисленных монографий и учебников в области сварки. Он был одним из инициаторов создания совместного украинско-немецкого факультета машиностроения НТУУ «КПИ» и Магдебургского университета им. Отто фон Гирике. Среди многочисленных кандидатов наук, подготовленных Х. Герольдом, выпускники сварочного факультета НТУУ «КПИ», МВТУ им. Н. Э. Баумана, МАТИ, университетов Перми, Томска, Баку, Софии.

Светлая память о профессоре Хорсте Герольде навсегда сохранится в сердцах тех, кто знал его и работал с ним.

Сварочный факультет НТУУ «КПИ»
Редколлегия журнала «Автоматическая сварка»

Днепрометиз
Группа предприятий «Северсталь-метиз»

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

e-mail: sale@dm.severstalmetiz.com

т/ф: (0562) 34-82-24, 35-83-69, 35-15-97
Украина, 49081, г. Днепропетровск, пр. им. газеты «Правда», 20

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

СЕТКИ:
плетеные
сварные
рифленные

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

**ГВОЗДИ
БОЛТЫ
ГАЙКИ
ШАЙБЫ**

www.dneprometiz.com.ua



ГЕФЕСТ™

тел./факс: (044) 200-88-33

ЭЛЕКТРОДЫ

e-mail: gefests@gmail.com
г. Киев, ул. Боженко, 11

Производство высококачественных электродов для:

- Сварки высоколегированных сталей
- Сварки теплоустойчивых сталей
- Наплавки слоев со специальными свойствами
- Сварки чугуна и меди
- Изготовление на заказ необходимых Вам марок

www.gefest-sv.com.ua
**Все марки электродов
СЕРТИФИЦИРОВАНЫ**

ГЕФЕСТ™

ОАО "ЗОНТ"

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

ПОСТАВКА
ИСТОЧНИКОВ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ.
**КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ И
МОДЕРНИЗАЦИЯ**
МАШИН ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛА.




ОАО "ЗОНТ" (ТОРГОВАЯ МАРКА <<АВТОГЕНМАШ>>)
65104, УКРАИНА, Г. ОДЕССА, ПР-Т. МАРШАЛА ЖУКОВА 103.

Т. +38 (048) 717-00-50, E-MAIL: OAOZONT@ZONT.COM.UA
715-69-40, WWW.ZONT.COM.UA
Ф. +38 (048) 715-69-50 WWW.AUTOGENMASH.COM

АББ - сердце робототехники

Робототехнические комплексы
для дуговой и контактной сварки



- Роботизация всего производственного цикла
- Роботизированные заводы "без людей"

АББ Лтд
Украина, 03680, Киев-67
бул. И. Лепсе, 4
тел. +380 44 495 22 11
факс +380 44 495 22 10
e-mail: robotics@ua.abb.com
www.abb.ua

ABB

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 Ø 1,2 мм, Al Si 5 Ø 1,2 мм

ABICOR BINZEL
Franius
SEUMA



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

ОАО «ЗАПОРОЖСТЕКЛОФЛЮС»

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

ОАО «Запорожский завод сварочных флюсов и стекоизделий» — один из крупнейших в Европе производителей сварочных флюсов.

На предприятии внедрена система управления качеством с получением Сертификатов «DVS ZERT» и «V» на соответствие требованиям стандарта DIN EN ISO 9001:2000, а также НТЦ «СЕПРОЗ» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины на соответствие требованиям ДСТУ ISO 9001:2001.

Продукция завода сертифицирована в УкрСЕПРО, Системе Российского Морского регистра судоходства, Госстандартом России, TÜV Nord.

Флюсы сварочные
♦ ГОСТ 9087-81 ♦ ТУ У 05416923.049-99
♦ ГОСТ Р 52222-2004 ♦

♦ АН-348А ♦ АН-348АМ ♦ АН-348АП ♦ АН-348АП ♦
♦ АН-47 ♦ АН-47Д ♦ АН-47АП ♦ ОСЦ-45 ♦
♦ АНЦ-1А ♦ АН-60 ♦

ООО «ЦЕНТР ПРОМЫШЛЕННОЙ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ»

Предоставляет качественно и в полном объеме на территории Украины следующие услуги:

- контроль качества сварных соединений РГК, УЗН, ВКН, ЦД, МПД, герметичность, стилокопирование, замер твердости, механические испытания и лабораторные исследования;
- термообработка сварных соединений радиационным и индукционным методом;
- геодезическое обеспечение монтажно-строительных работ;
- аттестация персонала по контролю качества сварных соединений на АЭС.

«Центр» имеет все разрешительные документы и лицензии, необходимые для предоставления данных услуг на объектах НАЭК — Энергоатом и Госнадзорхрантруда.



Тел./факс: (38 044) 499 65 72; тел.: (38 044) 499 65 71
Моб. тел.: (8 050) 334 82 46; (8 050) 334 82 24

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 легатуры
Хром металлический
Комплексные раскислители и модификаторы

ул. Курسانтская, 1
г. Днепродзержинск
49051, Украина

Тел.: (380562) 35-50-25
Тел./факс: (380562) 35-19-41
E-mail: sp@spetssplov.dp.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 **MECUFIL®**.



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. Витязий, 2а

Тел.: (062) 332-2650(52)

Тел./факс: 382-9449, 332-2651

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



**ТОРГОВИЙ ДІМ
ЗВАРЮВАННЯ**

03680, г. Киев, Украина, пр-т Глушкова, 1, пав. №21,
тел./факс: (+380 44) 596-93-70, 596-93-76, 596-93-75, 596-92-20,
e-mail: house@welding.kiev.ua, eduardch@ukr.net



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

**Производство материалов для
дуговой сварки, наплавки и резки:**

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

Порошковые проволоки — ПП-АН1, ПП-АН3, ПП-АН7, ПП-АН19, ПП-АН19Н, ПП-АН24С, ПП-АН30, ПП-АН59, ПП-АН61, ПП-АН63, ПП-АН67, ПП-АН68М, ПП-АН69, ПП-АН70М, ПП-АНВ2У, ПП-НnХ25П4Н3Т, 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	Тел.:	(044) 456-64-95
г. Киев-112		456-63-69
ул. О. Телиги, 2	Факс:	(044) 456-64-95
		456-63-08



машины для газокислородной и плазменной резки
Точная и качественная резка деталей и заготовок из листового металла



Газокислородная резка: → в диапазоне толщин 5 ... 600 мм → многорезаковая резка → со скосом кромок под сварку → резка слэбов и заготовок	Плазменная резка: → в диапазоне токов 15 ... 1000 А → в диапазоне толщин 0,5 ... 130 мм → двухгазовая → высокой плотности → водоинжекционная → надводная и подводная
---	---

От сложных комплексов «под ключ» до недорогих комплексов для предпринимателей

НПП «ТЭХМАШ», ул. Промышленная, 14, г. Одесса, 65031
Тел./факс: +38 (048) 778-17-38; 778-17-45; 778-08-90; 728-06-08
E-mail: marketing@techmach.com.ua; tm@te.net.ua



Automatic machines and robots for arc welding

Автоматические установки и роботы для дуговой сварки



УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ШВОВ

УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ КОЛЬЦЕВЫХ ШВОВ

РОБОТТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ СВАРКИ

СВАРОЧНАЯ АППАРАТУРА

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



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

Подписано к печати 18.09.2008. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 9,09. Усл. кр.-отт. 9,94. Уч.-изд. л. 10,45 + 8 цв. вклеек.

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