

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Главный редактор  
**Б. Е. ПАТОН**

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

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

Н. П. Алешин (Россия)  
Гуань Цяо (Китай)  
У. Дилтай (Германия)  
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) 200 6302, 200 8277  
Факс: (38044) 200 5484, 200 8277  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

**Редакторы:**

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

Свидетельство о государственной  
регистрации КВ 4788  
от 09.01.2001

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

За содержание рекламных  
материалов редакция журнала  
ответственности не несет

Цена договорная

**СОДЕРЖАНИЕ**

НОВОСТИ ..... 3

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

*Кучук-Яценко С. И., Швец Ю. В., Кавуниченко А. В., Швец В. И., Тараненко С. Д., Прощенко В. А.* Особенности влияния дефектов в литых заготовках стали 110Г13Л на механические свойства соединений при контактной стыковой сварке ..... 5  
*Махненко В. И., Козлитуна С. С., Дзюбак Л. И.* Прогнозирование содержания  $\sigma$ -фазы в ЗТВ стыковых соединений дуплексных сталей при дуговой сварке ..... 9  
*Письменный А. С., Баглай В. М., Письменный А. А., Рымар С. В.* Индукционная система для локальной обработки поверхностей потоками жидкого металла ..... 13  
*Покляцкий А. Г.* Изучение особенностей массопереноса процесса сварки трением с перемешиванием с помощью физического моделирования ..... 18

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ**

*Маковецкая О. К.* Современный рынок сварочной техники и материалов ..... 23  
*Походня И. К., Явдошин И. Р., Губеня И. П.* Сварочный аэрозоль — факторы влияния, физические свойства, методы анализа (Обзор) ..... 39  
*Бондарев А. А., Нестеренков В. М.* Электронно-лучевая сварка тонколистовых объемных конструкций из алюминиевых сплавов ..... 43  
*Занковец П. В.* Степень влияния подготовки и сборки под сварку на качество сварных соединений технологических трубопроводов ..... 48

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

*Позняков В. Д., Жданов С. Л., Синеок А. Г., Максименко А. А.* Опыт применения стали S355 J2 в металлоконструкциях перекрытия над НСК «Олимпийский» (г. Киев) ..... 54

**ХРОНИКА**

Международная специализированная выставка «Сварка и резка» в Минске ..... 56  
Промышленная выставка «ПатонЭкспо-2011» ..... 57  
Технический семинар по сварочным материалам ..... 59  
Международная конференция «Титан-2011 в СНГ» ..... 61  
Э. М. Эсибяну — 80 ..... 62

**ИНФОРМАЦИЯ**

Новое оборудование для микроплазменных процессов ..... 63  
Производители сварочных материалов, имеющие сертификат соответствия в системе УкрСЕПРО, выданный в НТЦ «СЕПРОЗ» (по состоянию на 01.01.2011 г.) ..... 65

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief  
**B. E. PATON**

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

THE INTERNATIONAL  
EDITORIAL COUNCIL:

N. P. Alyoshin (Russia)  
D. von Hofe (Germany)  
Guan Qiao (China)  
U. Dilthey (Germany)  
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) 200 63 02, 200 82 77  
Fax: (38044) 200 54 84, 200 82 77  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:

E. N. Kazarova, T. V. Yushina  
*Electron galley:*  
I. R. Naumova,

I. V. Petushkov, A. I. Sulima

State Registration Certificate  
KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved

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

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

## CONTENTS

NEWS ..... 3

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL

*Kuchuk-Yatsenko S. I., Shvets Yu. V., Kavunichenko A. V., Shvets V. I., Taranenko S. D., Proshchenko V. A.* Peculiarities of effect of defects in cast blanks of steel 110G13L on mechanical properties of joints in flash-butt welding ..... 5  
*Makhnenko V. I., Kozlitina S. S., Dzyubak L. I.* Prediction of  $\sigma$ -phase content in HAZ of butt joints of duplex steels in arc welding ..... 9  
*Pismennyi A. S., Baglai V. M., Pismennyi A. A., Rymar S. V.* Induction system for local treatment of surfaces by molten metal flows ..... 13  
*Poklyatsky A. G.* Study of specifics of mass transfer in friction stir welding process using physical modeling ..... 18

### INDUSTRIAL

*Makovetskaya O. K.* Present-day market of welding equipment and materials ..... 23  
*Pokhodnya I. K., Yavdoshchin I. R., Gubanya I. P.* Welding aerosol: factors of effect, physical properties, methods of analysis (Review) ..... 39  
*Bondarev A. A., Nesterenkov V. M.* Electron beam welding of thin-sheet three-dimensional structures of aluminium alloys ..... 43  
*Zankovets P. V.* Effect of preparation and assembly for welding on quality of welded joints of technological pipelines ..... 48

### BRIEF INFORMATION

*Poznyakov V. D., Zdanov S. L., Sineok A. G., Maksimenko A. A.* Experience in application of the new high-strength steel S355 J2 at the enterprises of Ukraine for welded metal structures of roofing over the NSC «Olimpiyskiy» in Kiev during its reconstruction ..... 54

### NEWS

International specialized exhibition «Welding and Cutting» in Minsk ..... 56  
Industrial exhibitions «Paton Expo-2011» ..... 57  
Technical seminar on welding consumables ..... 59  
International conference «Titan-2011 in CIS» ..... 61  
E. M. Esibyan is 80 ..... 62

### INFORMATION

New equipment for microplasma processes ..... 63  
Manufacturers of welding consumables, having Certificate of Conformity in UkrSEPRO system, issued at STC «SEPROZ» (as per 01.01.2011) ..... 65

## УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СВАРОЧНЫЙ АГРЕГАТ

Новинка от «Lincoln Electric»: сварочный агрегат SAE-300 с генератором постоянного тока предназначен для сварки труб, использования в строительстве и ремонтных работах. Одна из особенностей агрегата заключается в применении двойного непрерывного управления выходными параметрами при ручной дуговой сварке. Два круговых переключателя на панели управления позволяют точно настроить напряжение и ток. При настройке левым переключателем «Грубый ток» изменяется наклон кривой вольт-амперной характеристики (ВАХ). При настройке правым переключателем «Точный ток и напряжение холостого хода» происходит смещение значений напряжения и тока. Различные комбинации положений обоих переключателей позволяют получить те или иные выходные параметры.



### Особенности сварочного агрегата SAE-300:

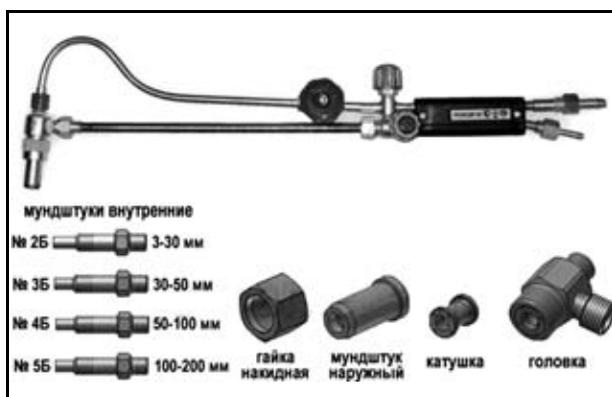
- процессы — ручная дуговая сварка (ММА), сварка вольфрамовым электродом (TIG), строжка; с устройством подачи проволоки — полуавтоматическая сварка (MIG), сварка порошковой проволокой;
- возможность использования электродов диаметром до 5,6 мм марок Fleetweld 5P, Fleetweld 5P+, Pipeliner и Excalibur;
- возможность дуговой строжки угольными электродами диаметром до 6,3 мм;
- применение медных обмоток для повышения стабильности горения дуги, надежности и срока службы;
- диапазон выходного постоянного тока 50... 390 А;
- выходной ток/продолжительность включения 300 А/60 %; 250 А/100 %;
- выходная мощность на переменном токе для питания электроинструмента и осветительных приборов — 3000 Вт от розеток на 115 или 230 В;
- дизельный двигатель Perkins 404D-22 Diesel EPA Tier 4i; 4-цилиндровый с водяным охлаждением; 32,7 л.с./1800 оборотов/мин; вместимость топливного бака 60,6 л;
- габариты (ширина×глубина×высота) 610×1651×943 мм;
- масса 642 кг.

## РУЧНОЙ ЖИДКОТОПЛИВНЫЙ РЕЗАК

Завод автогенного оборудования «Донмет» (Украина, Краматорск) представил новый ручной жидкотопливный резак (бензорез) Бобуха РК200 «Вогник» 182. Новинка предназначена для разделительной резки низкоуглеродистой стали толщиной 3... 200 мм.

### Особенности резака РК200 «Вогник» 182:

- без асбестового шнура и отдельного подогревающего пламени для испарения жидкого топлива (бензина);
- в качестве топлива может использоваться бензин марок А-76, А-80, АИ-91, А-92, А-95 и др. для двигателей (ГОСТ 2084-77), а также бензин марок «Регулятор-91», «Нормаль-80» (ГОСТ 51105-97);



- возможна эксплуатация даже на морозе до  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- полное сгорание горючего;
- 100%-е сопротивление обратному удару;
- выход на режим за 15...30 с;
- длина не более 555 мм;
- масса не более 840 г.

## ПЛАЗМЕННЫЕ РЕЗАКИ

В конце 2010 г. компания «Hypertherm» (США) выпустила модифицированные плазменные резаки Duramax HRT (ручной) и MRT (механизированный). Новинки совместимы с источниками питания Hypertherm Powermax 1000 и Powermax 1250.



По сравнению со стандартными резаками Hypertherm T60 и T80 новые модели обладают следующими преимуществами:

- более надежное зажигание дуги благодаря технологии электрода Spring Start, позволяющей устранить движущиеся части в плазматроне;
- более длительный срок службы расходных материалов (до 55 % продления) за счет применения технологии сопла Conical Flow и пружинного электрода с гафниевой вставкой;
- повышенная производительность из-за конструкции защитного экрана (колпака) в форме диффузора, что позволяет уменьшить образование окалины и повысить эффективность благодаря более плавной контактной резке;
- улучшенная конструкция нового ручного резака Hypertherm Duramax HRT;
- возможность «укорачивания» нового механизированного резака Hypertherm.

Duramax MRT (до длины 15 см вместо стандартной длины 38 см) для улучшения доступности при роботизированной резке и обработке труб.

## СТАНОК ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

Компания «Trumpf» (Германия) представила новый станок для лазерной сварки TruLaser Station 3003. В зависимости от назначения он может быть оснащен различными лазерными источниками: импульсным TruPulse, дисковым TruDisk, диодным TruDiode, оптоволоконным TruFiber (все с выходной мощностью до 1кВт) или TruMicro 7050, используемым для микрообработки полупроводников. Новинка предназначена для экономичного производства часто меняющихся изделий малыми и средними партиями. Благодаря программируемой фокусирующей оптике PFO 20/PFO 33 сокращено время на дополнительные операции.

### Технические характеристики станка:

- рабочее пространство: ось X — 300 мм; ось Y — 300 мм; ось Z — 500 мм; ось C —  $n \times 360^{\circ}$ ;
- максимальная скорость: ось X — 6 м/мин; ось Y — 6 м/мин; ось Z — 1,5 м/мин;
- максимальное количество управляемых сервоосей — 3;
- габаритные размеры 860×2000×1310 мм.





## ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ В ЛИТЫХ ЗАГОТОВКАХ СТАЛИ 110Г13Л НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ

Академик НАН Украины **С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО**, **Ю. В. ШВЕЦ**, **А. В. КАВУНИЧЕНКО**, инженеры,  
**В. И. ШВЕЦ**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**С. Д. ТАРАНЕНКО**, канд. техн. наук, **В. А. ПРОЩЕНКО**, инж. (ОАО «Днепропетровский стрелочный завод»)

Исследованы особенности образования дефектов в стыковых швах, выполненных контактной стыковой сваркой, литых заготовок из стали 110Г13Л (ГОСТ 7432–87) с аустенитными катаными заготовками из стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5949–75), которые используются для производства сварных железнодорожных крестовин. Установлено, что дефекты литья при попадании в стыковой шов приводят к образованию дефектов и в зависимости от условий их образования по-разному влияют на прочностные свойства сварных соединений.

*Ключевые слова:* контактная стыковая сварка пульсирующим оплавлением, высокомарганцовистая сталь 110Г13Л, рельсовая сталь М76, аустенитная вставка

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология и оборудование для контактной стыковой сварки железнодорожных крестовин [1], основной особенностью которой является использование пульсирующего оплавления [2], позволяющего получать соединения высокомарганцовистой литой стали 110Г13Л с рельсовой М76 через вставку из прокатанной хромоникелевой аустенитной стали 12Х18Н10Т. Крестовина с приварными рельсовыми окончаниями показана на рис. 1.

Актуальной задачей на современном этапе является повышение надежности и ресурса эксплуатации железнодорожных крестовин. Ее решение неразрывно связано с разработкой рациональных методов неразрушающего контроля как готового изделия (сварных швов), так и входных материалов, используемых при производстве сварной крестовины.

Цель настоящей работы — исследование влияния дефектов швов, связанных с имеющимися дефектами в исходных материалах перед сваркой, на механические свойства соединений. Особенно это актуально при сварке литых заготовок, поскольку этот вопрос практически не исследовался.

Оценку влияния дефектов стыковых швов, возникающих в результате попадания дефектов литья (раковин, пор) в зону сварного соединения, на его прочностные свойства и их выявляемость радиографическим методом контроля проводили на образцах рельсового профиля Р65. Для этого отлили партию отливок из стали 110Г13Л с нарушением технологии литья, что привело к обра-

зованию литейных дефектов. Концы отливок на глубину до 100 мм подвергли радиографическому контролю, по результатам которого определили места залегания дефектов и их размеры. После этого провели торцовку образцов таким образом, чтобы при сварке дефект попал в зону соединения. В образцах отливок, где отсутствовали естественные дефекты, просверлили отверстия, которые имитировали пустоты в отливке. Механические испытания образцов проводили в соответствии с ТУ У 27.3-26524137-1342:2006 [3]. Перед испытаниями провели радиографический контроль сварных швов образцов на наличие дефектов.

После проведения механических испытаний сварных образцов на статический изгиб в участках, где дефекты литья вызвали разрушение по линии соединения 12Х18Н10Т + 110Г13Л, вырезали шлифы, на которых проводили металлогра-

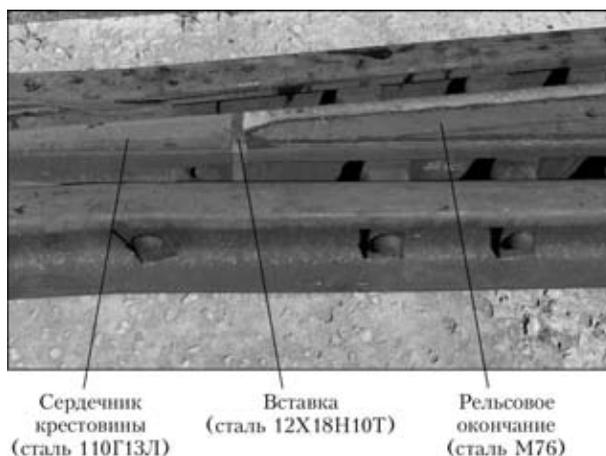


Рис. 1. Крестовина с приварными рельсовыми окончаниями

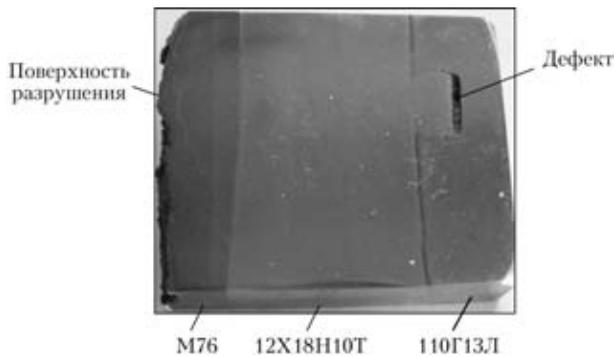


Рис. 2. Макрошлиф соединения с искусственным дефектом

фические исследования. Вырезку шлифов проводили также из дефектных мест, которые были найдены в швах радиографическим контролем, хотя они и не привели к разрушению образцов по линии соединения. Исследования микроструктуры осуществляли на оптическом микроскопе «Neophot-32», анализ химической неоднородности — на микроскопе-микроанализаторе SX-50 фирмы «САМЕВАХ».

На рис. 2 представлен макрошлиф, вырезанный из образца с искусственным дефектом, который при испытаниях разрушился по рельсовому окончанию (сталь М76) при усилии 1100 кН и стреле прогиба 21 мм. Как видно из рисунка, полость искусственного дефекта (горизонтальное отверстие диаметром 8 мм в подошве отливки 110Г13Л) при оплавлении заполняется расплавом свариваемых сталей 110Г13Л и 12Х18Н10Т. При осадке не происходит увеличения площади дефекта, заполненного расплавом, а линия соединения в зоне дефекта сохраняет прямизну, характерную для бездефектных зон. По линии соединения наблюдается даже некоторое уменьшение площади дефекта за счет вдавливания близлежащих к дефекту слоев 110Г13Л в расплав, при этом протекает боковое деформирование расплава и, как следствие,



Рис. 3. Микроструктура (×25) соединения в зоне искусственного дефекта

**Химический состав расплава в искусственном дефекте, мас. %**

Зона замера	Mn	Cr	Ti	Ni
А	11,006	6,637	0,075	3,624
Б	14,390	0,139	0	0,037
В	13,247	3,562	0	2,221
Матрица 110Г13Л	14,367	0,078	0	0,042
Матрица 12Х18Н10Т	1,783	18,712	0,326	9,657

происходит прессовая сварка расплава с основным металлом 110Г13Л по боковой поверхности искусственного дефекта. Подтверждением этого являются надрывы, возникшие в стали 110Г13Л в результате механических испытаний (рис. 3). Таким образом, дефект типа поры без шлаковых включений при контактной стыковой сварке подвергается в некоторой степени «залечиванию» и не является критичным при статических испытаниях.

Заполнение искусственной поры расплавом происходит в процессе оплавления. В связи с этим представляет интерес химический состав расплава с точки зрения количества металла, попадающего на оплавливаемую поверхность с другой оплавливаемой поверхности при взрыве перемычек. Как показывают полученные результаты, до 20 % металла на оплавливаемой поверхности (в жидком слое) составляет металл с противоположной оплавливаемой поверхности, попадающий на нее при взрыве перемычек.

Результаты анализа химического состава расплава в зонах А, Б, В (рис. 3) приведены в таблице. В микроструктуре металла, заполняющего отверстие, наблюдаются слои, разграниченные цепочками неметаллических включений. Образование слоистой структуры вызвано порционным заполнением отверстия при взрыве перемычек.

На рис. 4 представлен макрошлиф, вырезанный из образца с естественным дефектом, который при испытаниях разрушился по линии соединения М76 + 12Х18Н10Т при усилии 106 тс и стреле



Рис. 4. Макрошлиф соединения с естественным дефектом

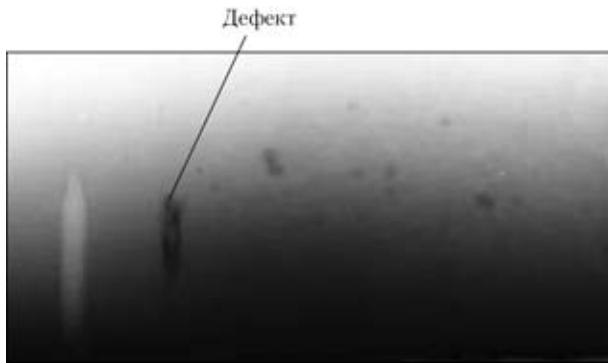


Рис. 5. Рентгеновский снимок естественного дефекта в образце

прогиба 22 мм. Данный дефект был выявлен при радиографическом контроле сварного шва (рис. 5). На рис. 6 показана микроструктура соединения в зоне естественного дефекта (литейная пора со шлаковыми включениями). Как видно, полость дефекта при оплавлении заполнена расплавом свариваемых сталей 110Г13Л и 12Х18Н10Т. Шлак из расплава как более жидкотекучий вытесняется в периферийную часть поры и остается в виде шлаковых включений, часть которых попадает в металл расплава. Хотя дефект находился в подошве отливки, разрушения образца по дефекту не произошло. Это объясняется тем, что шлаковые включения при таком формировании соединения оттесняются на периферию поры, а зона линии соединения формируется из расплава, в котором отсутствуют шлаковые включения. Таким образом, дефект типа поры со шлаковыми включениями при возможности оттеснения расплава шлака от зоны соединения ведет себя аналогично искусственному дефекту и существенно не снижает механические свойства образцов при статических испытаниях.



Рис. 6. Микроструктура (×25) соединения в зоне естественного дефекта

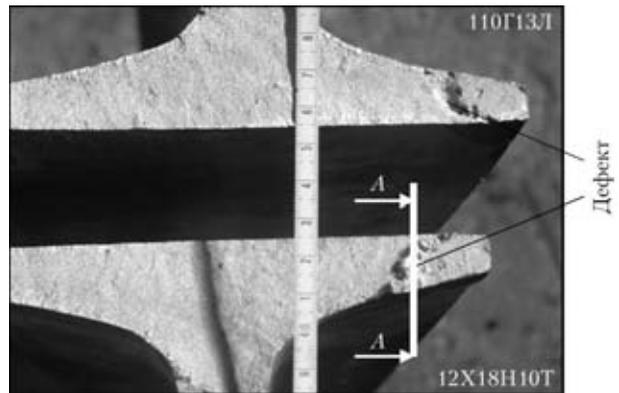


Рис. 7. Внешний вид дефектов в изломе образца (А-А — схема вырезки шлифа из образца)

На рис. 7 показан внешний вид естественного дефекта в изломе образца. Разрушение образца произошло по линии соединения 110Г13Л + 12Х18Н10Т при усилии 800 кН и стреле прогиба 12 мм. Основной причиной разрушения образца при низких показателях механических свойств является наличие дефекта типа непровара [4]. Проведенный до сварки радиографический контроль выявил дефект в отливке (литейная пора). При оплавлении произошло его заполнение расплавом свариваемых сталей 110Г13Л и 12Х18Н10Т и оттеснение шлакового расплава в периферийную часть поры. Деформация при осадке из-за недостатка объема поры привела к вдавливанию шлакового расплава и его растворению в расплаве свариваемых металлов, а при кристаллизации объема образовались усадочные рыхлости, которые плохо обнаруживаются при радиографическом контроле соединений, особенно при больших толщинах просвечиваемых металлов.

На рис. 8 представлена микроструктура соединения в зоне дефекта и в бездефектной области сварного шва со стороны стали 12Х18Н10Т. Как видно, разрушение происходит по линии соединения 110Г13Л + 12Х18Н10Т, а в зоне дефекта происходит вырыв по дну первоначальной поры, где наблюдается максимальная концентрация шлаковых включений.

В заключение следует отметить, что проведенные металлографические исследования сварных соединений показали, что литейные дефекты (раковины, поры) практически не увеличивают своих размеров при пластической деформации, что является положительным фактором для проведения входного радиографического контроля отливок перед сваркой. При контроле сварного соединения дефекты в отливках, размеры которых меньше предела чувствительности радиографического контроля, выявлены не будут, а после сварки их размеры не увеличатся.

При попадании в зону сварного соединения литейного дефекта (раковина или пора со шла-

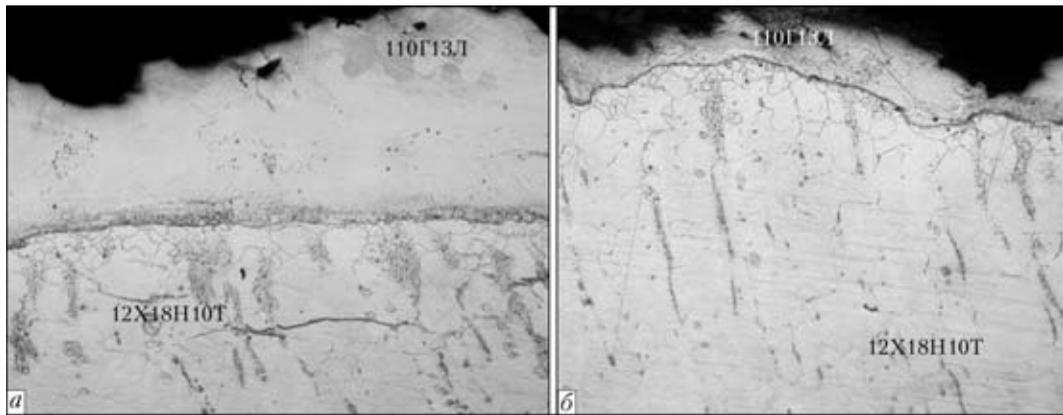


Рис. 8. Микроструктуры ( $\times 100$ ) соединения 12X18H10T + 110Г13Л после разрушения образца при испытаниях со стороны стали 12X18H10T: а — зона дефекта, вырыв по литейной раковине; б — бездефектная зона, разрушение по линии соединения

ковыми включениями) возможны два варианта образования сварочного дефекта:

при первом, когда размеры дефекта позволяют вытеснить шлаковые включения в виде расплава на периферию поры, зона соединения формируется из расплава, в котором отсутствуют шлаковые включения. Такие дефекты в сварном шве хорошо определяются радиографическим контролем из-за наличия шлаковых пустот, но они существенно не снижают механические свойства образцов при статических испытаниях;

при втором, когда размеры дефекта не позволяют вытеснить шлаковые включения в виде расплава на периферию поры, при деформации из-за недостатка объема поры происходит вдавливание шлакового расплава и его растворение в расплаве свариваемых металлов, что при кристаллизации объема приводит к образованию усадочных рыхлостей, которые не обнаруживаются при радиографическом контроле соединений. Такие дефекты приводят к недопустимому снижению механических свойств сварных соединений.

Радиографический контроль концов отливок сердечников крестовин, которые подлежат кон-

тактной стыковой сварке, позволяет выявить дефекты литья, а также провести их ремонт перед сваркой, что в сочетании с входным ультразвуковым контролем рельсовых окончаний и промежуточной вставки обеспечит гарантированное качество входных материалов для сварки. Система контроля параметров режима сварки позволяет гарантировать требуемое качество сварных соединений при использовании контроля входных материалов для сварки. В этой связи радиографический контроль сварных швов крестовин после контактной стыковой сварки не является целесообразным.

1. Контактная стыковая сварка железнодорожных крестовин с рельсовыми окончаниями через промежуточную вставку / С. И. Кучук-Яценко, Ю. В. Швец, Е. А. Думчев и др. // Автомат. сварка. — 2005. — № 1. — С. 6–9.
2. Пат. 46820 Україна. Спосіб контактного стыкового зварювання / С. І. Кучук-Яценко, О. В. Дідковський, М. В. Богорський та ін. — Опубл. 17.06.02.
3. ТУ У 27.3-26524137-1342:2006. Хрестовини та сердечники з привареними рейковими закінченнями типів Р65, Р50 та УІС60. — Чинний з 2006 р.
4. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.

The paper deals with the features of defects formation in flash-butt welds of cast blanks from 110G13L steel with austenitic rolled blanks from 12Kh18N10T steel, which are used in manufacturing of welded railway frogs. It is established that casting defects, when located in the butt weld zone, lead to formation of defects in it and depending on their formation, affect the strength properties of welded joints.

Поступила в редакцию 10.02.2011



УДК 621.791.75

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ $\sigma$ -ФАЗЫ В ЗТВ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДУПЛЕКСНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **С. С. КОЗЛИТИНА**, **Л. И. ДЗЮБАК**, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложен численный алгоритм расчета содержания  $\sigma$ -фазы в металле зоны термического влияния многопроходных стыковых соединений дуплексной стали DSS 2205. Используются экспериментальные температурно-временные диаграммы образования  $\sigma$ -фазы в изотермических условиях при разной температуре в сочетании с термическими циклами точек ЗТВ соединений.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, дуплексные стали, стыковые соединения, зона термического влияния,  $\sigma$ -фаза, температурно-временная диаграмма

В последние десятилетия хромоникелевые дуплексные стали находят все более широкое применение в технике благодаря своим свойствам, обусловленным исходной структурой (50 мас. % феррита и 50 мас. % аустенита). В связи с высокой стойкостью к межкристаллитной питтинговой коррозии в агрессивной среде в сочетании с хорошей свариваемостью и сравнительно высоким сопротивлением разрушению, а также умеренной стоимостью этот класс нержавеющей сталей широко используют для создания ответственных конструкций различного назначения.

Однако наряду с приобретением указанных достоинств эти стали частично наследовали и недостатки нержавеющей сталей как аустенитного, так и ферритного классов. Наиболее существенным недостатком при исходном содержании феррита в структуре 50 мас. % является их чувствительность к температурному воздействию, когда происходит распад феррита с образованием  $\sigma$ -фазы, которая резко снижает механические свойства стали. Эта проблема достаточно хорошо изучена с позиций эксплуатационного нагружения конструкций из таких сталей. Построены соответствующие температурно-временные диаграммы (ТВД), позволяющие в изотермических условиях эксплуатации оценить вероятность появления интерметаллидных образований типа  $\sigma$ -фазы. Применительно к сварочному нагреву имеется ряд работ ([1] и др.), где этот вопрос исследуют экспериментально на образцах, вырезанных из металла зоны термического влияния (ЗТВ), что позволило сформулировать определенные ограничения на тепловложение при сварке [2]. Тем не менее в настоящее время отсутствует расчетная методика прогнози-

рования (с определенной достоверностью) степени влияния конкретных режимов и условий сварки на содержание  $\sigma$ -фазы в ЗТВ, что ограничивает эффективность прогнозных оценок при выборе технологических режимов и условий сварки конкретных узлов.

В настоящей работе сделана попытка разработать методику на основе расчетных термических циклов в конкретных точках ЗТВ и экспериментальных данных ТВД, построенной для конкретной стали. Идея такого подхода в определенной степени апробирована при прогнозировании степени сенсibilизации металла ЗТВ хромоникелевых сталей с повышенным содержанием углерода при образовании межкристаллитных коррозионных трещин.

В качестве объекта для разработки методики были выбраны образцы стыкового сварного соединения труб сечением 271×20 мм из дуплексной стали DSS 2205 следующего химического состава [3], мас. %: 22,43 Cr; 1,88 Ni; 3,13 Mo; 0,14 Mn; 0,07 Si; 0,18 N; 0,023 C. Указанный состав стали обеспечивает высокое сопротивление питтинговой коррозии в хлоридных растворах. Соответствующий эквивалент  $PRE = Cr + 3,3 \text{ мас. \% Mo} + 16 \text{ мас. \% N} = 35,64$ , что весьма близко к предельному значению  $PRE = 40$  [2]. Сталь DSS 2205 так же, как и другие дуплексные стали, в связи с высоким содержанием феррита (50 мас. %) чувствительна к нагреву свыше 475 °С, что проявляется в значительном охрупчивании. В дуплексных сталях при температуре более 538 °С происходит трансформация части феррита в  $\sigma$ -фазу, в которой сочетаются различные интерметаллиды, способствующие снижению пластичности сталей, а особенно при температурах ниже – 40 °С.

На рис. 1 на основании данных работы [2] представлено изменение положения границы ударной вязкости  $KCV = 27 \text{ Дж/см}^2$  стали DSS 2205 в зависимости от времени выдержки при различной

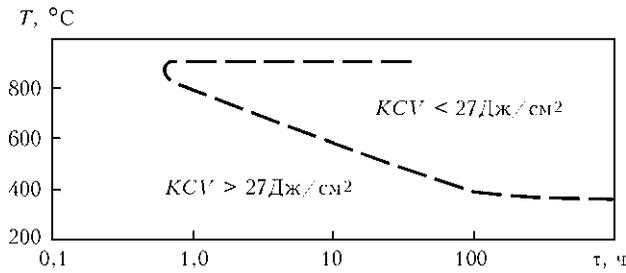


Рис. 1. Изменение положения границы ударной вязкости  $KCV = 27 \text{ Дж/см}^2$  стали DSS 2205 в зависимости от времени выдержки  $\tau$  при различной температуре

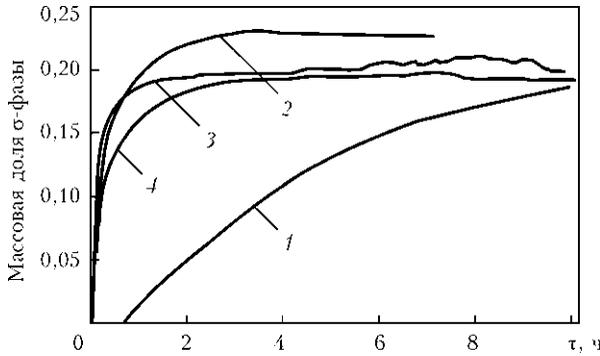


Рис. 2. Кинетика изменения содержания  $\sigma$ -фазы при изотермической выдержке образцов из стали DSS 2205 при температуре  $T = 700$  (1),  $750$  (2),  $800$  (3) и  $850$  °C (4) по результатам экспериментальных измерений

температуре. При наложении этих данных на экспериментальные данные [3] об изменении содержания  $\sigma$ -фазы в стали DSS 2205 (рис. 2, 3) видно, что снижение значения  $KCV$  происходит при содержании  $\sigma$ -фазы 15...18 мас. %.

На основании данных рис. 2, 3, полученных для конкретных термических циклов ЗТВ  $T(\tau)$ , можно рассчитать  $V$   $\sigma$ -фазы, мас. %:

$$V = \sum_j \int_{T_H}^{T_K} \frac{(V_j - V_{j-1}) V_j^{\max}(T)}{\tau_j(T) - \tau_{j-1}(T)} dt'(T),$$

где  $j = 1, \dots, 7$  — номер С-образных кривых (рис. 3);  $V_j = 1, 10, 25, 50, 75, 90, 99$  мас. % — «цена» этой кривой от максимального значения  $V^{\max}(T)$  при  $T_H > T > T_K$  (здесь  $T_H, T_K$  — температура соответственно начала и конца прослеживания термического цикла  $T(t')$ );  $t'$  — текущее время.

При выборе режимов многопроходной дуговой сварки плавлением использовали рекомендацию работы [2] относительно подводимой погонной электрической энергии

$$H = 60 \frac{IU}{v},$$

где  $I$  — сварочный ток;  $U$  — напряжение на дуге;  $v$  — скорость сварки. Согласно [2] значения  $H$  находятся в пределах  $512 <$

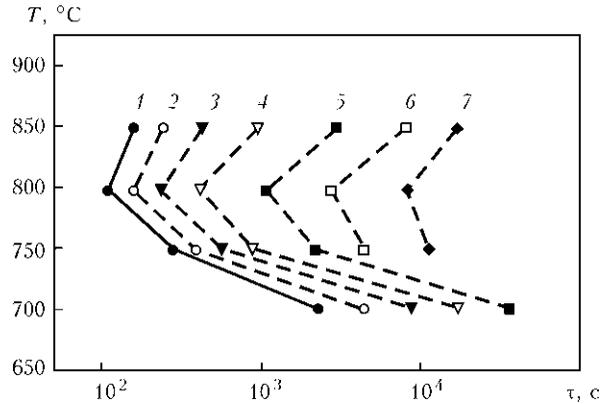


Рис. 3. С-образные кривые изменения содержания  $\sigma$ -фазы в зависимости от температуры  $T$  и времени выдержки  $\tau$ : 1 — 1; 2 — 10; 3 — 25; 4 — 50; 5 — 75; 6 — 90; 7 — 99 мас. %

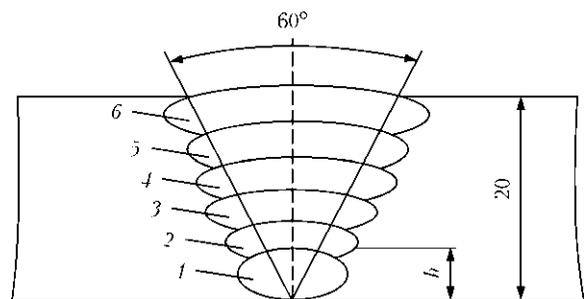


Рис. 4. Схема послойной сварки стыкового соединения многопроходной дуговой сваркой: 1–6 — количество проходов

$< H < 2520$  Дж/мм при условии применения перед каждым проходом предварительного подогрева ( $T_0 = 150$  °C).

Рассмотрим следующие варианты режимов сварки стыковых соединений за шесть проходов (рис. 4). Сечение каждого валика равно  $F = 25...35$  мм<sup>2</sup>. Толщина (высота) его  $h_i$  при угле разделки  $\alpha = 60^\circ$  изменяется в пределах  $7,0...1,8$  мм, а ширина  $a_i$  — в пределах  $7,0...20,0$  мм.

Результаты расчетов для указанных выше вариантов тепловложения приведены на рис. 5–7. Из полученных данных следует, что увеличение погонной энергии до  $q_n \leq 1700$  Дж/мм при  $T_0 = 20$  °C оказывает незначительное влияние на содержание  $\sigma$ -фазы при сварке рассматриваемого соединения. Однако при более высоком тепловложении ( $q_n > 3000$  Дж/мм) содержание  $\sigma$ -фазы металла ЗТВ приближается к уровню, при кото-

Результаты расчета содержания  $\sigma$ -фазы

№ варианта режима сварки	Способ сварки	$H$ , Дж/мм	$\eta_n$	$q_n$ , Дж/мм	$T_0$ , °C	$V^{\max}$ , мас. %
1	МИГ	2270	0,75	1700	20	1,0...1,2
2		2270	0,75	1700	150	2,0...2,4
3	ТИГ	5000	0,60	3000	20	3,5...4,0
4		5000	0,60	3000	150	5,6...6,4

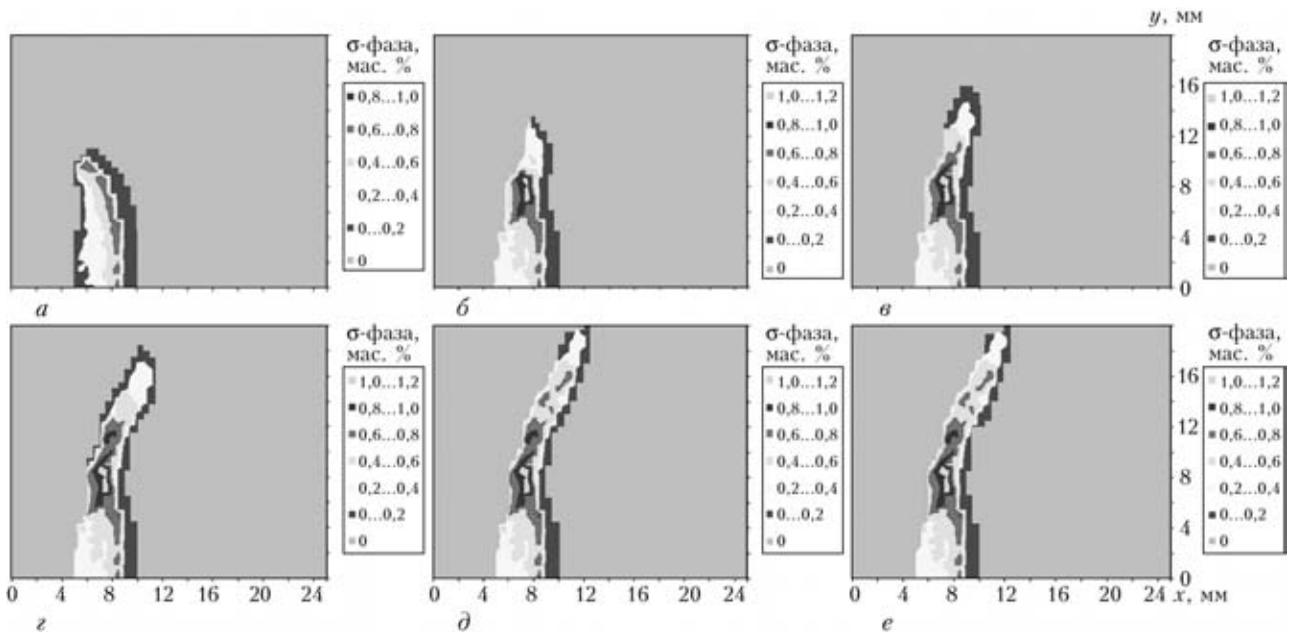


Рис. 5. Накопление  $\sigma$ -фазы в металле ЗТВ стыкового шва трубы Ду 270×20 мм, выполненного дуговой сваркой при  $q_{II} = 1700$  Дж/мм и  $T_0 = 20$  °С: а–е — соответственно после 1–6-го проходов

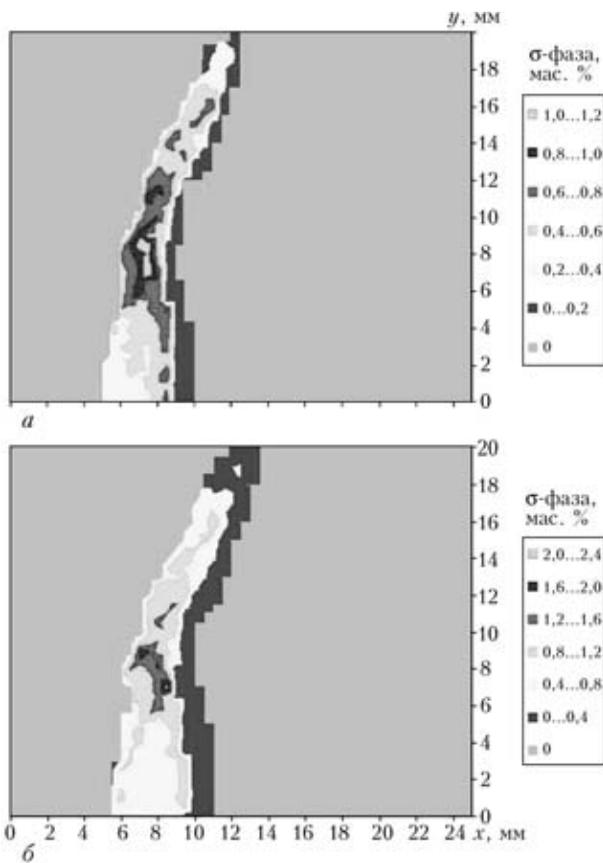


Рис. 6. Распределение  $\sigma$ -фазы в металле ЗТВ и стыкового шва трубы Ду 270×20 мм из стали DSS 2205, выполненного шестипроходной дуговой сваркой МИГ (после 6-го прохода) при  $q_{II} = 1700$  Дж/мм: а —  $T_0 = 20$ ; б — 150 °С

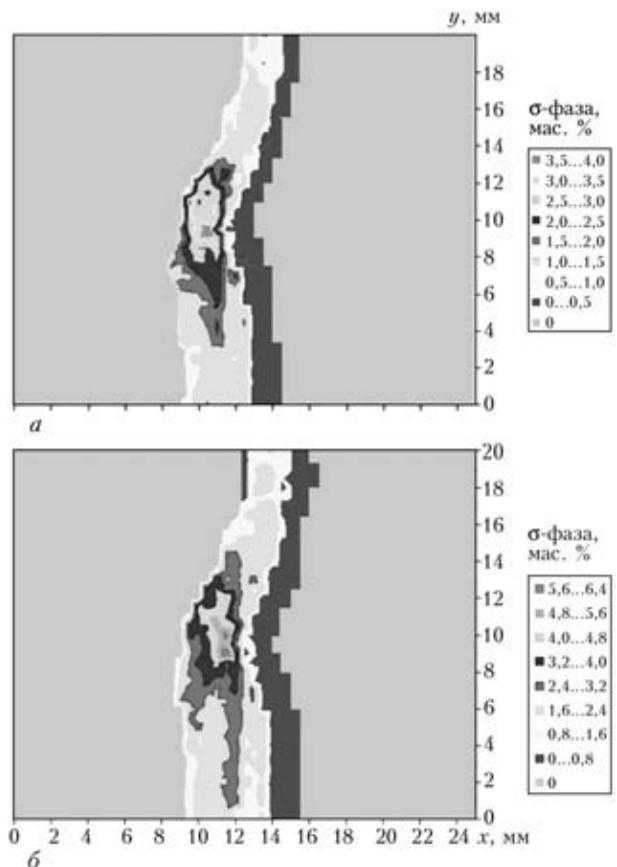


Рис. 7. Распределение  $\sigma$ -фазы в металле ЗТВ и стыкового шва трубы Ду 270×20 мм из стали DSS 2205, выполненного шестипроходной дуговой сваркой ТИГ (после 6-го прохода) при  $q_{II} = 3000$  Дж/мм: а, б — см. рис. 6

ром, согласно рис. 1–3, значение ударной вязкости снижается до 27 Дж/см<sup>2</sup>, что почти на порядок ниже таковой при отсутствии  $\sigma$ -фазы в металле ЗТВ стыкового соединения указанной стали. При-

веденные данные свидетельствуют о влиянии предварительного подогрева (температуры между двумя смежными проходами) на интенсивность образования  $\sigma$ -фазы в металле ЗТВ, от которой



зависит сохранение пластичности соединения при последующих технологических обработках либо эксплуатации. Отсюда следует, что ремонт сварных соединений дуплексных сталей, при котором в металле ЗТВ происходит накопление  $\sigma$ -фазы, требует осторожности и соответствующих прогнозных оценок. Получаемые на основе предлагаемой методики оценки (таблица) достаточно хорошо согласуются с рекомендациями работы [2] относительно ограничений тепловложений при сварке сталей рассматриваемого класса.

#### Выводы

1. Образование  $\sigma$ -фазы способствует резкому снижению пластичности дуплексных сталей при термическом воздействии, в том числе и при сварке,

и тем самым ограничивает использование этих материалов в современных конструкциях.

2. С помощью стандартных ТВД возможно достаточно эффективно прогнозировать содержание  $\sigma$ -фазы в металле ЗТВ при сварочном термическом цикле многопроходной сварки дуплексных сталей.

1. Palmer T. A., Elmer J. W., Wong J. In-site observations of ferrite-austenite transformations in duplex stainless steel weldments using synchrotron radiation // Sci. and Techn. of Welding and Joining. — 2002. — 7, № 3. — P. 159–171.
2. Welding Handbook. Vol. 4: Materials and Applications, pt 2. — Miami: AWS, 1998. — 621 p.
3. Elmer J. W., Palmer T. A., Specht E. D. Synchrotron based observations of sigma phase formation and dissolution in duplex stainless steel // Mathematical modeling of weld phenomena / Ed. H. Cerjak. — London: Manet publ., 2002. — P. 297–314.

Numerical algorithm is suggested for calculation of content of the  $\sigma$ -phase in HAZ metal of the multi-pass butt welded joints on duplex steel DSS 2205. Experimental temperature-time diagrams of formation of the  $\sigma$ -phase under isothermal conditions at different temperatures are used in combination with thermal cycles at points in HAZ of the welded joints.

Поступила в редакцию 04.11.2010

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА: СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ»

К 100-летию со дня рождения заслуженного деятеля  
науки и техники Украины,  
доктора технических наук Г. З. ВОЛОШКЕВИЧА

октябрь 2010

г. Киев ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

#### Тематика конференции:

- Технологические особенности электрошлаковой сварки
- Современное оборудование для ЭШС
- Применение электрошлаковой сварки и наплавки при изготовлении и ремонте промышленных изделий

#### Организаторы конференции:

- Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
- Общество сварщиков Украины при поддержке ЗАО «НКМЗ», ОАО «Азовмаш», ОАО «Сумское МПО им. Фрунзе»

Контакты: тел./факс: 044-205-22-29, 044-200-24-96  
e-mail: tzu@e-mail.ua



## ИНДУКЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОТОКАМИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

А. С. ПИСЬМЕННЫЙ, д-р техн. наук, В. М. БАГЛАЙ, А. А. ПИСЬМЕННЫЙ, кандидаты техн. наук, С. В. РЫМАР, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы электродинамические процессы, происходящие в расплавленном металле на горизонтальной поверхности металлического изделия в магнитном поле индуктора. Определены условия интенсификации потоков жидкого металла при локальной обработке металлических поверхностей. Приведены формулы для расчета индукционной системы.

*Ключевые слова:* индукционный нагрев, обработка металла, интенсифицированные потоки жидкого металла, электродинамические процессы, расчеты

При локальном переплаве поверхностного слоя металлических изделий, устранении дефектов на их поверхностях, местном легировании, наплавке выступающих элементов и их ремонте, помимо известных электрометаллургических технологий обработки и наплавки металла, перспективно и актуально применение индукционного нагрева [1–7].

Индукционный нагрев является экологически чистым процессом, позволяющим воздействовать на движение потоков расплавленного металла и управлять вкладываемой мощностью при нагреве. До сих пор индукционный нагрев для указанных целей применяли ограниченно в связи с большими затратами электроэнергии. Одним из эффективных способов уменьшения энергозатрат и повышения производительности обработки поверхностей металлических изделий при индукционном нагреве является интенсификация потоков расплавленного металла в тигле, размещенном над обрабатываемым изделием. При этом увеличивается теплообмен между уже расплавленным металлом в тигле и металлом изделия, подлежащим плавлению, что способствует уменьшению времени плавления и вкладываемой мощности.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан способ [8] интенсификации потоков расплавленного металла в тигле, направленных на обрабатываемую поверхность металлического изделия при индукционном нагреве.

Целью настоящей работы является исследование электродинамических процессов в жидком металле, который удерживается тиглем на горизонтальной поверхности металлического изделия в магнитном поле индуктора, и определение условий интенсификации потоков расплавленного металла при локальной обработке металлических поверхностей.

Согласно теореме Гельмгольца, любое непрерывное векторное поле можно представить в виде суммы потенциальной и вихревой составляющих [9]. Таким образом, плотность электромагнитных сил вектора  $\mathbf{F}$ , вызывающих движение электропроводящей жидкости (расплавленного металла) в открытом тигле, имеет потенциальную и вихревую составляющие, соотношение между которыми в разных точках объема жидкости различное. В замкнутом объеме (закрытом тигле) на движение электропроводящей жидкости оказывает влияние только вихревая составляющая электромагнитных сил.

Характеристикой способности магнитного поля создавать движение расплава по некоторому контуру длиной  $l_i$  является циркуляция  $C_i$  вектора силы  $\mathbf{F}$  по этому контуру (без учета гидродинамических особенностей) [6]:

$$C_i = \oint_{l_i} \mathbf{F} dl = \int_{S_i} \text{rot}_n \mathbf{F} dS,$$

где  $S_i$  — площадь поверхности, опирающейся на контур длиной  $l_i$ ;  $n$  — индекс, которым обозначены нормальные к поверхности площади  $S_i$  компоненты величин.

В тиглях классических индукционных печей (рис. 1, а) существуют два вихревых потока расплавленного металла — верхний и нижний [5–7]. Причем направления циркуляции в них электропроводящей жидкости противоположны, поскольку противоположны направления сил, вызывающих их. Интенсивность движения вихревых потоков расплавленного металла зависит от приложенных к нему сил, гидродинамического сопротивления их движению и формы тигля. При отсутствии механических препятствий область, охваченная движением расплавленного металла, может выходить за пределы зоны действия сил  $\mathbf{F}$ , возбудивших это движение.

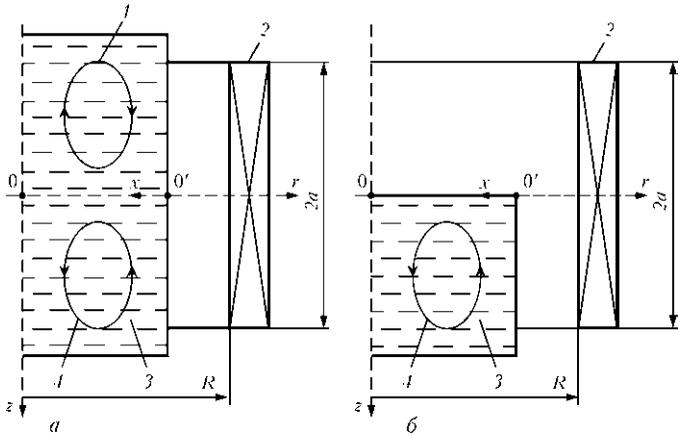


Рис. 1. Схема движения потоков расплавленного металла при классическом (а) и предложенном расположении индуктора (б): 1, 4 — соответственно верхний и нижний вихрь потока; 2 — индуктор; 3 — расплавленный металл

При неравномерном распределении объемной плотности электромагнитной силы, например, при наличии асимметрии магнитного поля, интенсивность потока расплавленного металла будет больше в области действия больших сил  $F$  и больших значений  $C_i$ . Причиной асимметрии магнитного поля может быть неравномерность зазора между индуктором и ванной жидкого металла, асимметрия распределения плотности тока в индукторе, смещение тигля относительно индуктора и форма тигля. Так, при цилиндрическом индукторе и закругленном снизу тигле наибольшее значение магнитной индукции достигается в широкой части тигля, где расстояние между индуктором и тиглем меньше. Это увеличивает относительное значение  $C_i$  и протяженность вихревой зоны силового поля, действующего в узкой нижней части тигля. Условия для движения потоков расплавленного металла более благоприятны в широкой верхней части тигля, что подтверждается экспериментальными данными [3]. Однако при обработке изделий только изменения формы тигля недостаточно для существенной интенсификации потоков расплавленного металла.

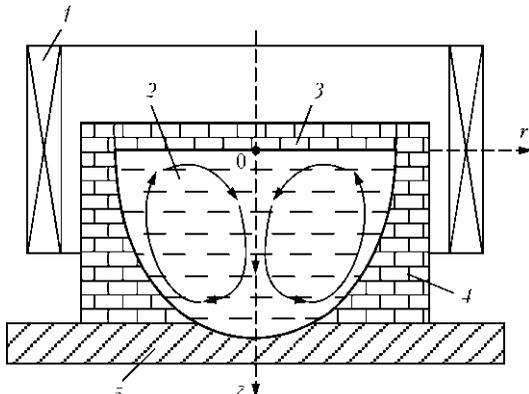


Рис. 2. Схема движения потоков расплавленного металла в тигле при обработке изделий предложенным способом: 1 — индуктор; 2 — расплавленный металл; 3 — крышка тигля; 4 — тигель; 5 — изделие

Для более эффективного использования вихревых потоков расплавленного металла при обработке металлических изделий необходимо обеспечить в тигле наличие одного мощного потока (одноконтурное движение расплава), направленного в осевую часть тигля (ось  $z$  на рис. 1, а) в сторону обрабатываемого изделия. Одноконтурное движение потока возникает в случае, когда во всем объеме расплавленного металла существует лишь одна вихревая зона силового поля, что имеет место в жидкой ванне при кристаллизации слитка в индукционных печах с холодным тиглем или в электромагнитном кристаллизаторе.

Экспериментально установлено, что наиболее просто и эффективно одноконтурное движение расплавленного металла можно ре-

ализовать за счет взаимного смещения индуктора и тигля вдоль их вертикальной оси симметрии. При этом первый вихревой контур усиливается и увеличивается, а второй — ослабляется и уменьшается до полного исчезновения. Нижний контур можно еще более усилить за счет округления дна тигля (рис. 2). На этом рисунке представлена схема тигля, имеющего форму парабола вращения, который опирается открытой узкой нижней частью на обрабатываемое изделие. Кольцевой цилиндрический индуктор, воздействующий своим переменным электромагнитным полем на расплавленный металл в тигле, размещен в его верхней широкой части.

Из работы [6] следует, что тангенциальные электродинамические силы имеют второстепенное значение при циркуляции металла (менее 3 % вклада в  $C_i$ ), а основной вклад вносят силы, направленные нормально к поверхности, наличие которых обусловлено электромагнитным давлением поля индуктора на металл. Основываясь на этом факте, воспользуемся законом Максвелла-Лоренца, с помощью которого находится зависимость плотности сил  $F$  в форме векторного произведения плотности тока  $J$  и магнитной индукции  $B$  [10]:

$$F = [JB],$$

где  $J = E/\rho$ ;  $B = \mu H$ ;  $E, H$  — напряженность соответственно электрического и магнитного полей;  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление;  $\mu$  — магнитная проницаемость металла (выше точки Кюри она равна магнитной постоянной  $\mu_0$ ).

Рассмотрим процессы, происходящие при квазистационарном во времени переменном электромагнитном поле, при котором можно использовать метод комплексных амплитуд.

Комплексные составляющие напряженности магнитного  $H_e$  и электрического  $E_e$  полей волны, проходящей в глубь металла, могут с достаточной



точностью быть выражены через комплексное значение напряженности магнитного поля  $\underline{H}$ , которые генерируются индуктором в окружающем пространстве и на поверхности жидкого металла [10]:

$$\begin{cases} \underline{H}_e \approx 2\underline{H} \exp(-jkx); \\ \underline{E}_e = 2\underline{H} \underline{Z}_e \exp(-jkx), \end{cases}$$

где  $j = \sqrt{-1}$ ;  $jk = (1 + j) \sqrt{\omega\mu_0/(2\rho)} = (1 + j)b$ ;  $b = \sqrt{\omega\mu_0/(2\rho)}$ ;  $\underline{Z}_e = \sqrt{j\omega\mu_0\rho}$  — нормальный поверхностный импеданс или волновое сопротивление металла;  $x$  — текущие координаты точек, лежащих на нормали, направленной от поверхности в глубь металла (см. рис. 1);  $\omega$  — угловая частота изменения магнитного поля.

Если для мгновенных значений напряженности магнитного и электрического полей волны, проходящей в глубь металла, выбрать начальную фазу  $H_e$  так, чтобы амплитудное значение комплексной величины  $\underline{H}_m$  равнялось скалярной величине  $H_m$ , то их можно представить в виде [10]

$$\begin{cases} H_e = 2H_m \exp(-bx) \sin(\omega t - bx), \\ E_e = 2H_m \sqrt{\omega\mu_0\rho} \exp(-bx) \sin(\omega t + \pi/4 - bx). \end{cases}$$

Сила  $F_{e,x}$ , действующая на единицу поверхности металла, равна [10]

$$\begin{aligned} F_{e,x} &= E_e \mu_0 H_e / \rho = \\ &= 4H_m^2 \mu_0 \sqrt{\omega\mu_0\rho} \exp(-2bx) \sin(\omega t - bx) \sin(\omega t + \pi/4 - bx). \end{aligned}$$

Среднее значение силы  $F_e$  за период  $2\pi/\omega$  составляет

$$F_e = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} F_{e,x} dt = H_m^2 \mu_0 \sqrt{2\omega\mu_0\rho} \exp(-2bx).$$

В связи с тем, что наличие экспоненциального множителя в этом выражении приводит к быстрому убыванию плотности сил с возрастанием  $x$ , эти силы можно считать сосредоточенными на поверхности металла (наличие скин-эффекта) и заменить их давлением  $p_e$ , приложенным к поверхности

$$p_e = \int_0^\infty F_e dx = H_m^2 \mu_0 \sqrt{2\omega\mu_0\rho} / 2b = \mu_0 H_m^2.$$

В полученных выражениях целесообразно перейти от напряженности магнитного поля  $H$ , имеющей две компоненты — аксиальную и радиальную, — к напряженности электрического поля  $E$  и векторному потенциалу магнитного поля  $A$ , имеющего в данном случае одну азимутальную ком-

поненту поля  $\underline{E} = -j\omega\underline{A}$  для кольцевого замкнутого тока [4].

Принимая во внимание, что

$$\underline{H}_e \approx 2\underline{H} \approx 2\underline{E} / \underline{Z}_e = -2j\omega\underline{A} / \underline{Z}_e,$$

отсюда  $\underline{H} \approx -j\omega\underline{A} / \underline{Z}_e$ , при принятой выше начальной фазе изменения мгновенных значений напряженности магнитного поля для их скалярных значений (амплитуд) можно записать  $H_m \approx \omega A_m / Z_e = A_m \sqrt{\omega/(\mu_0\rho)}$ . При этом сила  $F_e$  и давление  $p_e$  вычисляются по формулам [5]

$$\begin{aligned} F_e &= (\omega A_m^2 \sqrt{2\omega\mu_0\rho} / \rho) \exp(-2bx), \\ p_e &= \omega A_m^2 / \rho. \end{aligned}$$

Электромагнитное поле индуктора может быть описано с помощью скалярного значения векторного потенциала магнитного поля  $A$ , источником которого служит ток  $I$ , распределенный с линейной плотностью  $\delta = wI/2a$  вдоль поверхности тонкостенного соленоида с количеством витков  $w$ , радиусом  $R$  и длиной  $2a$  (при  $r \leq R$ ) [11, 12]. В этом случае векторный потенциал магнитного поля  $A$  имеет вид

$$A = \frac{\mu_0 R w I}{\pi a} \int_0^\infty I_1(\lambda r) K_1(\lambda R) \sin(\lambda a) \cos(\lambda z) \frac{d\lambda}{\lambda},$$

где  $\lambda$  — переменная интегрирования, эквивалентная пространственной частоте гармоник электромагнитного поля соленоида;  $I_1, K_1$  — модифицированные функции Бесселя 1-го и 2-го рода первого порядка;  $r, z$  — координаты точки наблюдения от начала осей  $r, z$ . При  $r \geq R$  аргументы функций Бесселя нужно поменять местами.

Аксиальная и радиальная компоненты вектора напряженности магнитного поля определяются из уравнения  $\mathbf{H} = \mu_0^{-1} \text{rot } \mathbf{A}$ , записанного в цилиндрической системе координат (при  $r \leq R$ ) [11, 12]:

$$\begin{aligned} H_a &= \frac{R w I}{\pi a} \int_0^\infty I_0(\lambda r) K_1(\lambda R) \sin(\lambda a) \cos(\lambda z) d\lambda, \\ H_r &= \frac{R w I}{\pi a} \int_0^\infty I_1(\lambda r) K_1(\lambda R) \sin(\lambda a) \cos(\lambda z) d\lambda. \end{aligned}$$

Во избежание вычисления несобственных интегралов ядро интегралов в этих выражениях с погрешностью менее 1% можно аппроксимировать во всем диапазоне изменения переменных следующей формулой (при  $r \leq R$ ) [11, 12]:



$$I_1(\lambda r)K_1(\lambda R) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{r}{R} \exp(-0,4\lambda R) + \frac{1}{\lambda R} \left( 1 - \exp \left[ -\lambda R \left( 1 - \frac{r}{R} \right) \right] \right) \frac{\sqrt{r}}{R} \right\}.$$

Используя данную аппроксимацию, получим для расчета скалярного значения векторного потенциала магнитного поля  $A$  (при  $r \leq R$ ) [11] следующее выражение:

$$A = \frac{\mu_0 R I}{4\pi a} \left\{ \frac{r}{R} \left( \operatorname{arctg} \frac{a+z}{0,4R} + \operatorname{arctg} \frac{a-z}{0,4R} \right) + \frac{1-r/R}{\sqrt{r/R}} \times \right. \\ \left. \times \left[ \operatorname{arctg} \frac{a+z}{R-r} + \operatorname{arctg} \frac{a-z}{R-r} + \frac{a+z}{2R} \times \right. \right. \\ \left. \left. \ln \left[ 1 + \left( \frac{R-r}{a-z} \right)^2 \right] + \frac{a-z}{2R} \ln \left[ 1 + \left( \frac{R-r}{a-z} \right)^2 \right] \right] \right\},$$

а для напряженности магнитного потока индуктора  $H_r$  (при  $r \leq R$ )

$$H_r = \frac{wI}{2\pi a} \left\{ \frac{0,8Razr}{[(0,4R)^2 + (a-z)^2][(0,4R)^2 + (a+z)^2]} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{r}{R}} \left[ \ln \left( 1 + \left( \frac{R-r}{a-z} \right)^2 \right) - \ln \left( 1 + \left( \frac{R-r}{a+z} \right)^2 \right) \right] \right\}.$$

При  $r \geq R$  в полученных формулах вместо отношения  $r/R$  и разности  $R-r$  следует записать  $R/r$  и  $r-R$ .

Из полученных выражений можно заключить, что напряженность магнитного потока  $H_r$  равна нулю вдоль его горизонтальной плоскости симметрии независимо от расстояния, на котором точка наблюдения находится от индуктора (см. рис. 1, а). В любом другом месте напряженность магнитного потока возрастает от нуля до максимума (ближе к индуктору), а затем убывает при возрастании значения  $r$ . Поэтому электромагнитное давление, обусловленное силами, связанными с напряженностью магнитного поля  $H_r$ , выше горизонтальной плоскости симметрии индуктора (см. рис. 1, а), увеличивается от нуля на вертикальной оси симметрии тигля с расплавом до максимального значения на его крае. При этом движение расплавленного металла происходит вдоль стенок тигля вниз и вдоль вертикальной оси симметрии тигля вверх. В исследуемом процессе обработки металла такое направление движения расплавленного металла является неблагоприятным. Для его подавления необходимо расположить индуктор так, чтобы его горизонтальная плоскость симметрии совпадала с поверхностью расплавленного металла (см. рис. 1, б). При этом остается только один полезный вихревой поток расплавленного металла, направленный вдоль вертикальной плоскости симметрии тигля вниз на обрабатываемое изделие и вдоль стенок тигля вверх.

Такое расположение индуктора приводит к интенсификации вихревых потоков расплавленного металла в связи с отсутствием давления металла верхнего вихря на металл нижнего. При этом потребляемая индукционной системой электрическая мощность расходуется только на создание одного полезного вихревого потока расплавленного металла. За счет интенсификации этих потоков увеличивается теплообмен между расплавленным металлом в тигле и металлом изделия, подлежащим плавнению, что способствует уменьшению времени плавнения и вкладываемой мощности.

Электромагнитное давление на расплав оказывают также силы, направленные от боковой поверхности тигля к его вертикальной оси симметрии  $z$ , связанные с напряженностью магнитного потока индуктора  $H_a$ . Поскольку напряженность магнитного и электрического полей в этом случае имеют максимальные значения, то и электромагнитные силы будут наибольшими. Именно они способствуют формированию вихревых потоков в тигле в аксиальном направлении, образуя мениск на поверхности расплавленного металла. Для усиления давления вихревых потоков на обрабатываемое изделие целесообразно расположить у поверхности расплава ограничивающую стенку в виде крышки тигля (см. рис. 2), препятствующую подъему расплавленного металла. Для снижения относительного значения напряженности магнитного поля  $H_r$  в зоне тигля целесообразно применять индуктор, имеющий длину не меньше его диаметра. Все это повышает энергоэффективность индукционной системы.

В работе не рассматривались силы, действующие на верхнюю поверхность расплавленного металла, вызванные магнитным полем выступающей над поверхностью верхней части индуктора. Эти силы существенно убывают в направлении вертикальной оси симметрии индуктора  $z$ , а сам индуктор должен иметь длину больше своего диаметра. В первом приближении при расчете индуктора влиянием данных сил можно пренебречь.

При расчете индукционной системы используем приведенные выше формулы и методику расчета индуктора при нагреве торцевых частей труб из работы [11]. В нашем случае это небольшой отрезок трубы с очень малым внутренним диаметром, имитирующий сплошную цилиндрическую металлическую заготовку, которая нагревается в тигле индуктором.

Были спроектированы и изготовлены два индуктора — одновитковый и изготовлены два индуктора — одновитковый, состоящий из четырех параллельных проводников (обмоток) (четырёхобмоточный), и двухвитковый, состоящий из двух параллельных проводников (двухобмоточный [8]), высотой  $(80 \pm 5)$  мм, диаметром 190 мм, проводники которых выполнены из медных трубок сечением  $10 \times 15$  мм. Проводники каждого из

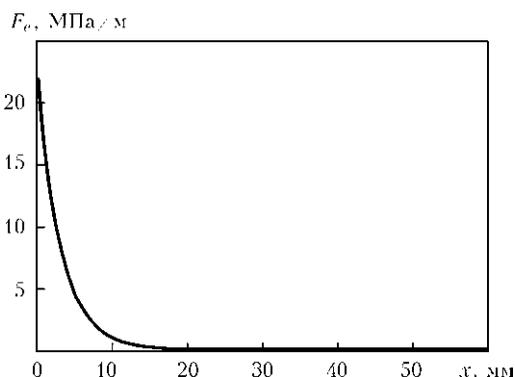


Рис. 3. Изменение силы  $F_e$  по глубине заготовки вдоль оси  $x$

индукторов включали параллельно и согласно. Напряжение с частотой 8 кГц для первого индуктора составляло 80, для второго — 160 В. Мощность индукторов была практически неизменной — 170...180 кВт. Такие конструкции индукторов позволили изменять в широком диапазоне массу изделия при плавлении и положение индуктора относительно расплавленного металла.

Изменение расчетной силы  $F_e$  при  $z = 0$  по глубине расплавленного металла вдоль оси  $x$  от 0 до  $R_n$  (при внутреннем радиусе тигля  $R_n = 60$  мм) приведено на рис. 3, из которого видно, что  $F_e$  убывает от края расплавленного металла к его центру. На рис. 4 показано изменение расчетного давления  $p_e$  на поверхности расплавленного металла при  $x = 0$  по высоте тигля вдоль оси  $z$  от 0 до 42,5 мм. Давление  $p_e$  имеет наибольшее значение по центру индуктора у верхнего торца заготовки и уменьшается по направлению к ее нижнему торцу (см. рис. 1, б), что способствует образованию вихревых потоков расплавленного металла в тигле.

Результаты испытаний индукционной установки при обработке металлических пластин различной толщины описаны в работе [8].

Таким образом, на основании проведенных исследований определен способ интенсификации вихревых потоков в тигле, повышения теплообмена между последним и обрабатываемой поверхностью изделия при его локальной обработке, а также проплавляющей способности и уменьшения энергозатрат. Для этого следует расположить индуктор так, чтобы горизонтальная ось симметрии индуктора совпадала с верхней поверхностью расплавленного металла в тигле с закругленным дном, не допускать подъема жидкого

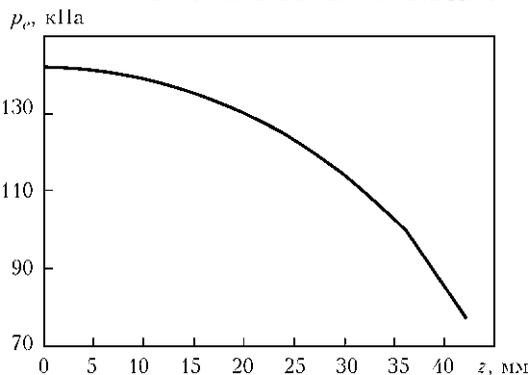


Рис. 4. Изменение давления  $p_e$  на поверхности расплавленного металла по высоте заготовки вдоль оси  $z$

металла за счет применения ограничивающей крышки и использовать индуктор длиной не меньше его диаметра.

1. Фарбман С. А., Колобнев И. Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1968. — 482 с.
2. Тур Л. Л. Обжатиe расплава электромагнитным полем в плавильных электропечах // Магнит. гидродинамика. — 1971. — № 1. — С. 138–144.
3. Свило А. В., Тур Л. Л. Влияние геометрических параметров магнитной системы на движение расплава в индукционной печи // Там же. — 1973. — № 3. — С. 144–146.
4. Фомин Н. И. Определение параметров системы индуктор–тигель–садка в индукционных печах с холодным тиглем // Исследования в области промышленного нагрева: Тр. ВНИИЭТО. — 1975. — Вып. 7. — С. 65–71.
5. Тур Л. Л. Управление распределением скоростей движения расплава в тигле индукционной печи // Там же. — С. 72–77.
6. Тур Л. Л., Губченко А. П. Индукционные плавильные печи для процессов повышенной точности и чистоты. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 120 с.
7. Furui M., Kojima Yo, Matsuo M. Fabrication of small aluminum ingot by electromagnetic casting // ISIJ Intern. — 1993. — 33, № 3. — P. 400–404.
8. Интенсификация потоков расплавленного металла в жидкой ванне при индукционном нагреве / А. С. Письменный, В. М. Баглай, А. А. Письменный, С. В. Рымар // Современ. электрометаллургия. — 2010. — № 2. — С. 34–39.
9. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. — М.: Наука, 1977. — 942 с.
10. Нетушил А. В., Поливанов К. М. Основы электротехники. — Ч. 3: Теория электромагнитного поля. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. — 192 с.
11. Письменный А. С., Прокофьев А. С., Шинлов М. Е. Синтез индукционных систем для пайки фланцевых соединений труб по заданному распределению мощности в зоне шва // Автомат. сварка. — 1999. — № 8. — С. 17–21.
12. Письменный А. С. Индукционный нагрев для сварки и родственных технологий / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Изд. Ин-та электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 2005. — 140 с.

Electrodynamics processes occurring in molten metal on the horizontal surface of metal product in the inductor magnetic field were studied. Conditions of intensification of liquid metal flows at local treatment of metallic surfaces are determined. Formulas for calculation of induction system are given.

Поступила в редакцию 08.06.2010



## ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МАССОПЕРЕНОСА ПРОЦЕССА СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ С ПОМОЩЬЮ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

С помощью модели процесса сварки трением с перемешиванием изучено влияние конструктивных размеров рабочих поверхностей бурта и наконечника инструмента на особенности перемещения материала в зоне термодинамического воздействия. Показано, что образование неразъемного соединения происходит благодаря перемещению наконечником инструмента определенного объема пластичного материала и его перемешивания по всей толщине кромок. Форма рабочей поверхности торца бурта инструмента предопределяет траекторию перемещения, скорость движения, равномерность смешивания и степень уплотнения соединяемых материалов при затвердевании.

*Ключевые слова:* сварка трением с перемешиванием, моделирование процесса, массоперенос, конструкция наконечника инструмента, рабочая поверхность бурта

Получение неразъемных соединений в твердой фазе сваркой трением с перемешиванием (СТП) для изготовления сварных конструкций начали применять еще в 1990-х годах. Широкое распространение этот способ сварки получил при соединении сплавов на основе алюминия и магния, которые отличаются высокой пластичностью в условиях низкотемпературного нагрева [1–4].

Формирование шва при СТП происходит при нагреве металла в зоне сварки за счет трения до пластического состояния и перемещения под высоким давлением в объеме, ограниченном рабочими поверхностями инструмента и подкладкой. Основными параметрами СТП являются конструктивные особенности и размеры рабочих поверхностей инструмента, его расположение относительно вертикальной оси и поверхностей свариваемых заготовок, прижатие инструмента и глубина проникновения его наконечника встык, а также скорость вращения  $\omega$  и линейного перемещения инструмента с определенной скоростью, равной скорости сварки  $v_{св}$  [5, 6]. Эти параметры определяют условия фрикционного нагрева металла в зоне сварки и существенно влияют на значение и ориентацию сил, действующих на пластифицированный металл, а также на скорость и траекторию его перемещения. Понимание закономерностей массопереноса в зоне образования неразъемного соединения очень важно для определения оптимальных конструктивных размеров инструмента и параметров процесса сварки, которые обеспечивают выполнение плотных качественных швов.

Первые представления о характере перемещения пластифицированного металла при СТП по-

лучены с помощью экспериментов, которые базируются на мгновенной остановке движущегося потока материала [7]. Траекторию его движения в характерных зонах соединений оценивали по изменению положения специальных маркеров (очень мелких стальных шариков, медных шпилек, медной или титановой фольги, тонкой вольфрамовой проволоки, прослойки композиционных материалов и др.), которые располагали в стыке между свариваемыми кромками или на прилегающих к нему участках [7–10]. Данные об особенностях перемещения металла можно также получить при сварке между собой алюминиевых сплавов различных систем легирования, имеющих разное травление [11], или значительно отличающихся по цвету разнородных материалов [12]. Однако все перечисленные выше способы оценки массопереноса, происходящего при СТП, довольно трудоемки, поскольку при их использовании требуется просвечивание полученных сварных соединений рентгеновским излучением или подготовка вырезанных из них шлифов полированием и травлением. С этой целью предложено смоделировать процесс СТП, используя в качестве соединяемых материалов разноцветные бруски пластилина. Сечения в различных плоскостях таких соединений, полученные с помощью натянутой стальной проволоки диаметром 0,15 мм, без какой-либо дополнительной подготовки позволяют проследить за перемещением соединяемых материалов в зоне воздействия на них рабочей поверхности инструмента.

Такая модель, в частности, позволяет оценить влияние конструктивных размеров рабочих поверхностей инструмента на особенности массопереноса в процессе СТП.

Бруски из пластилина различных цветов соединяли между собой встык линейными швами на разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона установке для сварки тонколистовых алюминиевых сплавов,

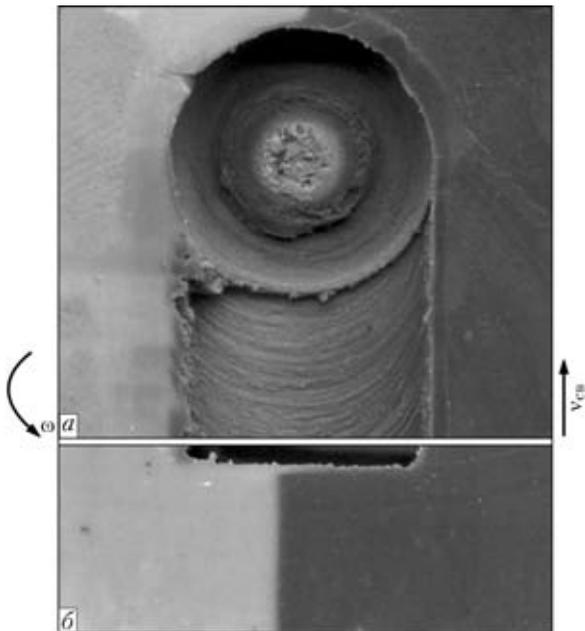


Рис. 1. Внешний вид лицевой поверхности (а) и поперечного сечения (б) соединения, полученного СТП с использованием инструмента без наконечника

а затем исследовали внешний вид и сечения полученных соединений. Результаты показали, что при использовании инструмента без проникающего наконечника образование шва по всей толщине свариваемых кромок не происходит (рис. 1). Шов формируется только непосредственно под торцевой поверхностью бурта при перемешивании очень тонкого слоя металла вследствие вращения и перемещения инструмента вдоль стыка.

Форма рабочей поверхности торца бурта инструмента практически не влияет на глубину шва,

но оказывает существенное влияние на условия смешивания материалов, поступающих со стороны набегания инструмента, где направления его вращения и перемещения совпадают (рис. 2, з-е, слева), и отхода, где направления его вращения противоположные (рис. 2, з-е, справа). Кроме того, она предопределяет скорость перемещения и траекторию движения перемешиваемых порций соединяемых материалов в определенном ограниченном пространстве, а также их степень уплотнения при затвердевании, что влияет на качество формирования лицевой поверхности шва. Так, использование инструментов различной конфигурации с торцевой рабочей поверхностью бурта может привести к изменению на поверхности шва формы чешуек, частоты их чередования и распределения по глубине залегания, плавности перехода от углублений к выпуклостям и др.

Результаты исследований показали, что при сварке инструментом с плоской торцевой поверхностью бурта происходит периодическое нарушение сплошности потока материала, вследствие чего на лицевой поверхности шва образуется грубая чешуйчатость, а местами — отдельные надрывы, которые ухудшают качество соединений. Наличие на поверхности шва конической или полусферической канавки способствует равномерному непрерывному перемещению материала и формированию шва с практически гладкой поверхностью, состоящей из мелких чешуек, несущественно отличающихся по толщине. При этом степень перемешивания свариваемых материалов на лицевой поверхности шва существенно зависит от диаметра бурта инструмента. Так, его увели-

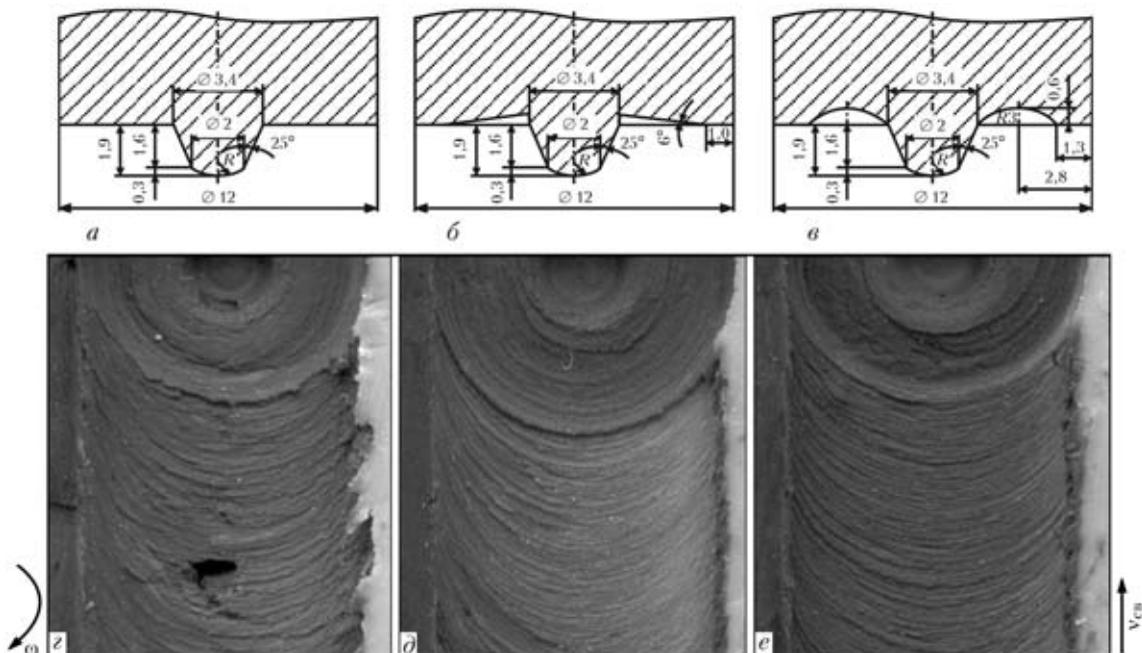


Рис. 2. Схемы рабочей части инструментов для СТП с плоской торцевой поверхностью бурта (а), конической (б) и полусферической (е) канавкой на ней и внешний вид лицевой поверхности швов, полученных с использованием соответствующих инструментов (з-е)

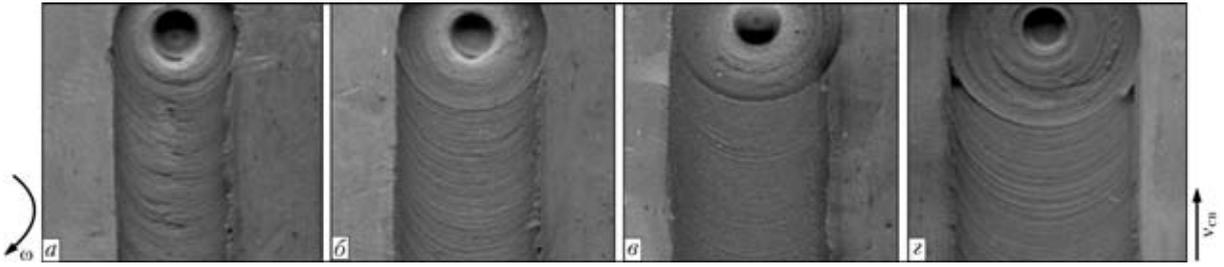


Рис. 3. Поверхности швов, выполненных СТП с использованием инструментов с диаметром бурта 10 (а), 12 (б), 14 (в) и (з) 16 мм и конической канавкой на их торцевой поверхности

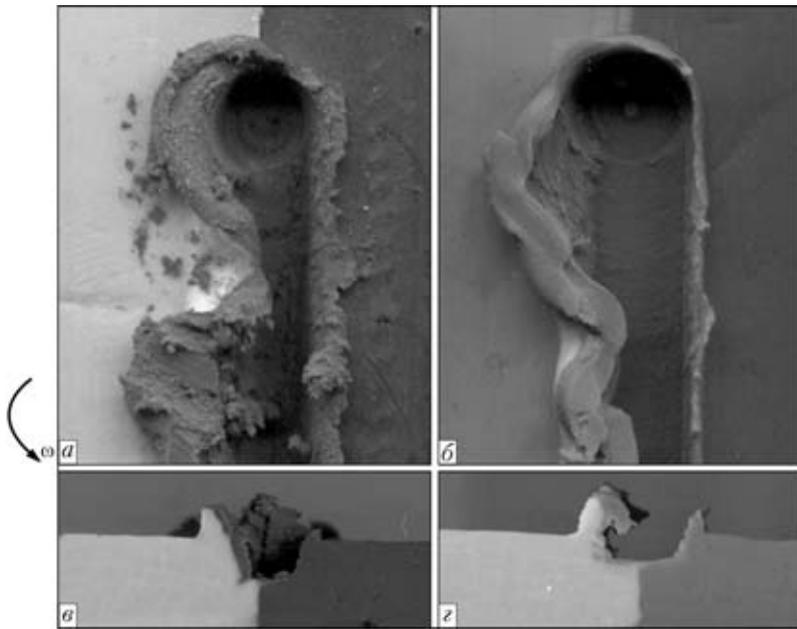


Рис. 4. Внешний вид лицевых поверхностей (а, б) и поперечных сечений швов (в, з), полученных СТП без прижатия бурта инструмента к соединяемым материалам при использовании наконечников конической формы с гладкой боковой поверхностью (а, в) и цилиндрической формы с резьбовой нарезкой на боковой поверхности (б, з)

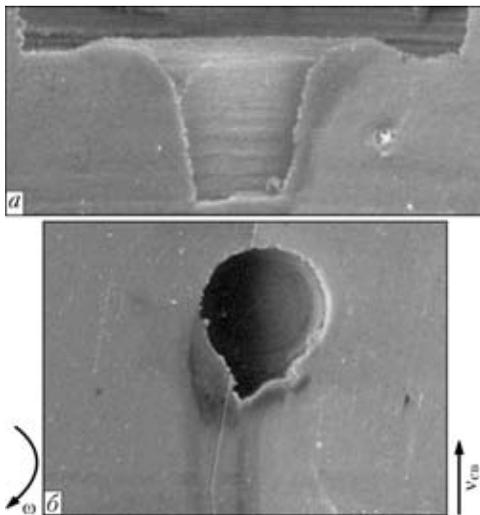


Рис. 5. Внешний вид сечения вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскости стыковых соединений, полученных СТП с использованием инструмента с наконечником конической формы и гладкой боковой поверхностью

чение с 10 до 16 мм приводит к значительному повышению степени измельчения, при этом лицевая поверхность шва получается более однородной (рис. 3).

Наконечник инструмента, кроме нагрева материала в зоне сварки, главным образом должен обеспечить его перемещение и перемешивание по

всей толщине стыка. Чтобы проследить за траекторией движения материала в процессе сварки непосредственно при перемещении вдоль стыка вращающегося наконечника инструмента, рабочую поверхность бурта не прижимали к свариваемому материалу. На рис. 4 хорошо видно, как материал переносился наконечником со стороны набегания инструмента (правая сторона шва) к стороне его отхода (левая сторона шва). На ней образовался тонкий слой, который располагался по всей толщине проникновения наконечника. При этом конфигурация боковой поверхности наконечника инструмента практически не влияла на характер перемещения материала. Под торцом наконечника также видна тонкая прослойка, нанесенная из материала, расположенного со стороны набегания инструмента.

Однако такое перемещение материала имеет место только в случае, если оно происходит в открытом пространстве, а не в ограниченном объеме. Поскольку в процессе СТП торцевая поверхность бурта ограничивает перемещение материала в вертикальном направлении, последний переносится наконечником со стороны набегания инструмента к стороне его отхода, а затем в освобождающееся позади наконечника пространство и располагается вдоль оси шва (рис. 5).



Рис. 6. Внешний вид поперечных сечений (а, б) и лицевых поверхностей (в, г) швов, полученных СТП с использованием инструмента с наконечником, имеющим гладкую боковую поверхность (а, в) и резьбовую нарезку (б, г)

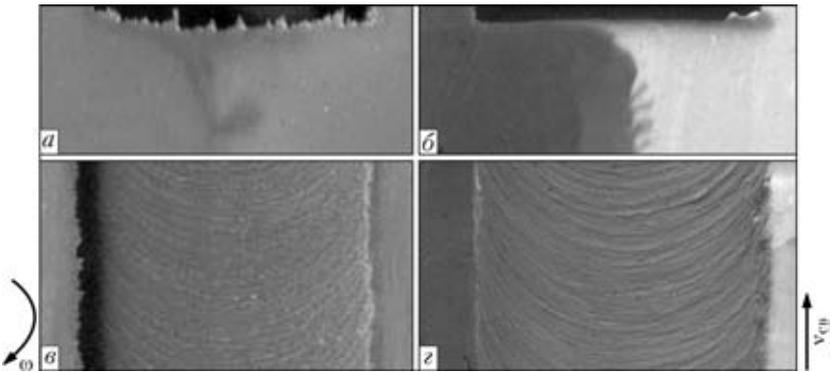
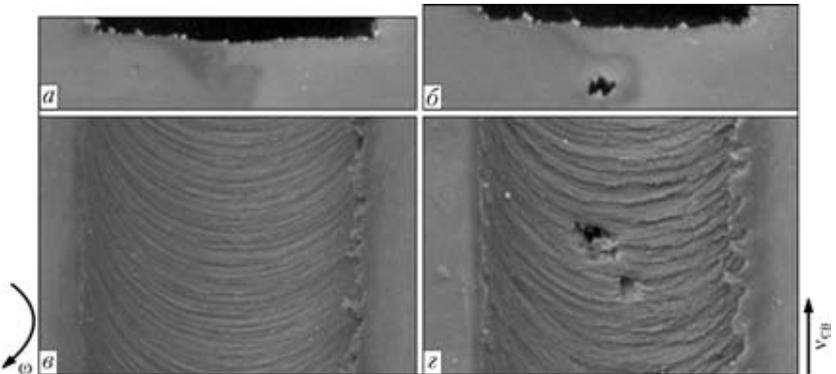


Рис. 7. Внешний вид поперечных сечений (а, б) и лицевых поверхностей (в, г) швов, полученных СТП с использованием инструментов с гладкой боковой поверхностью наконечника в виде усеченного конуса длиной 2,9 (а, в) и 3,2 (б, г) мм



При перемещении наконечником порций одного материала, находящегося со стороны набегающего инструмента, к другому материалу, который располагается со стороны отхода инструмента, в замкнутом пространстве при избыточном давлении происходит их частичное перемешивание. Этот процесс можно интенсифицировать при использовании наконечников с разветвленной, а не гладкой боковой поверхностью. Так, с помощью наконечника, имеющего на боковой поверхности обычную резьбовую нарезку, обеспечивается формирование слоистой структуры шва со стороны отхода инструмента в зоне сплавления его с основным материалом (рис. 6). Однако характер формирования и внешний вид лицевой поверхности шва существенно не зависят от геометрии боковой поверхности наконечника инструмента.

Влияние геометрических размеров и формы, а особенно нарезок и разветвлений на боковой поверхности наконечника инструмента усиливается при увеличении толщины свариваемого материала. Проведенные исследования показали, что использование инструмента с гладкой боковой поверхностью наконечника в виде усеченного конуса позволяет получить качественные швы при СТП материалов толщиной около 3 мм (рис. 7). Так, при СТП даже очень пластичных материалов в центральной части стыка ближе к корню шва нередко образуется дефект в виде полости. Ста-

бильность формирования лицевой поверхности шва при этом также ухудшается, на ней возникают надрывы, и, как следствие, имеет место недостаточное уплотнение материала под рабочей поверхностью бурта. Между образующимися на поверхности стыка слоями, существенно отличающимися как по толщине, так и по высоте, отсутствует плавный переход, что свидетельствует о периодическом нарушении непрерывности перемещения потока соединяемых материалов.

Наличие нарезок и разветвлений на боковой поверхности наконечника инструмента может оказать существенное влияние на процесс формирования шва вследствие изменения направле-

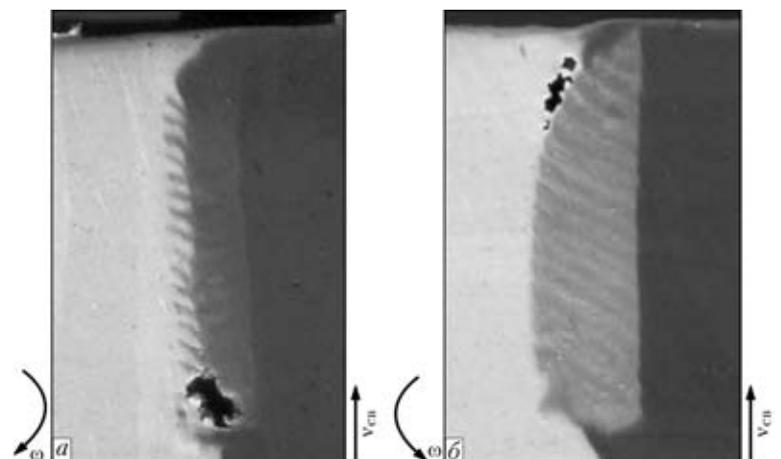


Рис. 8. Внешний вид поперечных сечений швов с характерными дефектами, образуемыми вследствие недостаточного прижатия бурта к свариваемым поверхностям при вращении инструмента с наконечниками цилиндрической формы, имеющими нарезку в виде метрической резьбы по часовой стрелке (а) и в противоположном направлении (б)



ния и траектории перемещения материала в зоне соединения. При этом, безусловно, ориентация нарезки на наконечнике инструмента взаимосвязана с направлением вращения инструмента. Так, использование одного и того же инструмента с наконечником цилиндрической формы, имеющим нарезку в виде метрической резьбы, в случае недостаточного прижатия бурта к свариваемым поверхностям может привести к образованию дефектов на различных участках шва (рис. 8). При вращении инструмента материал, находящийся в зоне стыка, перемещается резьбовой нарезкой из нижней его части в верхнюю, что приводит к образованию несплошностей в корне шва. При изменении направления вращения инструмента происходит движение материала вдоль нарезки на боковой поверхности наконечника инструмента в глубь стыка, вследствие чего в его корневой части формируется плотный шов, а вблизи торцевой поверхности бурта появляется полость.

### Выводы

1. Изучение особенностей массопереноса в зоне термодинамического воздействия при моделировании процесса СТП позволило установить, что формирование неразъемного соединения происходит вследствие переноса наконечником инструмента определенного объема пластичного материала со свариваемой кромки со стороны набегания инструмента к пластифицированному материалу, расположенному на противоположной кромке, их смешивания и перемещения под давлением в пространстве, которое освобождается позади наконечника при его движении вдоль стыка.

2. Конструктивные особенности наконечников инструментов обуславливают траекторию движения пластичного материала в зоне образования неразъемного соединения. Для обеспечения качественного формирования швов при увеличении толщины соединяемых кромок свыше 3 мм целесообразно применять инструменты с наконечниками, имеющими разветвленную боковую поверхность, что обеспечивает интенсивное перемешивание материалов по всей толщине стыка.

3. Конфигурация рабочей поверхности бурта инструмента оказывает влияние на характер перемешивания соединяемых материалов только на лицевой поверхности шва и определяет степень уплотнения пластичного материала позади наконечника инструмента. Так, наличие на рабочей поверхности бурта конической или полусферической канавки способствует равномерному непрерывному перемещению пластичного материала и формированию практически гладкой поверхности шва с едва различимыми по толщине чешуйками, наличие которых свидетельствует о чередовании слоев соединяемых материалов.

1. Dawes C. J., Thomas W. M. Friction stir process welds aluminum alloys // *Welding J.* — 1996. — № 3. — P. 41–45.
2. Arbegast W. J. Friction stir welding after a decade of development // *Ibid.* — 2006. — № 3. — P. 28–35.
3. Kallee S., Nicholas D. Causing a stir in the future // *Welding and Joining.* — 1998. — № 2. — P. 18–21.
4. Johnsen M. R. Friction stir welding takes off at boeing // *Welding J.* — 1999. — № 2. — P. 35–39.
5. Okamura H., Aota K., Ezumi M. Friction stir welding of aluminum alloy and application to structure // *J. of Japan Institute of Light Metals.* — 2000. — № 4. — P. 166–172.
6. Pietras A., Zadroga L., Lomozik M. Characteristics of welds formed by pressure welding incorporating stirring of the weld material (FSW) // *Welding Intern.* — 2004. — № 1. — P. 5–10.
7. Colligan K. Material flow behavior during friction stir welding of aluminum // *Welding J.* — 1999. — № 7. — P. 229–237.
8. *Experimental methods for determining material flow in friction stir welds* / B. London, M. Mahoney, W. Bingel et al. // 3rd Intern. symp. on friction stir welding, Kobe, Japan, Sept. 27–28, 2001. — Kobe, 2001. — P. 1–7.
9. Dickerson T., Shercliff H., Schmidt H. A weld marker technique for flow visualization in friction stir welding // 4th Intern. symp. on friction stir welding, Utah, USA, May, 2003. — P. 1–12.
10. Colegrove P. A., Shercliff H. R. Development of trivex friction stir welding tool. Pt 1: Two-dimensional flow modeling and experimental validation // *Sci. and Techn. of Welding and Joining.* — 2004. — № 4. — P. 345–351.
11. Shibayanagi T. Microstructural aspects in friction stir welding // *J. of Japan Institute of Light Metals.* — 2007. — № 9. — P. 416–423.
12. Solid state welding between CPTi and AZ31B magnesium alloy using a rotating probe with thread / H. Tanabe, T. Watanabe, R. Yoshida, A. Yanagisawa // *Quarterly J. of the Japan Welding Society.* — 2007. — № 2. — P. 386–393.

Model of the process of friction stir welding was used to study the influence of structural dimensions of working surfaces of tool shoulder and tip on the features of materials mixing in the thermodynamic impact zone. It is shown that a permanent joint forms due to displacement of a certain amount of ductile material by the tool tip and its mixing across the entire thickness of edges. Shape of working surface of tool shoulder edge predetermines the displacement trajectory, movement speed, uniformity of mixing and degree of compaction of the materials being joined at solidification.

Поступила в редакцию 01.02.2011

## СОВРЕМЕННЫЙ РЫНОК СВАРОЧНОЙ ТЕХНИКИ И МАТЕРИАЛОВ\*

О. К. МАКОВЕЦКАЯ, канд. экон. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлена систематизированная экономико-статистическая информация о состоянии и развитии мирового, региональных и национальных рынков сварочной техники за период 2006–2009 гг. Приведены количественные и стоимостные показатели объемов производства, потребления, экспорта-импорта оборудования и расходных материалов для сварки и родственных технологий.

*Ключевые слова:* конструкционные материалы, сварочная техника, статистика, экономика, производство, мировой рынок, регионы, страны

**Рынок основных конструкционных материалов.** Основными конструкционными материалами современного промышленного производства являются сталь, алюминий, титан, магний и их сплавы, а также конструкционные пластмассы. Несмотря на кратковременный спад во время периодических экономических кризисов объем производства конструкционных материалов постоянно растет. Так, за последние 40 лет объем производства пластмасс увеличился в 9 раз, магния в 3,4, алюминия в 2,7, стали в 2,2 раза. На рис. 1 показан рост объема производства основных конструкционных материалов в 1970, 2008 и 2009 гг. Из приведенных данных видно, что сталь является бесспорным лидером на рынке конструкционных материалов. Объем ее производства более чем в 4 раза превосходит суммарный объем производства других конструкционных материалов.

Различные показатели производства и потребления стали являются индикаторами состояния мировой и национальной экономики, развития отдельных отраслей и секторов промышленного производства, включая сварочную технику. В частности, объем и структура потребления стальной продукции по видам продукции, отраслям промышленности, регионам дает достаточно полное представление об объемах и структуре рынка сварочной техники.

Продемонстрировать влияние изменений, происходящих в мировом производстве стали, на объем продаж на рынке сварочной техники можно на примере компании «Thermadyne» — лидера производства сварочной техники (шестая позиция в рейтинге ведущих мировых производителей сварочной техники в 2008 г.) (рис. 2).

\*По материалам информационно-статистического сборника «SVESTA-2010».

В 2007–2009 гг. рынок конструкционных материалов подвергался существенным колебаниям. Так, в 2007 г. отмечен наивысший уровень производства и потребления стали в мире. Мировой экономический кризис 2008–2009 гг. привел к сокращению мирового производства стали в 2008 г. на 1,5 %, а в 2009 г. еще на 8 %. В большинстве регионов мира произошло еще более значительное сокращение производства стали: в Северной Америке почти на 40 %; в странах ЕС, Японии и СНГ приблизительно на 30 %. Только три страны в мире (Китай, Индия и Иран) в этот период нарастили производство стали за счет увеличения объемов внутренних рынков. Так, производство

V, млн т

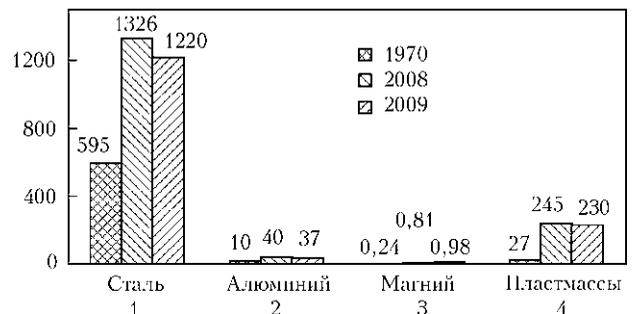


Рис. 1. Объем V мирового производства основных конструкционных материалов по данным информационного агентства «Worldsteel» (1), статистического сборника «U.S. Geological Survey» (2, 3) и компании «Plastics Europe Market Research Group» (4)

И, %

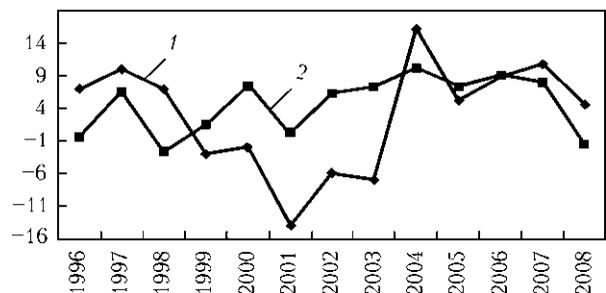


Рис. 2. Изменения И мирового производства стали (1) и объема продаж компании «Thermadyne» (2) за период 1996–2008 гг. [1]



Таблица 1. Производство стали в основных регионах мира, млн т\*

Регион	2007	2008	2009	2009/2008
Европа, включая:	364,5	344,1	265,8	-22,8
ЕС (27)	209,7	198,0	139,1	-29,7
ЕС (15)	175,2	167,7	117,7	-29,8
СНГ	124,2	114,3	97,5	-14,7
Северная Америка, в том числе:	132,6	124,5	82,3	-33,9
США	98,1	91,4	58,1	-36,4
Южная Америка	48,2	47,4	37,8	-20,1
Африка	18,8	17,1	15,2	-11,0
Ближний Восток	16,5	16,6	17,2	3,3
Азия, в том числе:	756,5	768,3	795,4	3,5
Китай	489,3	500,3	567,8	13,5
Япония	120,2	118,7	87,5	-26,3
Австралия/Новая Зеландия	8,8	8,4	6,0	-28,6
Всего	1345,8	1326,5	1219,7	-8,0

\*Здесь и в табл. 2 использованы данные Международного института чугуна и стали.

стали в Китае в 2008–2009 гг. возросло на 13,5 % и достигло рекордной цифры 567,8 млн т.

В 2009 г. мировой объем потребления готовой стальной продукции составил 1121 млн т, что на 6,7 % меньше уровня 2008 г. Мировое потребление стали, за исключением стран БРИК, в 2009 г. сократилось на 26,8 % по отношению к 2008 г. В странах БРИК потребление стали за этот период возросло на 18 % в основном за счет увеличения ее потребления в Китае. В табл. 1 пред-

ставлены данные о мировом производстве стали в 2007–2009 гг., а в табл. 2 — данные о мировом потреблении готовой стальной продукции в 2009 г. и дан прогноз на 2011 г.

Более 2/3 производимой стальной продукции (проката) перерабатывается с использованием технологий соединения, в частности, сварки. Таким образом, объем и структура потребления готовой стальной продукции позволяет оценить объем производства сварочной техники, в частности, сварочных материалов. В сварочном производстве показатель массы наплавленного металла на 1 т потребляемой стали является основным показателем расхода сварочных материалов. По данным компании ESAB, в 2006 г. средний по странам показатель массы наплавленного металла (в килограммах на 1 т сварной конструкции) составлял 2,7 кг [2]. Значение этого показателя варьируется в зависимости от типа сварных конструкций и применяемых способов сварки. Исходя из объема потребляемой стали оценивается также потребность в сварочном оборудовании. В соответствии с международной практикой принято считать, что в среднем на 1 тыс. т произведенной в стране стали необходимо выпустить 2,5 ед. сварочной техники [3]. На рис. 3 представлено производство мировой стальной продукции согласно основным видам производимых продуктов. Плоский и сортовой прокат составляет 46 % (каждый) общего выпуска стальной продукции.

Объем потребления стали в отдельных отраслях промышленности позволяет оценить отраслевую структуру потребления сварочной техники (рис. 4). Строительная индустрия и транспорт (производство грузовых и легковых автомашин,

Таблица 2. Потребление готовой стальной продукции в основных регионах мира в 2009 и 2010 гг. и прогноз на 2011 г.

Регион	Потребление, млн т			Темп роста, %		
	2009	2010	2011	2009	2010	2011 (прогноз)
ЕС (27)	118,4	134,6	145,2	-35,2	13,7	7,9
Другие страны Европы	23,9	27,2	30,4	-12,5	13,5	11,9
СНГ	35,8	39,8	43,0	-28,2	11,0	8,0
Северная Америка	80,9	99,9	107,1	-37,4	23,5	7,2
Центральная и Южная Америка	33,6	40,4	43,1	-24,1	20,0	6,7
Африка	26,4	28,7	31,3	9,6	8,6	9,3
Ближний Восток	40,7	44,7	48,4	-8,0	10,0	8,2
Азия и Океания	761,5	825,7	857,7	8,7	8,4	3,9
Всего	1121,2	1240,9	1306,2	-6,7	10,7	5,3
Китай	542,4	578,7	594,9	24,8	6,7	2,8
БРИК	640,9	692,0	720,7	17,5	8,0	4,1
Мир, исключая Китай	578,8	662,2	711,3	-24,5	14,4	7,4
Мир, исключая БРИК	480,3	548,9	585,6	-26,8	14,3	6,7

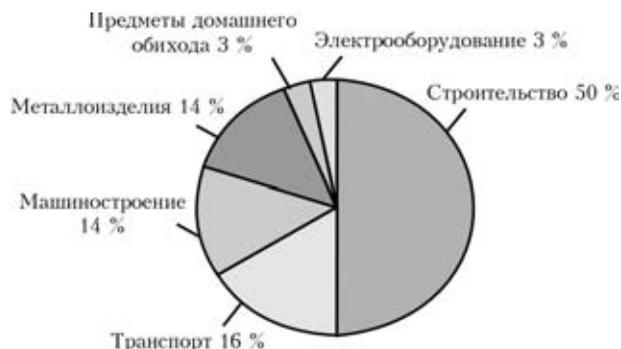


Рис. 3. Структура производства основных видов стальной продукции за 2009 г. (по данным OECD)

Рис. 4. Структура мирового потребления стали по различным отраслям промышленности за 2009 г. (по данным OECD)

судостроение, железнодорожный транспорт и машиностроение) являются крупнейшими потребителями стальной продукции. Эти отрасли потребляют около 80 % всей производимой в мире металлопродукции и соответственно являются основными потребителями сварочной техники.

Половина всей производимой в мире стальной продукции используется в сфере строительства. По данным Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) [4], доля строительного сектора в мировой валовой внутренней продукции в 2009 г. составляла около 13,4 %, а объем рынка — около 7,5 трил. дол. США. Рынки США и Китая являются крупнейшими в мире; их доля на мировом строительном рынке — соответственно 17 и 14 %. В США на строительство приходится примерно 33 % внутреннего потребления стали, в Европе — 40 %, в странах Юго-Восточной Азии — 60 %. Во время кризиса произошел

спад рынка строительного сектора. В странах Европы, например, в 2008 г. он составил приблизительно 7...8 %.

Мировой сектор транспорта потребляет около 16 % производимой в мире стали и является капиталоемкой отраслью (в массе автомобиля доля стали составляет около 70 %). Начиная с 2001 г. автомобильные рынки Японии, Северной Америки и Западной Европы постоянно сокращались. В эти же годы в Китае, Индии и Бразилии отмечен рост продаж автомобилей соответственно на 25, 15 и 5 %. Мировое производство автомобилей сместилось на растущие рынки Азии.

Сектор машиностроения в большей степени пострадал от экономического кризиса — объем производства по регионам снизился на 25...55 %, особенно в странах ЕС, США, Японии. В развивающихся странах (в основном за счет роста потребления в Китае) спад производства был значительно меньшим. В настоящее время в данном секторе производства Китай занимает ведущую позицию на мировом рынке. За период 2005–2008 гг. его доля возросла с 12 до 17 %.

Таблица 3. Отраслевая структура потребления готовой стальной продукции в странах ЕС(27), темп изменения за период 2008–2010 гг. и прогноз на 2011 г. (по данным Европейской конфедерации производителей стали)

Сектор промышленности	Доля потребления стальной продукции, %	Изменение, %			
		2008	2009	2010	2011 (прогноз)
Строительство	27	-0,8	-6,7	-0,5	2,8
Стальные конструкции	11	-1,8	-13,9	0,4	2,9
Машиностроение	14	-1,0	-21,8	0,8	4,7
Автомобилестроение	16	-5,9	-28,9	1,2	4,5
Предметы домашнего обихода	4	-4,6	-12,8	1,2	0,6
Судостроение	1	6,2	-22,7	-10,2	2,0
Производство труб	12	-1,1	-26,0	3,6	5,8
Изделия из металла	12	-2,3	-22,6	2,6	5,3
Другие	3	2,3	-16,6	1,7	4,4
Всего	100	-2,0	-18,2	0,9	4,0

В наибольшей степени объем потребления готовой стальной продукции в 2009 г. сократился в Европе (см. табл. 2). В табл. 3 показаны отраслевая структура и изменения потребления готовой стальной продукции за период 2008–2010 гг. по основным отраслям производства стран ЕС и дан прогноз на 2011 г.

К концу 2010 г. практически все металлоперерабатывающие отрасли промышленности вышли на докризисные объемы производства и потребления стали.

В 2008–2009 гг. сократился также объем производства в отрасли цветной металлургии. Производство первичного алюминия, второго по объему применения конструкционного материала в 2009 г., снизилось на 6,2 %. Мировое производство пластмасс в 2009 г. также



Таблица 4. Производство первичного алюминия (тыс. т) в основных регионах мира (по данным Международного института алюминия)

Регион	2007	2008	2009	2009/2008, %
Китай	12588	13105	12964	-1,1
Северная Америка	5642	5783	4759	-17,7
Центральная и Восточная Европа	4460	4,658	4117	-11,6
ЕС	4305	4618	3722	-19,4
Азия	3717	3923	4400	+12,1
Южная Америка	2558	2660	2508	-5,7
Австралия/Новая Зеландия	2315	2297	2211	-3,7
Африка	1815	1715	1681	-2,0
Всего	37400	38759	36362	-6,2

сократилось на 6 % по сравнению с 2008 г. и составило 230 млн т. В табл. 4 представлены данные о мировом производстве первичного алюминия за период 2007–2009 гг.

**Мировой и региональные рынки сварочной техники.** Мировой рынок продуктов и услуг, относящихся к сварочным и родственным технологиям, продолжает уверенно расти, несмотря на кратковременные спады в период мировых кризисов. По оценке немецких экспертов, в 2003 г. стоимостный объем мирового рынка составлял около 33, в 2006 г. — 40, а в 2008 г. — 60 млрд дол. США [5]. По оценкам ряда экспертных фирм и товаропроизводителей, стоимостный объем рынка сварочной техники в 2009 г. составлял 12–13 млрд дол. США [6]. В табл. 5 приведены данные об объеме рынка сварочной техники, включающие показатели рынка сварочных материалов и оборудования, газов для сварки, средств защиты и сварочных роботов.

По оценке компании «Thermadyne», рынок сварочной техники, включающий рынок присадочных материалов, сварочного оборудования, оборудования для газовой и плазменной резки и аксессуаров в 2008 г., составлял 15 млрд дол. США. В 2009 г. произошел спад объемов продаж до 12 млрд дол. США. В стоимостный объем рынка

не включены газы для сварки, газовые баллоны, средства защиты [7, 8].

Структура мирового рынка сварочной техники представлена на рис. 5. Рынок материалов для сварки и наплавки в 2009 г. составлял более половины мирового рынка сварочной техники. В 2007–2009 гг. доля этого сегмента рынка колебалась от 50 до 57 %. Доля рынка сварочного оборудования в 2009 г. по сравнению с 2008 г. сократилась на 2 % и составила 24 %. Уменьшились продажи оборудования для газовой (–5 %) и плазменной (–1 %) резки. В целом структура мирового рынка сварочной техники за период 2007–2009 гг. была достаточно стабильной, значительных

колебаний в сфере потребления отдельных видов продукции на рынке сварочной техники отмечено не было.

Основными региональными сегментами рынка сварочной техники являются Азия (40 %), Европа (30 %) и Америка (30 %). По оценке специалистов фирмы ESAB, стоимостный объем мирового рынка сварочной техники, за исключением сварочных роботов и средств автоматизации, в 2009 г. составил 13 млрд дол. США [9]. Региональное распределение мирового рынка свароч-



Рис. 5. Структура мирового рынка сварочной техники за 2009 г. (по данным компании «Thermadyne»)

Таблица 5. Объем мирового рынка сварочного оборудования и материалов, млн дол. США (по данным компании BCC Research)

Показатель	2006	2007	2008	2013 (прогноз)	Ежегодный прирост за период 2008–2013 гг., %
Сварочное оборудование и материалы	9842	10219	10677	13615	5,0
Газы для сварки	1911	1968	2017	2618	5,4
Средства защиты	367	383	406	487	3,7
Сварочные роботы и аксессуары	86	96	108	148	6,5
Всего	12206	12666	13208	16868	5,0

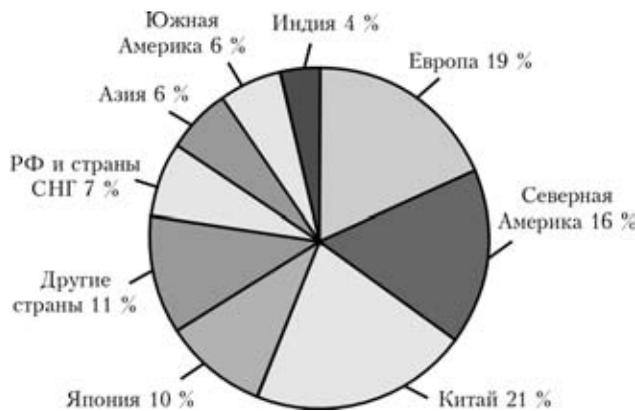


Рис. 6. Распределение мирового рынка сварочной техники по регионам 2009 г.

ной техники, по данным компании ESAB, представлено на рис. 6.

За период 2007–2009 гг. региональная структура рынка сварочной техники претерпела значительные изменения. Рынок сварочной техники, как и рынок стали, сместился в регионы Азии. В 2009 г. американский, европейский и японский рынки сварочной техники в стоимостном выражении сократились на 30...40 %. Позитивная тенденция была отмечена только в Китае, Индии и странах Среднего Востока (Иране). По сравнению с 2007 г. доля стран Азии в 2009 г. на мировом рынке сварочной техники возросла на 11 %, в основном за счет Китая и Индии. Отмечен также рост (на 2 %) продаж на рынках стран Южной Америки. Доля стран ЕС на мировом рынке сварочной техники за этот период сократилась на 6 %, а Северной Америки — на 3 % [10]. Эту тенденцию подтверждают данные об изменении объемов продаж на региональных рынках крупнейшей транснациональной компании ESAB

Т а б л и ц а 6. Региональная структура продаж компании ESAB

Регион	Доля, %	
	2009 г. (объем продаж 1031,4 млн фун. стерл.)	2002 г. (объем продаж 581,9 млн фун. стерл.)
Европа:		
развитые страны	25	55
развивающиеся страны	13	—
Америка:		
Северная	23	33
Южная	16	9
РФ	6	—
Индия	5	—
Китай	3	—
Другие	9	3
Всего	100	100

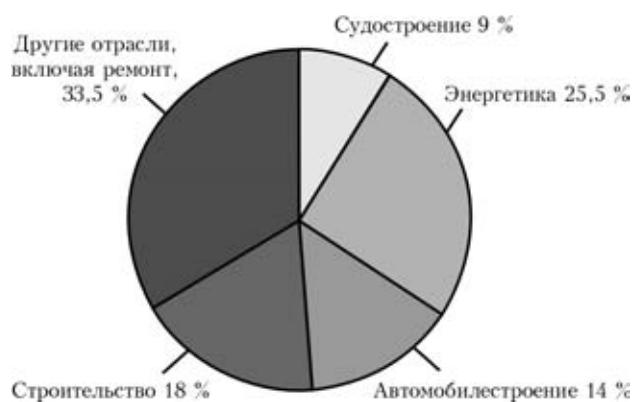


Рис. 7. Распределение по основным отраслям-потребителям за 2009 г. (по данным компании «Thermadyne»)

(вторая позиция в рейтинге ведущих мировых производителей сварочной техники в 2009 г.) (табл. 6) [9].

Основными отраслями-потребителями сварочной техники являются строительство, транспорт, энергетика (включая нефте- и газодобывающую промышленность, электроэнергетику, нефтехимическую промышленность, производство труб и строительство трубопроводов), а также сфера ремонтных и восстановительных работ. На рис. 7 представлены средние мировые показатели распределения рынка сварочной техники по основным отраслям-потребителям [8].

В отличие от большинства металлоперерабатывающих отраслей промышленности (автомобиле- и судостроения, аэрокосмической промышленности, промышленного и гражданского строительства, тяжелого машиностроения), сокративших производство и соответственно потребление сварочной техники в период кризиса 2008–2009 гг., только сектор энергетика (ветроэнергетики, ядерной энергетика, гидро- и солнечной энергетика) продолжал увеличивать потребление сварочного оборудования и материалов. Доля энергетика в структуре потребления сварочного оборудования и материалов на мировом рынке сварочной техники в 2008 г. составила 11 %. По оценкам экспертов фирмы «Frost&Sullivan», до 2015 г. ожидается ежегодный рост этого сектора рынка сварочной техники на 7 %. Прогнозируется, что объем рынка сварочной техники в секторе энергетика возрастет с 1,9 (2008 г.) до 3,0 млрд дол. США (2015 г.) [11].

Наиболее перспективным сектором рынка сварочной техники, по оценкам экспертов компании ESAB и фирмы «Frost&Sullivan», является ветроэнергетика. В настоящее время доля мирового производства энергии с использованием ветроэнергетических установок не превышает 2 %, однако темп роста ввода новых мощностей постоянно растет. Мощность ветровой энергетика в мире в 2007 г. составляла 27 000 МВт. Прогнозируется, что в 2012 г. она достигнет 60 000 МВт. В странах



Таблица 7. Суммарные и ежегодно вводимые мощности ветроэлектростанций за 2009 г. ведущих стран мира

Страна	Вводимая ежегодно мощность, МВт	Суммарная мощность, МВт
США	9994	35155
Китай	13750	25853
Германия	1917	25813
Испания	2331	18784
Индия	1172	10827
Италия	1114	4845
Франция	1104	4775
Великобритания	1077	4340
Канада	950	—
Португалия	645	3474
Дания	—	3408
Другие страны	4121	22806
Всего	38175	160080

ЕС (Дания, Португалия, Испания, Ирландия) доля электроэнергии, произведенной с использованием ветроэнергетики, уже составляет от 10 до 20 %. В целом, согласно директиве ЕС о разработке национальных планов по сокращению потребления энергии, с 2008 г. по 2017 г. каждая страна ЕС должна сократить потребление электроэнергии как минимум на 1 % в год. К 2020 г. Европа поставила перед собой цель довести долю альтернативных видов топлива в общем энергобалансе до 20 %, а к 2040 г. — до 40 %.

Рост вновь вводимых ветроэнергетических мощностей в США за период 2007–2009 гг. составил соответственно 35, 44 и 39 % всего объема вновь вводимых мощностей по производству электроэнергии.

В табл. 7 представлены данные Американского министерства энергетики (U.S. Department of Energy), позволяющие оценить современное состояние ветроэнергетики в ведущих странах мира [12].

Инвестиции в сварочное оборудование этого сегмента рынка постоянно возрастают. По оценке специалистов компании ESAB, на каждый вновь вводимый мегаватт мощности потребляется 700 кг сварочных материалов и 600 кг флюса. Данный сегмент рынка имеет хорошие перспективы для дальнейшего роста [9].

К числу отраслей, которые могут стать катализаторами роста рынка сварочной техники в ближайшие годы выхода из кризиса, эксперты помимо сектора энергетики относят также сек-

тор ремонта и восстановительных работ. Откликом на прогнозируемый рост цен на нефть станет увеличение потребления стали для строительства трубопроводов и танкеров, что в свою очередь приведет также к росту рынка сварочного оборудования и материалов.

**Европейский рынок сварочной техники и услуг.** В 2007 г. Немецкое общество сварщиков (DVS) завершило широкомасштабный проект по оценке вклада технологий соединения (сварки и родственных технологий) в экономику стран Европы [5]. На основании полученных данных можно достаточно полно оценить объем и структуру европейского рынка сварочной техники и услуг. В табл. 8 содержатся данные об объеме производства оборудования для сварки и родственных технологий и дополнительных товаров и услуг, представленных на сварочном рынке ведущих европейских стран-производителей сварочной техники.

Как видно из табл. 8, объем производства оборудования для сварки и родственных технологий

Таблица 8. Производство оборудования и дополнительных товаров для сварки, а также оказание услуг в этой сфере в странах ЕС за 2007 г., млн евро\*

Страна	Производство оборудования для сварки и родственных технологий	Производство дополнительных товаров и услуги	Всего
Германия	2500	2110	4660
Франция	320	1510	1830
Италия	1170	1800	2970
Великобритания	160	1190	1350
Польша	97	169	266
Нидерланды	29	382	411
ЕС (27)	7500	12480	19980

\* Здесь и в табл. 9–11 использованы данные DVS.

Таблица 9. Структура производства оборудования для сварки и родственных технологий Германии и стран ЕС за 2007 г.

Технология соединения	Объем производства, млн евро		Доля, %	
	Германия	ЕС	Германия	ЕС
Сварка	1668	3916	66	52
Пайка	233	629	9	8
Склеивание	112	338	4	5
Резка	96	582	4	8
Термическое напыление	17	54	1	1
Другие	80	324	3	4
Лазерные технологии	233	1334	9	18
Роботы/робототехнические системы	111	323	4	4
Всего	2550	7500	100	100

в странах ЕС составлял в 2007 г. 7,5 млрд евро. Основными производителями указанного оборудования являются Германия и Италия, которые вместе изготовляют половину всего оборудования в Европе, а Германия — треть. Рынок дополнительных товаров и услуг в 1,6 раза превышает рынок оборудования. Всего объем рынка техники соединений, дополнительных товаров и услуг, связанных с технологиями соединения, в 2007 г. составил почти 20 млрд евро.

В табл. 9 приведена структура производства оборудования для сварки и родственных технологий Германии и стран ЕС.

Как видно из таблицы, объем производства оборудования для сварки составляет половину всего производимого в странах ЕС оборудования для сварки и родственных технологий. В Германии этот показатель равен 66 %. Производство оборудования для лазерных технологий занимает второе место, его доля в среднем по странам ЕС — 18 %, а по Германии — 9 %.

В табл. 10 представлены данные об объеме производства оборудования для сварки в странах ЕС. Основные производители указанного оборудования — это Германия и Италия. Суммарно в этих странах изготавливается 70 % всего сварочного оборудования в регионе, из них Германия выпускает около 43 %.

Данные об объеме и структуре производства дополнительных товаров и услуг в области технологий соединения представлены в табл. 11.

Основная доля (почти 50 %) в структуре производства дополнительных товаров и услуг в странах ЕС приходится на производство клея, 18 % — сварочный газ, 14 % — сварочные материалы. В Германии структура несколько изменяется: первое место по объемам производства занимает сварочный газ (28 %), второе — сварочные материалы (20 %), третье — производство клея (13 %). Услуги по обучению сварочного персонала составляют значительную долю на рынке стран ЕС, особенно Германии — соответственно 4,5 и 11,0 %.

На рис. 8 представлен объем производства сварочной техники и услуг в странах ЕС в 2007 г. На основании

Т а б л и ц а 10. Объем производства оборудования для сварки в странах ЕС за 2007 г., млн евро

Страна	Сварочное оборудование	Запасные части	Всего	Доля, %
Германия	1433	235	1668	42,6
Франция	181	34	215	5,5
Италия	608	110	718	18,3
Нидерланды	—	0,80	0,80	0,01
Польша	55	4	59	1,5
Великобритания	68	15	83	2,1
Другие страны	1041	131	1172	29,9
ЕС (27)	3386	530	3916	100

Т а б л и ц а 11. Объем производства дополнительных товаров и услуг в области технологий соединения за 2007 г.

Дополнительные товары, услуги	Объем производства, млн евро		Доля, %	
	Германия	ЕС	Германия	ЕС
Клей	271	6040	12,9	48,4
Сварочный газ	598	2232	28,4	17,9
Сварочные материалы	415	1717	19,7	13,8
Оборудование для контроля	229	723	10,9	5,7
Обучение	241	561	11,4	4,5
Заклепки	134	500	6,4	4,0
Охрана труда и техника безопасности	49	277	2,3	2,2
Материалы для термического напыления	78	256	3,7	2,1
Материалы для пайки	83	127	3,9	1,0
Вентиляционное оборудование	9	50	0,4	0,4
Всего	2106	12483	100	100

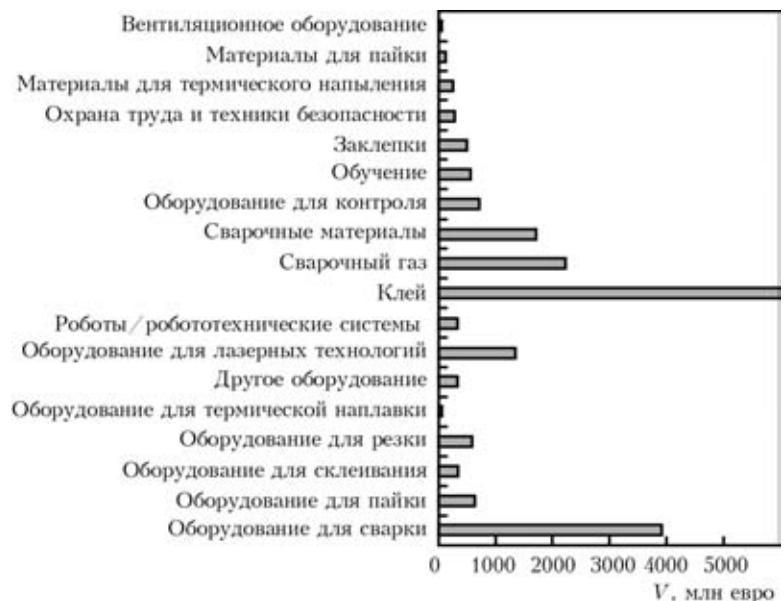


Рис. 8. Объем производства V европейского рынка сварочной техники и услуг в 2007 г. (по данным DVS)

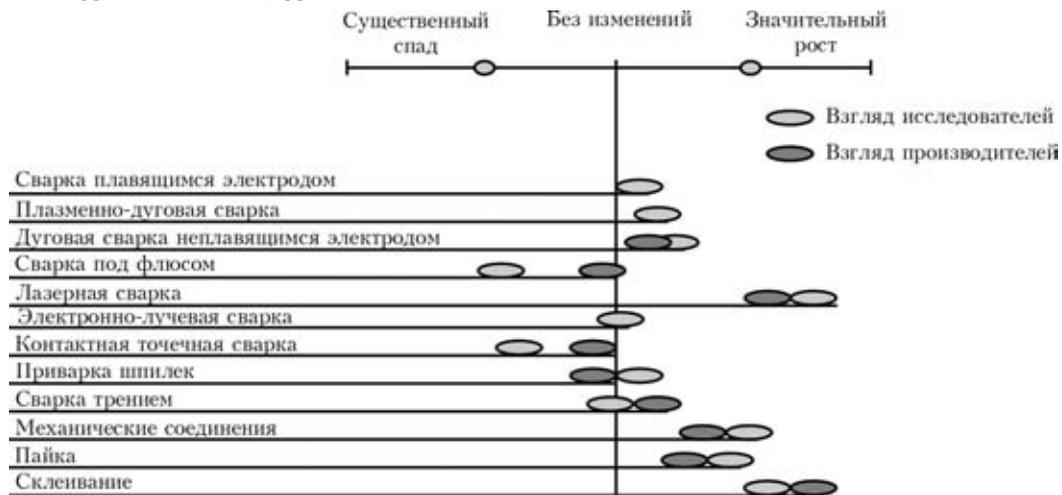


Рис. 9. Прогноз развития отдельных секторов европейского рынка сварочной техники на период 2005–2015 гг.

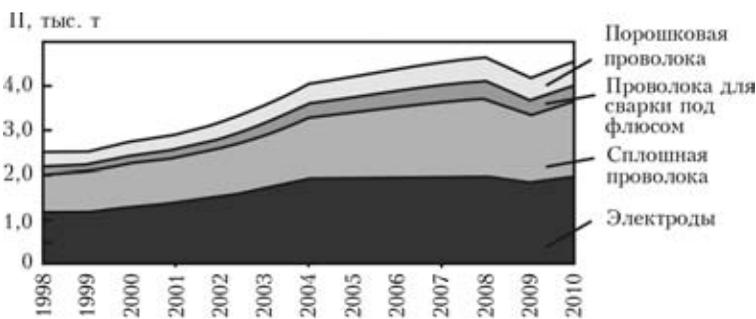


Рис. 10. Объем потребления П в мире сварочных материалов по основным видам продукции (по данным компании ESAB)

В 2009 г. его величина была порядка 6,0...6,5 млрд дол. США. По оценке компании ESAB [9], мировой объем потребления сварочных материалов, рассчитанный по массе наплавленного металла в 2009 г., составил приблизительно 4,1 млн т, что на 13 % меньше уровня 2008 г. На рис. 10 представлена мировая структура потребления сварочных материалов по основным видам продукции.

этих данных можно получить достаточно полное представление о структуре производства техники и услуг для сварки и родственных технологий в Европе. Более 30 % объема производства составляет клей, оборудования для сварки — около 20 %, а сварочных материалов — 9 %. Эти данные полностью подтверждают прогноз немецких производителей сварочной техники относительно развития отдельных секторов европейского рынка техники соединений, опубликованный в 2005 г., согласно которому технологии лазерной сварки и склеивания будут иметь наибольший прирост в 2005–2015 гг. [13] (рис. 9).

**Мировой рынок сварочных материалов.** Стоимостный объем мирового рынка сварочных материалов за период 2007–2009 гг. составлял около половины всего объема рынка сварочной техники.

В мировой структуре потребления сварочных материалов доминируют электроды для дуговой сварки (около 40 %) и сплошная проволока (около 40 %). Приведенная диаграмма показывает, что значительных изменений в тенденциях и структуре спроса на сварочные материалы за период 2007–2009 гг. не произошло. Продолжается снижение потребления покрытых электродах для дуговой сварки и рост спроса на порошковую проволоку. Объем потребления сплошной проволоки остается неизменно высоким и имеет также тенденцию роста, которая будет сохраняться и в ближайшем будущем, что приведет к стабилизации применения покрытых электродов на уровне 15...20 %.

**Региональные рынки сварочных материалов.** Здесь доминирует Азия, на долю которой приходится 70 % мирового рынка сварочных материалов. Доля Европы составляет 15 %, а Северной Америки — 10 %. На всех рынках сварочных материалов основных регионов, за исключением Китая и Индии, в 2009 г. имел место значительный спад. Наиболее сократился объем продаж на рынках США, Европы и Японии (около 30 %). Рынок сварочных материалов переместился в Азию. На рис. 11 приведены данные об объеме потребления сварочных материалов в основных регионах мира.

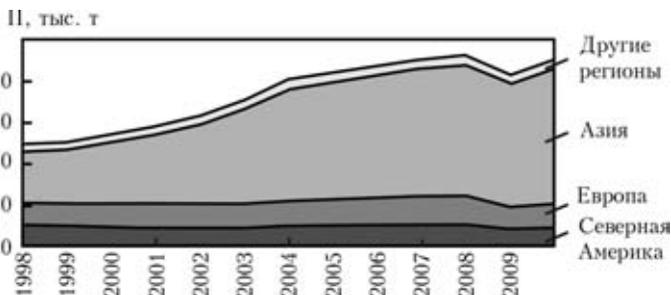


Рис. 11. Объем потребления П сварочных материалов по основным регионам (по данным компании ESAB)

*Китай* занимает первое место в мире по производству и потреблению сварочных материалов. В 2009 г., по данным китайских экспертов, объем потребления сварочных материалов составил около 2,5 млн т. По оценке компании «Thermadyne», стоимостный объем рынка сварочных материалов Китая в 2009 г. составлял около 1,1 млрд дол. США [7, 14].

Основную долю всех производимых в Китае сварочных материалов составляют электроды для ручной дуговой сварки. В 2009 г. их доля в структуре производства сварочных материалов была равна около 58 %, сплошной проволоки — 25 %, порошковой проволоки и материалов для сварки под флюсом — 17 %. Объем потребления сварочных материалов для сварки алюминия составил примерно 5 тыс. т.

В последние годы структура производства сварочных материалов в Китае быстро меняется: возрастает производство проволоки сплошного сечения и порошковой проволоки, при этом сокращается производство сварочных электродов. По прогнозу «China Iron and Steel Research Institute», к 2015 г. объем производства сварочных материалов в Китае достигнет 3,5...4,0 млн т, доля производства покрытых электродов для ручной дуговой сварки снизится до 22 %, сплошной проволоки для сварки в углекислом газе возрастет до 50 %, порошковой проволоки увеличится до 15 %, проволоки для электродуговой сварки под флюсом и флюсов сохранится на уровне 12 %, а материалов для сварки неплавящимся электродом — на уровне 1 % [15].

В *Японии* общий объем производства сварочных материалов в 2009 г. сократился почти на 30 % по сравнению с 2008 г. и достиг минимального за последние 20 лет уровня. Как результат, произошло сокращение производства сварочных материалов по отдельным видам продукции (от 9 до 44 %).

Данные об объеме внутреннего потребления основных видов сварочных материалов представлены в табл. 12 [16].

Сокращение общего объема потребления сварочных материалов повлияло на потреблении отдельных видов сварочных материалов. В наименьшей степени уменьшилось потребление порошковой проволоки (–9 %), при этом ее доля в структуре потребления возросла до 38,7 % и стала сопоставима с долей применения сплошной проволоки, объем применения которой сократился в наибольшей степени (44,2 %).

Объемы внешней торговли сварочными материалами также уменьшились; импорт сварочных материалов уменьшился на 40 %, что составило 33,62 тыс. т. При этом импорт сплошной проволоки сократился на 56,6 % (до 11,5 тыс. т), покрытых электродов — на 20,4 % (до 1,58 тыс. т). Вместе с тем, импорт порошковой проволоки возрос на 4 % и в 2009 г. составил 14,4 тыс. т. Экспорт сварочных материалов уменьшился на 31,5 % и составил 39,98 тыс. т.

По оценкам японских экспертов, в 2010 г. не ожидается существенного роста производства металлообрабатывающих отраслей промышленности и в строительстве, поэтому спрос на сварочные материалы останется практически на уровне 2009 г. Прогнозировалось, что объем производства сварочных материалов в 2010 г. возрастет на 2,1 % и составит 257,6 тыс. т, экспорт сварочных материалов возрастет на 2 % (до 36,7 тыс. т), а импорт — на 2,3 % (до 34,38 тыс. т).

Рынок сварочных материалов *Индии* является одним из наиболее динамично развивающихся в Азии. Исходя из оценки крупнейшей индийской компании по производству сварочной техники «Ador Welding Ltd.», объем рынка сварочных материалов занимает около 70 % всего рынка сварочной техники Индии и в 2009 г. составил около 450 млн дол. США. За период 2007–2009 гг. рынок увеличил свой рост. Как пример, рост доходов крупнейшей компании ESAB INDIA Ltd. в 2009 г. составил 15 %.

Рынок сварочных материалов Индии фрагментирован: около 50 % контролируется «неорганизованными» участниками; более 50 % «организованного» рынка занимают компании AWL

**Таблица 12. Объем и структура внутреннего потребления основных видов сварочных материалов в Японии**

Сварочные материалы	2008		2009		2009/2008, %	2010	
	тыс. т	доля, %	тыс. т	доля, %		тыс. т	доля, %
Покрытые электроды	40,6	11,4	30,6	12,1	75,4	29,4	11,5
Проволока для сварки под флюсом и флюс	40,2	11,3	28,9	11,4	71,9	31,3	12,3
Сплошная тонкая проволока	167,5	46,7	93,4	37,0	55,8	95,5	38,2
Проволока для сварки ТИГ и других способов (газовой сварки и резки)	2,1	0,6	1,9	0,8	90,5	1,9	0,8
Порошковая проволока	107,5	30,0	97,4	38,7	90,9	99,5	37,2
Всего	358,4	100,0	252,2	100,0	70,4	257,6	100,0



**Таблица 13.** Оценка объема потребления сварочных материалов в Индии согласно структуре применения процессов дуговой сварки, тыс. т

Год	Дуговая сварка				Всего
	плавящимся покрытым электродом	плавящимся покрытым электродом в защитном газе	под флюсом	вольфрамовым электродом в защитном газе	
2007	262	58	17,5	2,6	340,1
2008	278	65	19,0	2,8	364,8
2009	296	74	20,5	3,0	393,9
2010	315	82	22,0	3,2	422,2
2011	335	93	24,0	3,4	455,4

(23 %), ESAB (17 %), D&H Welding. По оценке индийских экспертов, ежегодный прирост рынка сварочных материалов в ближайшие годы составит примерно 15...16 %.

В табл. 13 приведены данные об объеме потребления сварочных материалов согласно структуре применения различных процессов дуговой сварки за период 2007–2010 гг. и прогноз на 2011 г.

Доминирующую позицию (около 80 %) на рынке сварочных материалов Индии занимают электроды для ручной дуговой сварки. Прогнозируется, что в ближайшие 3...5 лет доля применения дуговой сварки плавящимся покрытым электродом сократится до 65 %, а дуговой сварки плавящимся покрытым электродом в защитном газе возрастет с 17 до 27 %, доля других сварочных процессов останется без изменения. Объем потребления сварочных материалов за этот период увеличится на 30...35 % [17, 18].

В Республике Корея, по данным фирмы «Frost & Sullivan», стоимостный объем рынка сварочной техники в 2005 г. составлял 656,2 млн дол. США, согласно прогнозу к 2012 г. он достигнет 955 млн дол. США. Материалы и оборудование для дуговой сварки занимают 85,6 % всего рынка сварочной техники, из них 27,1 % приходится на долю сварочных материалов. Таким образом, в

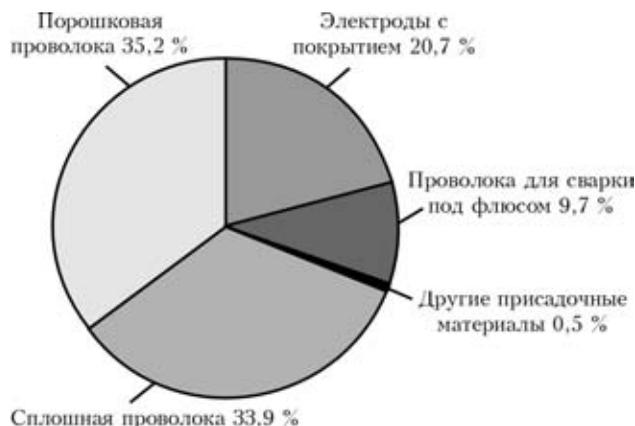


Рис. 12. Структура производства сварочных материалов в Республике Корея в 2005 г.

2005 г. стоимостный объем рынка сварочных материалов составлял 177,7 млн дол. США [19].

Рынок сварочных материалов в Республике Корея развивается очень динамично. За период 1995–2005 гг. объем производства сварочных материалов в стране возрос в 5 раз (около 300 тыс. т). При этом внутреннее потребление составляло 62 % выпускаемых сварочных материалов, 38 % — экспортируется [20]. Из производимых в стране сварочных материалов более 70 % приходится на сплошную и порошковую проволоку. На рис. 12 представлена структура производства сварочных материалов в Республике Корея.

За период 2006–2008 гг. в стране отмечен рост потребления стали (11,5 %), возросло также производство сварочных материалов, что подтверждается данными об увеличении объема производства сварочных материалов крупнейшими товаропроизводителями сварочных материалов Республики Корея. В табл. 14 приведены данные об объеме производства сварочных материалов компании «Hyundai Welding Co. Ltd.» за 2006 и 2009 гг. На внутреннем рынке сварочных материалов доля продаж этой компании составляет 62 %. Как видно из таблицы, помимо роста объема производства, существенные изменения претерпела и структура производимых сварочных материалов. Почти в 2 раза сокращен выпуск электродов для ручной дуговой сварки. Нарастает производство порошковой и сплошной проволоки, проволоки и флюса для автоматической сварки [21].

В 2009 г. вследствие сокращения заказов в отраслях — основных потребителей сварочных материалов (прежде всего в судо- и автомобилестроении) — произошел спад производства сварочных материалов. По нашей оценке, в 2009 г. объем производства сварочных материалов в Республике Корея уменьшился приблизительно на 20 % (около 260 тыс. т). По данным ООН (база данных COMTRADE), объем экспорта сварочных материалов в 2009 г. сократился на 7 % (73 тыс. т), а импорта — на 34 % (26 тыс. т) [22].

**Таблица 14.** Объем производства сварочных материалов в компании «Hyundai Welding Co. Ltd.», тыс. т

Сварочные материалы	2006	2009
Покрытые электроды для ручной дуговой сварки	60	36,0
Порошковая проволока для сварки в защитном газе	25	45,0
Сплошная легированная проволока для дуговой сварки в защитном газе	25	36,0
Проволока и флюс для автоматической сварки	6	19,2
Всего	116	136,2

По оценке немецких экспертов DVS, в 2007 г. стоимостный объем производства расходных материалов в странах ЕС составлял 2100 млн евро, из них сварочных материалов — 1 717 млн евро. Основными производителями и потребителями расходных материалов в Европе являются Германия, Франция и Италия. В табл. 15 приведены объемы производства основных видов расходных материалов в странах ЕС, которые применяются при сварке и в родственных технологиях [5].

Германия выпускает 30 % общего объема производства сварочных материалов, производимых в странах ЕС, а Германия, Франция и Италия совместно — более половины всех расходных материалов.

В структуре производства и применения сварочных материалов в странах ЕС доминирует сплошная проволока (ее доля составляет около 70 %), доля порошковой проволоки — около 10 %, доля электродов для дуговой сварки — около 10 %. В Европе продолжается процесс сокращения потребления сварочных электродов, которые в настоящее время предназначены для применения в специальных областях.

По данным DVS, в 2009 г. стоимостный объем производства сварочных и присадочных материалов в странах ЕС уменьшился в среднем на 30 %, что подтверждается данными ведущего европейского производителя сварочных материалов — компании ESAB, у которой доход от продаж на европейском рынке в 2009 г. сократился на 30 %.

**Таблица 15. Объем производства расходных материалов в странах ЕС в 2007 г., млн евро**

Страна	Материалы для			Всего
	сварки	пайки	термического напыления	
Германия	415	83	78	576
Франция	213	51	47	311
Италия	264	10	28	302
Нидерланды	42	22	9	73
Польша	35	5	10	50
Великобритания	142	19	48	209
ЕС (27)	1714	127	256	2100

Оценить объем и структуру производства расходных материалов в Европе за период 2007–2009 гг. позволяют данные о стоимостном и количественном объеме производства сварочных материалов в Германии по отдельным группам продукции, которые представлены в табл. 16 и 17. Согласно этим данным стоимостный объем производства сварочных материалов в Германии в 2009 г. сократился на 32,6 %, количественный — на 23,9 %, а по отдельным видам продукции, например, по покрытым электродам, — в 2 раза [10].

Опираясь на данные, представленные в табл. 16 и 17 и исходя из того, что Германия производит 30 % всего европейского объема про-

**Таблица 16. Производство сварочных материалов в Германии за период 2007–2009 гг., млн евро**

Сварочные и вспомогательные материалы	Объем производства, млн. евро			Изменение 2009/2008, %
	2007	2008	2009	
Сварочная проволока и лента (исключая проволоку и ленту с покрытием и наполнением)	221,2	221,2	145,4	-34,3
Покрытые электроды для дуговой сварки	64,5	71,6	31,6	-55,9
Порошковые проволоки для дуговой сварки	46,4	53,1	33,0	-37,9
Прутки с покрытием для пайки и автогенной сварки	56,1	61,0	44,7	-26,7
Вспомогательные расходные материалы для сварки и пайки металлов	109,6	113,4	95,6	-15,7
Всего	497,8	520,1	350,3	-32,6

**Таблица 17. Производство сварочных материалов в Германии за период 2007–2009 гг., т**

Сварочные и вспомогательные материалы	Объем производства, т			Изменение 2009/2008, %
	2007	2008	2009	
Сварочная проволока и лента (исключая проволоку и ленту с покрытием и наполнением)	93437	90873	59159	-34,9
Покрытые электроды для дуговой сварки	5379	5351	2967	-44,6
Порошковые проволоки для дуговой сварки	18276	22397	14527	-35,1
Прутки с покрытием для пайки и автогенной сварки	—	—	9281	—
Вспомогательные расходные материалы для сварки и пайки металлов	45584	46010	39313	-14,6
Всего	162676	164631	125247	-23,9



изводства сварочной техники, стоимостный объем производства сварочных материалов в странах ЕС в 2009 г. составил приблизительно 1,2 млрд евро, при этом было произведено около 420 тыс. т. сварочных материалов.

В странах СНГ, в частности, в РФ сварочные электроды занимают 80 % общего объема производства сварочных материалов. Основным преимуществом в использовании сварочных электродов по сравнению с другими сварочными материалами, например, с порошковой проволокой, является низкая стоимость оборудования.

За последние 3...5 лет на российском, как и на мировом рынке, проявляется тенденция к уменьшению доли сварочных электродов в совокупном объеме использования средств для сварки металлов. Такая тенденция связана с увеличением доли сварки сварочными проволоками и контактной сварки как более экономичного и качественного способа соединения. Вместе с тем, с развитием строительной и железнодорожной отраслей промышленности, военно-промышленного и нефтегазового комплексов потребность в сварочных электродах среди российских потребителей по абсолютным показателям ежегодно увеличивается на 10...20 %. В табл. 18 приведены данные об объеме и структуре производства сварочных материалов в РФ за период 2004–2007 гг. [23].

Среди электродов общего назначения российские предприятия в наибольших объемах выпускают электроды с рутиловым (MP-3, АНО-21, ОЗС-12) и ильменитовым (АНО-6) покрытиями. Доля таких электродов составляет около 60 % общего объема производства. Они пользуются большим спросом, поскольку пригодны для сварки как на переменном, так и на постоянном токе практически во всех положениях. Сварку могут выполнять сварщики даже невысокой квалификации. В меньших объемах выпускают электроды с покрытием основного вида (УОНИ-13/45, УОНИ-13/55), их доля составляет около 36 %. Эти электроды применяют для сварки особо ответственных конструкций, при этом от сварщика требуется высокая квалификация.

В последние годы для российского рынка сварочных электродов характерна тенденция увеличения импортных поставок и сокращения объемов экспорта. При этом доля импорта невелика — не более 10 % производимой продукции. В 2007 г. объем импорта сварочных электродов превысил 26 тыс. т, в 2008 г. — 33 тыс. т, в 2009 г. — 21 тыс. т. Объем экспорта составил соответственно 14, 13, 9 тыс. т.

В настоящее время крупнейшими отечественными производителями электродов в РФ являются три предприятия — Новосибирский электродный завод, по данным завода, его доля на российском рынке электродов составляет 35,2 %, Новочеркасский электродный завод, доля которого составляет 26,8 %, и Челябинский электродный завод, доля которого 23,2 %. Все три предприятия находятся под управлением компании «Энергопром Менеджмент».

По мнению экспертов, перспективы развития российского рынка сварочных материалов в ближайшей и среднесрочной временных перспективах связаны с дальнейшим ростом объема рынка электродов в абсолютных показателях. При этом их доля в общем объеме производства и потребления сварочных материалов будет сокращаться. Продолжится рост потребления сплошной и порошковой проволоки, но доминирующее положение на рынке все-таки будут занимать электроды [24].

Экономика Украины является одной из наиболее пострадавших от кризиса в Европе. Из-за падения спроса и выручки, а также отсутствия кредитов предприятия Украины сократили производство. В 2008 г. промышленное производство снизилось на 3,1 %, а уже в первом квартале 2009 г. падение превысило 30 %. Общее состояние экономики отразилось на объеме производства и потребления сварочной техники и материалов.

В табл. 19 представлены данные Украинского комитета статистики об объеме производства, потребления основных видов сварочных материалов и торговли ими за период 2007–2009 гг. [25].

Таблица 18. Объем производства сварочных и присадочных материалов в РФ за период 2004–2007 гг., т

Тип сварочных материалов	2004	2005	2006	2007
Покрытые электроды	223743	240 00	255600	266600
Проволока сварочная, легированная диаметром 2 мм и более, включая:	32635	33400	35100	39600
диаметром 0,8...1,4 мм	13980	18200	22400	18800
Порошковая проволока, включая:	3458	2965	4785	4800
сварочную	2212	1380	1603	2300
для нанесения покрытий	1246	1585	3182	2500
Сварочные флюсы	10585	12473	10300	8600
Всего	270421	289238	305785	319600

Таблица 19. Видимое потребление в Украине сварочных и присадочных материалов, тыс. т

Год	Показатель	Сварочная проволока		Порошковая проволока	Электроды	Флюсы	Всего
		обычная	легированная				
2007	Производство	8,4	13,6	0,9	59,0	29,5	111,4
	Экспорт	—	6,1	0,2	3,90	21,4	31,6
	Импорт	—	4,7	0,8	2,2	0,3	8,0
	Видимое потребление	8,4	12,2	1,5	57,3	8,4	87,8
2008	Производство	9,0	12,8	0,6	43,0	27,8	93,2
	Экспорт	—	5,3	0,3	3,9	19,7	29,2
	Импорт	—	6,6	1,2	3,7	0,9	41,6
	Видимое потребление	9,0	14,1	1,5	42,8	9,0	76,4
2009	Производство	7,1	9,2	0,2	33,7	18,7	68,9
	Экспорт	—	3,0	0,2	5,9	13,1	22,2
	Импорт	—	2,3	0,7	0,8	1,9	5,70
	Видимое потребление	7,1	8,5	0,7	28,6	7,5	52,4

В структуре производства и потребления сварочных материалов в Украине более 50 % составляют сварочные электроды, среди которых доля электродов типа АНО — более 70 %. За период 2007–2009 гг. производство сварочных материалов в стране сократилось почти в 2 раза, причем по всем основным видам продукции. Потребление сварочных материалов уменьшилось на 40 %. Основную долю экспорта сварочных материалов составляли плавные флюсы, а импорта — сварочная легированная проволока.

**Рынок сварочного оборудования.** Крупнейшими региональными рынками сварочного оборудования являются США, страны ЕС и Азии (Япония, Китай, Республика Корея). Суммарная доля продаж на этих рынках составляет 3/4 всего мирового рынка сварочного оборудования. В 2009 г. на мировом рынке сварочного оборудования был отмечен спад продаж (в среднем на 6,4 %), что связано со значительным сокращением спроса в большинстве металлоперерабатывающих отраслей промышленности. В наибольшей степени это коснулось рынков Европы и Америки (до 30...40 %). Однако увеличение продаж на рынках Азии и Южной Америки и возросший спрос на сварочную технику в энергетике (производство турбин для ветровых станций) и секторе ремонта и восстановительных работ позволило в значительной степени компенсировать падение продаж.

Мировой рынок оборудования для сварки весьма фрагментирован. Сварочное оборудование производят более чем 1500 крупных и средних производителей, основными из которых являются следующие компании: «ACRO Automation Systems, Inc.», «Boehler Thyssen Welding USA, Inc.», «Datalogic Automation S.r.», «ESAB Holdings Ltd.», «KUKA Aktiengesellschaft AG», «L'Air Liquide

S.A.», «Lincoln Electric Holdings, Inc.», «Miller Electric Mfg. Co», «Miyach Corp.», «Motoman, Inc.», «OBARA Corp.», «Panasonic Welding Systems Co», «Soudronic AG», «Schlatter Hoding AG» и др.; по объему оборота в 2008 г. в пятерку мировых лидеров вошли фирмы «Lincoln Electric» (2,5 млрд дол. США), ESAB (2,5 млрд дол. США), ITW (1,8 млрд дол. США), ALW (900 млн дол. США), «BOHLER» (800 млн дол. США) [26].

**Оборудование для дуговой сварки.** Аналогично тому, как сталь сохраняет свои позиции базового материала для сварных конструкций, так и среди обширного арсенала технологий неразъемного соединения базовой остается дуговая сварка плавлением. Характерной тенденцией развития дуговой сварки является сокращение доли ручной сварки покрытыми электродами за счет расширения применения более производительной автоматизированной сварки сплошной и порошковой проволоками в защитных газах. Так, за последние 30 лет доля применения ручной сварки покрытыми электродами в ведущих регионах мира сократилась практически в 2 раза. В последние годы темпы сокращения использования этого способа сварки несколько замедлились, и есть все основания полагать, что в ближайшем будущем доля ручной дуговой сварки (по массе наплавленного металла) в промышленных странах стабилизируется на уровне примерно 15 %. В развивающихся странах доля применения ручной дуговой сварки все также велика и составляет около 60 %.

В 2008 г. сегмент мирового рынка оборудования для дуговой сварки был оценен компанией «Frost&Sullivan» в 3,3 млрд дол. США. Доля рынка оборудования для дуговой сварки Западной Европы составляет около 30 % всего рынка сварочного оборудования этого региона. В 2007 г. объем продаж этого сегмента рынка составил



572,4 млн дол. США, или 29,6 % всего рынка сварочного оборудования Западной Европы. Спад продаж в секторе оборудования для дуговой сварки в связи с кризисом 2009 г. составил в Германии — основном производителе сварочной техники в Европе — около 10 % (в среднем по отрасли — 33,5 %). В Японии сокращение производства стандартного оборудования для дуговой сварки составило 66 %.

На рынке оборудования для дуговой сварки доминируют машины для сварки в защитных газах. В Японии, например, этот вид оборудования составляет 90 % рынка оборудования для дуговой сварки. Спрос на оборудование для сварки в защитных газах стабильно высок. Современные машины для дуговой сварки (МИГ/МАГ, ТИГ) комплектуются источниками питания с цифровыми системами управления. Применение мощных компьютеров и инверторных схем позволяет управлять дуговыми процессами с высокой скоростью, точностью и оптимальностью. Оборудование оснащено также цифровым управлением механизмами подачи проволоки. Большим спросом пользуется оборудование для комбинированных и гибридных технологических процессов сварки — плавящимися электродами в защитном газе, гибридной лазерно-дуговой сварки и плазменно-дуговой сварки.

С увеличением объема потребления алюминия растет рынок оборудования для сварки алюминия, где в настоящее время также основную долю составляет оборудование для дуговой сварки металлическим (МИГ/МАГ) и вольфрамовым электродом (ТИГ) в защитных газах. По данным компании «Frost&Sullivan», в 2009 г. объем мирового рынка оборудования для сварки алюминия составил 912,4 млн дол. США. Прогнозируется, что к 2015 г. объем рынка составит 1,222 млн дол. США, а ежегодный рост — 5 %.

Основными требованиями потребителей к оборудованию для дуговой сварки является снижение массы, повышение надежности аппаратов и их качества, стабильность параметров сварки, широкий диапазон применения оборудования. Возросла потребность в автоматизированном сварочном оборудовании. Так, например, в Японии, каждый четвертый из десяти источников питания, применяемых в промышленности, оснащен цифровым управлением [27, 28].

*Оборудование для газовой сварки и резки.* Объем применения газокислородной сварки продолжает сокращаться и заменяться другими более прогрессивными технологиями. Оборудование для газокислородных процессов сварки отличается низкой стоимостью, оно портативное и автоматизированное в части оборудования для резки. Однако медленная ручная работа и недостаток квалифицированной рабочей силы для работы с

этим оборудованием ограничивают его применение. Наиболее перспективный тип оборудования в этом сегменте рынка — машины для автоматической резки. Использование этого типа машин все возрастает несмотря на серьезную конкуренцию со стороны оборудования для лазерной, плазменной резки и резки водяной струей. При прогнозируемом ежегодном среднем росте рынка на 2,3 % рынок газокислородной резки выглядит несколько лучше: прогнозируется его рост на 3,2 %. В 2009 г. доля оборудования для газовой сварки и резки составляла около 8 % мирового сварочного рынка, это около 1 млрд дол. США [29].

*Оборудование для контактной сварки.* Рынок оборудования для контактной сварки составляет около 20 % всего рынка сварочного оборудования, а годовые продажи — около 2,0 млрд дол. США. Основными потребителями оборудования для контактной сварки являются такие отрасли, как автомобиле- и судостроение, а также строительство. Однако в настоящее время потребители этого вида оборудования, особенно автомобилестроительные компании, предпочитают закупать лазерное автоматизированное оборудование, что приводит к возникновению определенных трудностей для производителей оборудования для контактной сварки в плане сохранения их доли на рынке. Наибольший рост продаж оборудования для контактной сварки прогнозируется в Азии (Китай, Япония, Малайзия, Таиланд, Индонезия, Республика Корея, Сингапур), чему способствует рост зарубежных инвестиций в данный регион, особенно в автомобилестроение и электронную промышленность, где возрос спрос на оборудование для контактной точечной сварки [29].

*Оборудование для лазерной сварки.* Рынок оборудования для лазерной сварки и резки стабильно развивается во всех регионах мира. Несмотря на ее дороговизну эта технология соединения обеспечивает высокое качество сварки в результате чего получила широкое применение в автомобилестроении, металлообрабатывающей и аэрокосмической промышленности. По данным фирмы «Optech consulting» [30], объем продаж макропроцессорных лазерных промышленных систем, которые включают оборудование для резки, сварки, маркировки и других процессов, в 2009 г. составил 3,8 млрд евро, что на 40 % меньше, чем в 2008 г. Доля лазерных систем, применяемых для сварки и резки в 2008 г., равна 51 %.

Мировой рынок промышленных лазерных систем для сварки и резки занимает более половины мирового рынка промышленных лазерных систем. По оценке фирмы «Frost&Sullivan», европейский рынок лазерного сварочного оборудования к 2011 г. составит 802 млн дол. США. Такому росту способствует совершенствование лазерных технологий, в частности, оснащение лазерных систем

дисковыми и волоконными лазерами, объем продаж которых постоянно увеличивается [29].

Гибкость систем производства, высокая надежность оборудования и легкая интеграция в производственные линии являются теми факторами, которые дают основание ожидать дальнейший рост объемов применения данного вида оборудования. В это же время высокая начальная стоимость, недостаток знаний конечных пользователей о преимуществах данного процесса и недостаточная их квалификация являются тормозом роста объемов продаж данного оборудования.

*Оборудование для ультразвуковой сварки.* По оценке экспертов компании «Frost&Sullivan», рынок оборудования для ультразвуковой сварки имеет значительный потенциал. Этот процесс сварки применяют для соединения как пластмасс, так и металлов. Прогнозируется рост продаж оборудования для сварки пластмасс на 6 %, а оборудования для сварки металлов — приблизительно на 9 %. Объем мирового рынка оборудования для ультразвуковой сварки составил в 2006 г. 630 млн дол. США. Фактором, содействующим росту применения данного процесса, является сокращение применения адгезии для термопластических соединений [29].

*Рынок сварочных роботов.* Для современного сварочного производства наряду с обновлением технологий характерен высокий уровень механизации, автоматизации и роботизации с использованием информационных технологий и компьютерных систем управления, диагностики и контроля.

За последнее десятилетие впечатляет увеличение общемирового парка промышленных роботов. В 1990 г. в мире их эксплуатировалось 460 тыс. шт., в 2003 г. — 886 тыс. шт., в 2010 г. — 1,2 млн шт. При этом почти 50 % всего мирового парка промышленных роботов эксплуатируется в Японии и Республике Корея. В табл. 20 представлены данные об объеме ежегодных продаж и парке промышленных роботов в мире за период 2008–2010 гг. и дан прогноз на 2013 г.

В 2009 г. объем продаж промышленных роботов в стоимостном выражении сократился на 39 % по сравнению с 2008 г. и составил 3,8 млрд дол. США. На рис. 13 приведены данные о ко-

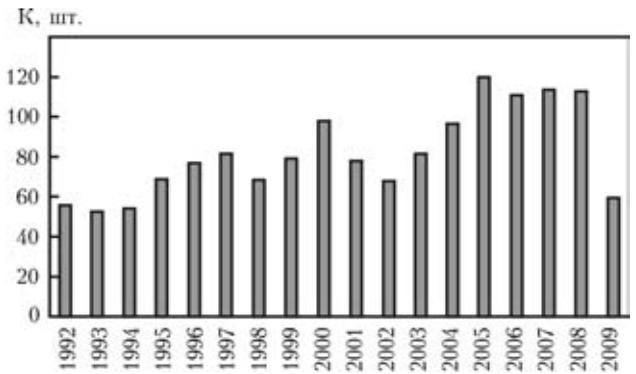


Рис. 13. Количество K промышленных роботов, установленных в мире за период 1992–2009 гг. (по данным IFR)

личестве промышленных роботов, ежегодно устанавливаемых в мире.

Япония, являясь крупнейшим мировым производителем промышленных роботов, начиная с 2006 г., постоянно сокращает инвестиции в производство. В 2009 г. объем производства роботов в этой стране сократился на 50 % по сравнению с 2008 г. В Республике Корея объем потребления промышленных роботов уменьшился с 11 600 (2008 г.) до 7 800 шт. (2009 г.). Продажи в Европе сократились на 41 % (до 20500 шт.). В наибольшей степени уменьшили закупку такие отрасли промышленности, как автомобиле- (–52 %) и машиностроение (–64 %). Сократились продажи роботов в Китае, Индии, Таиланде, Тайване, и только в Мексике в 2009 г. наметился рост продаж (до 1 100 шт.) в основном в автомобилестроении.

По оценке экспертов International Federation of Robotics (IFR), начиная с 2010 г. мировой рынок промышленных роботов ежегодно будет возрастать на 5,5 %. В ближайшие годы крупнейшим потребителем в этой сфере будет Китай, его доля в мировом потреблении возрастет до 29 %.

Сегодня промышленные роботы в сварочном производстве — это базовый элемент в процессе высокопроизводительного изготовления сварных изделий и конструкций повышенного качества. Доля производства сварочных роботов составляет около 30 % всех промышленных роботов, а с учетом роботов, предназначенных для процессов резки, пайки, нанесения покрытий и склеивания, она возрастает до 40 %. В Испании, Великобритании, США и ряде других стран доля сварочных роботов

Таблица 20. Мировой рынок промышленных роботов за период 2008–2010 гг.

Показатель	2008	2009	2010	2013 (прогноз)
Объем продаж	113345	60018	76000	102300
Объем продаж, исключая Японию и Республику Корея	68635	39412	49200	69300
Общее количество (парк) эксплуатируемых промышленных роботов	1 035674	1 020731	1 173300	1 119800
Общее количество (парк) эксплуатируемых промышленных роботов, исключая Японию и Республику Корея	603189	609008	693800	746300



составляет около половины всего парка промышленных роботов [31].

Таким образом, из изложенного выше можно заключить, что мировой рынок техники для соединения постоянно возрастает. В настоящее время его рост происходит в основном за счет стран Азии, особенно Китая. На рынке сварочных материалов доминирует потребление сплошной и порошковой проволоки, хотя доля покрытых электродов также велика, особенно на растущих рынках стран Азии, Южной Америки и СНГ.

На мировом рынке сварочного оборудования доминирует спрос на машины для дуговой и контактной сварки. Значительными темпами растет рынок оборудования для высоких технологий — лазерной сварки и резки, гибридной сварки, а также других технологий соединения — склеивания, пайки и механических соединений.

Для современного рынка сварочной техники характерны следующие тенденции: увеличение потребности в автоматизации технологий соединения, что отвечает решению задач увеличения производительности, повышения качества и скорости сварочных процессов, снижения затрат на производство, оплату труда и подготовку кадров; рост объема применения специальных сталей и сплавов, алюминиевых сплавов и пластмасс в основных отраслях промышленности, в частности, в автомобилестроении и авиакосмической промышленности, что требует соответствующих технологий соединения, оборудования и материалов; увеличение доли выпуска продукции с более высокой добавленной стоимостью за счет применения различных датчиков контроля, цифровых схем управления, компьютеризации технологических процессов.

1. *Thermadyne* Holdinds Corporation (NASDAQ: THMD). Oppenheimer 4th Annual «Industrials» conf., Nov. 18, 2009. — 20 p.
2. *Pekkari B.* The welding world is changing // *Lumea sudarii*. — 2006. — № 2. — P. 3–12.
3. *Wang Xiaobao.* Rise of China brings the welding industry worldwide with rosy prospects // *China Welding*. — 2005. — № 9. — P. 9–12.
4. OECD.-DSTI/SU/SC920104. Perspectives on steel by steel-using industries // 68th SteelCommittee meet., Paris, May 6–7, 2010. — 10 p.

5. *Middeldorf K.* The economic importance of welding and joining in wurope production values, values added and employees: Rep. / DVS, July 24, 2009. — 12 p.
6. *Welding* equipment and supplies: The global market. — www.bccresearch.com.
7. *Thermadyne* Holdinds Corporation (NASDAQ: THMD). BB&T Capital markets conf., Apr., 2009. — 20 p.
8. *Thermadyne* Holdinds Corporation (NASDAQ: THMD). Investor presentation, Aug., 2010. — 20 p.
9. *CHARTER.* An introduction: Charter, Sept., 2010. — 78 p.
10. *Schweißen und Schneiden 2009* — Im tiefen Tal der Wirtschaftskrise // *Schweißen und Schneiden*. — 2010. — 62, № 9. — S. 476–482.
11. *Important drivers for global welding market* // *Welding and Cutting*. — 2009. — № 6. — P. 316–317.
12. 2009 Wind technologies market report / U.S. Department of Energy, August, 2010.
13. *Neueste Trends in der Fugetechnik* // *Stahlmarkt*. — 2005. — № 8. — S. 58–59.
14. *Chinece market a fast demand recovery advances* // *The Japan Welding News for the World*. — 2010. — Spring Iss. — 14, № 51.
15. *Походня И. К., Котельчук А. С.* Прогресс черной металлургии и производства сварочных материалов в КНР // *Автомат. сварка*. — 2010. — № 1. — S. 37–41.
16. *What does 2010 hold for the Japan's welding undustry?* // *The Japan Welding News for the World*. — 2010. — Winter Iss. — 14, № 50.
17. *Indian welding: from manual to moon probe* // *Australasian Welding J.* — 2009. — 54, First Quarter.
18. *Сварка в Индии* // *Технология сварки*. — 2008. — № 4. — С. 51–55.
19. *South Korean welding market*. — www.researchandmarkets.com.
20. *Cho Seon Mook.* State-of-the-art of welding materials and instrument in Korea // *J. Jap. Weld. Soc.* — 2005. — 74, № 1. — P. 18–19.
21. *Hyundai Welding Co. Ltd.* — www.hdweld.co.kr.
22. UN COMTRADE. — www.comtrade.un.org.
23. *Ignatchenko P. V.* Production of welding consumables CIS (on base of materials of the IV Intern. conf. on Welding consumables of CIS Countries) // *The Paton Welding J.* — 2007. — № 10. — P. 23–27.
24. *Обзор* российского рынка сварочных электродов. — www.wwr.ru.
25. *Економіко-статистичний огляд* зварювального виробництва і ринку зварювальної техніки України в 1990–2009 pp. — К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2010. — 71 с.
26. *Global welding machinery market* // *Global Industry Analysts, Inc.* — www.StrategyR.com.
27. *Popescu M., Glita G., Magda A.* Current scenario and prospects in welding industry // *Annals of the ORADEA University*. — Fascicle of management and technological engineering. — 2007. — VI (XVI). — P. 1671–1679.
28. *Полевой А.* Сварочный прогресс // *Единый промышленный портал Сибири*. — www.epps.ru.
29. *Frost&Sullivan*. — www.frost.com.
30. *Optech consulting*. — www.Optech-consulting.com.
31. *International federation of robotics*. — www.ifr.org.

Systematised economic-statistical information is presented on the state-of-the-art and development of the world, regional and national welding markets, covering a period of 2006–2009. Quantitative and cost indices of the volumes of production, consumption and export-import of the equipment and consumables for welding and related technologies are given.

Поступила в редакцию 17.03.2011

## СВАРОЧНЫЙ АЭРОЗОЛЬ — ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ, ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, МЕТОДЫ АНАЛИЗА (Обзор)

Академик НАН Украины **И. К. ПОХОДНЯ**, **И. Р. ЯВДОШИН**, канд. техн. наук, **И. П. ГУБЕНЯ**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены свойства сварочного аэрозоля (его дисперсность, морфология частиц) и методы, применяемые для анализа физических свойств и элементного состава ТССА. Приведены факторы, влияющие на выделение сварочного аэрозоля.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, сварочный аэрозоль, морфология частиц, электродное покрытие, методы анализа

В процессе дуговой сварки происходит взаимодействие расплавленного металла со шлаком и газами, при этом образуется сварочный аэрозоль (СА), состоящий из твердых частиц (ТССА) и газовой фазы (ГССА). В результате воздействия сварочного аэрозоля на организм возможны профессиональные заболевания сварщиков и рабочих смежных профессий. В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и Институте медицины труда НАМН Украины на протяжении многих лет проводятся исследования процессов образования ТССА и ГССА и их влияние на здоровье сварщиков. На основе этих исследований созданы низкотоксичные сварочные материалы, получившие широкое распространение в промышленности и строительстве. Результаты исследований опубликованы в работах [1–16].

Для исследований ТССА все шире начали применять физические методы. Разработан стандарт ISO-15011 на методы исследования сварочных аэрозолей, многие из которых недоступны отечественным ученым и инженерам-сварщикам.

В то же время на рынке стран СНГ появились сварочные электроды, импортируемые из стран Юго-Восточной Азии, использование которых вызывает отравления сварщиков марганцем. Предупреждение профессиональных заболеваний сварщиков остается одним из приоритетных направлений исследований в области сварки и родственных технологий. В настоящей статье сделан обзор исследований, посвященных СА.

**Факторы, влияющие на образование ТССА.** Источником СА является высокотемпературный пар, который образуется при испарении металла капли на торце электрода и сварочной ванны. Капля имеет большую удельную поверхность и нагревается до более высоких температур. Доля пара, образующегося при испарении металла сварочной ванны, составляет 10...15 % ТССА [8, 17].

В работе [17] рассматриваются также процессы образования аэрозоля — испарение с последующей конденсацией (с/без окисления), химически интенсифицированное испарение, разбрызгивание. Интенсивность испарения зависит от температуры металла, шлака и сварочной ванны, а также свойств испаряющихся материалов. Результаты исследований теплосодержания и температуры металла при дуговой сварке приведены в работе [1].

В работах [6, 8, 18] рассмотрены следующие факторы, влияющие на выделение ТССА: состав электродного покрытия и флюсового сердечника; режим сварки (ток и напряжение); род тока и полярность; состав основного и электродного металла; толщина электродного покрытия; диаметр электрода.

Установлено, что температура вблизи поверхности капель, образующихся при использовании электродов промышленных марок, находится в пределах 2150...2500 К и зависит от силы тока и состава покрытия. Наибольшая температура зарегистрирована у электродов с руднокислым покрытием, более низкая — у электродов с основным и рутиловым покрытиями [1].

Количество ТССА, выделяющееся при сварке электродами с разными типами покрытий, приведено на рис. 1. Повышение основности шлаковой фазы способствует интенсивному испарению калия, натрия, магния и кальция, причем начало этого процесса смещается в область более низких температур [6].

Тип связующего и его содержание в электродном покрытии в значительной мере определяют скорость образования аэрозоля (СОА). Максимум СОА наблюдается при использовании калиевого связующего и минимум — литиевого. Натриевое связующее занимает промежуточное место. Замена К–Na-связующего литиевым дает возможность уменьшить СОА на 50 % без снижения технологических характеристик электродов. Использование литиевого связующего в электродах для сварки нержавеющей стали приводит

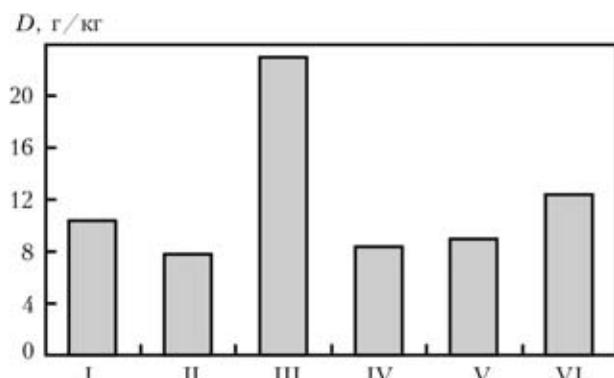


Рис. 1. Количество ТССА, выделяющееся при сварке электродами с ильменитовым (I), рутил-карбонатным (II), целлюлозным (III), рутиловым (IV), кислым с большим содержанием железного порошка (V) и основным (VI) покрытиями [6]

к уменьшению валовых выделений СА, а также к существенному снижению содержания шестивалентного хрома в ТССА [19].

Увеличение силы сварочного тока приводит к повышению температуры капли и интенсификации процесса испарения. Рост толщины покрытия приводит к некоторому снижению температуры капель электродного металла и улучшению шлаковой защиты капли. Увеличение диаметра электрода приводит к возрастанию выделений ТССА [8].

Влияние рода и полярности тока приведены на рис. 2. Наибольшая интенсивность образования аэрозоля наблюдается при сварке на обратной полярности, что обусловлено более высокой температурой капель.

Скорость сварки покрытыми электродами практически не влияет на образование аэрозоля.

**Строение частиц ТССА и дисперсность.** Размеры отдельных частиц ТССА колеблются от нескольких нанометров до десятков микрометров [11–13, 15, 17, 20]: первичные частицы (< 100 нм), частицы аккумуляционного диапазо-

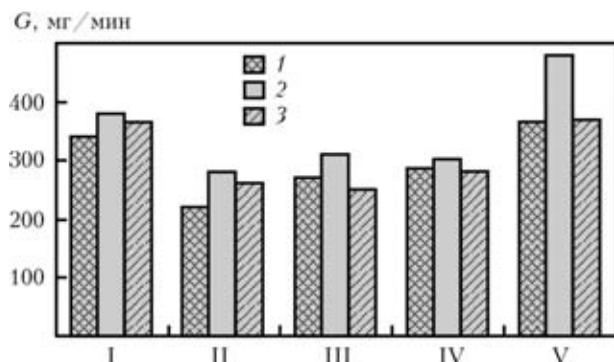


Рис. 2. Зависимость интенсивности выделения ТССА от рода и полярности тока при сварке электродами диаметром 4 мм с ильменитовым (I), рутил-карбонатным (II), рутиловым (III), кислым с большим содержанием железного порошка (IV) и основным (V) покрытиями [6]: 1 — переменный ток; 2 — постоянный ток, обратная полярность; 3 — то же, прямая полярность

на (100 нм...1 мкм) и крупные частицы (> 1 мкм). В работе [14] отмечается, что большинство первичных частиц имеет размер 5...40 нм. Более крупные частицы скапливаются в кластеры, а мелкие склонны к образованию цепочек.

ТССА состоит из частиц и агломератов сферической и несферической форм, большинство частиц имеет неоднородную структуру (состоит из ядра и оболочки) [6, 8, 13, 21]. Наблюдаются частично спеченные агломераты и агломераты с «открытой» структурой (образуются за счет вандерваальсовых сил, адсорбционных сил атмосферной влаги и электромагнитных сил), а также линейно агломерированные наноразмерные частицы [10, 14, 21].

Ядро частиц с неоднородной структурой обогащено соединениями железа и марганца, а оболочка содержит соединения кремния, калия и натрия. Такая неоднородность строения частиц ТССА связана с избирательностью процесса испарения и конденсации. Высокотемпературный пар имеет сложный состав и отдельные составляющие конденсируются при различной температуре. Сначала происходит конденсация элементов с более низким давлением пара (марганца, железа), а затем элементов с более высоким давлением пара (натрий, калий и др.).

На рис. 3 представлены частицы СА, полученные с помощью трансмиссионного (ТЕМ) и сканирующего электронного микроскопа (SEM).

Частицы различного размера по-разному влияют на организм сварщика. Частицы диаметром менее 20 мкм могут оставаться взвешенными в воздухе [11], частицы размером более нескольких микрометров осаждаются на стенках воздушных путей человеческого организма и выводятся наружу вместе со слюной. Около 30 % частиц размером 0,1...1 мкм осаждаются в легких. Частицы размером менее 0,1 мкм (100 нм) также вдыхаются и осаждаются в легких. 100 % частиц диаметром менее 1 мкм проникают в организм дыхательными путями [17]. Возможно проникновение наноразмерных частиц через кожу [23]. Так, они могут попадать в мозг через нервы в носовых пазухах [24, 25].

На рис. 4 представлены частотные характеристики распределения размеров частиц при сварке электродами с целлюлозным (Е6010) и основным (Е7018) покрытиями [12]. В работе [25] указывается, что токсичность наночастиц определяется не только их размерами, но и формой. Наночастицы дендритной и веретенообразной формы имеют более высокую цитотоксичность, чем частицы сферической формы.

**Методы анализа ТССА.** Международный стандарт ISO 15011-1 [26] устанавливает определенные требования к конструкции аэрозольной камеры, типам фильтров, насосу, хронометру и

весам. В таблице представлены данные о методах исследования размеров частиц. Приведенные данные свидетельствуют о разнообразии методов и оборудования, используемых для анализа размеров частиц, массового и размерного распределения ТССА.

Из-за большого диапазона размеров частиц сложно измерить размер каждой частицы и их распределение. Недостатки анализа ТССА методом электронной микроскопии — специфичность приготовления образцов (осаждение на подложку) и сложность получения массового и количественного распределения частиц СА.

При использовании метода аэродинамической сепарации существенным недостатком является разрушение кластеров при прохождении их через отдельные уровни импактора.

Недостатком анализа ТССА методом лазерной гранулометрии является предшествующее анализу или во время анализа диспергирование ультразвуковыми колебаниями в дисперсионной среде (жидкости).

Кроме того, поскольку частицы СА в основном это агломераты сложной и неоднородной формы и поверхности, сложно калибровать измерительное оборудование для СА со стандартными настройками для сферических частиц [11].

Ключевым фактором, определяющим вредное влияние составляющих СА на здоровье сварщика, наряду с дисперсностью частиц, является их химический состав. Аналитические методы для определения элементного состава ТССА, рекомендованные международным стандартом ISO 15011-1 [26] следующие: для определения алюминия, бария, бериллия, кадмия, кобальта, хрома, меди, железа, марганца, молибдена, никеля, свинца, ванадия, цинка и др. — индукционно связанная плазма — электронная оже-спектроскопия (ICP — AES); индукционно связанная плазма — масс-спектрометрия (ICP — MS); атомно-абсорбционная спектроскопия (AAS); атомно-флуоресцентная спектроскопия (AFS); рентгеновская флуоресцентная спектроскопия (XRF).

**Методы определения размера частиц**

Метод	Диапазон размеров, мкм	Оборудование
Электронная микроскопия	0,002...50	SEM, ТЕМ, электронный зонд (EPMA)
Оптическая микроскопия	1...400	Оптический микроскоп
Лазерная гранулометрия	0,01...3000	Анализаторы (разные виды)
Аэродинамическая сепарация	0,05...20	Импакторы (разные виды)

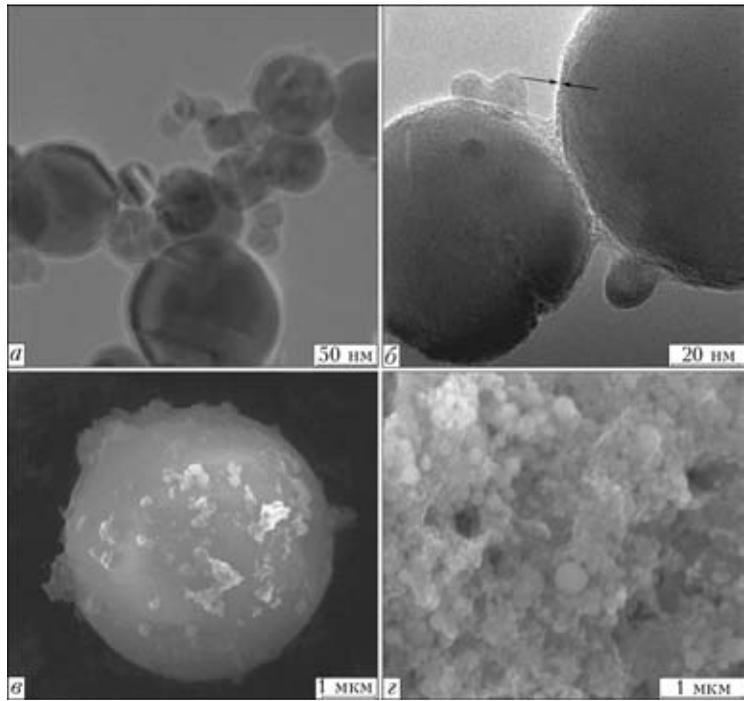


Рис. 3. Изображения ТССА, полученные с помощью трансмиссионного (а, б) [17, 22] и сканирующего (в, г) микроскопов: а, б — частицы неоднородной структуры (ядро более темное, а оболочка светлая); в — крупная сферическая частица, безопасная для органов дыхания, на поверхности которой находятся наноразмерные частицы; г — конгломерат наноразмерных частиц

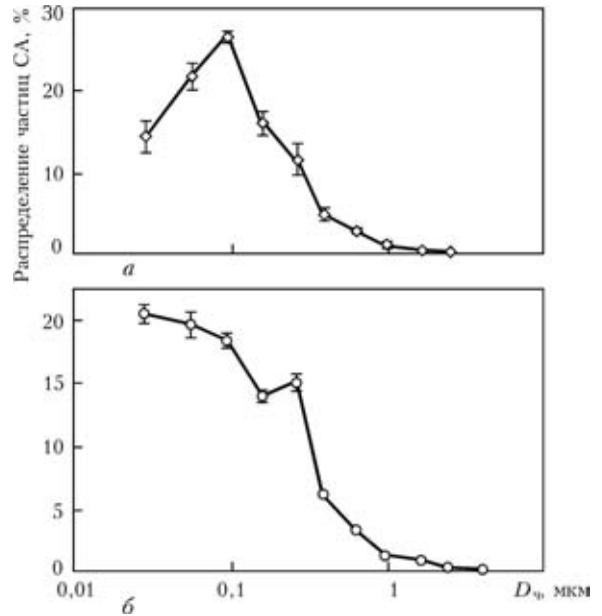


Рис. 4. Количественное распределение частиц СА по размерам для электродов с целлюлозным (а) и основным (б) покрытиями



Для определения шестивалентного хрома — ионная хроматография, спектрометрия. Важно, чтобы используемый фильтр был применим для улавливания шестивалентного хрома. Много фильтрующих материалов (например, смешанные целлюлозно-эфирные мембранные фильтры) реагируют с шестивалентным хромом, в результате чего его валентность снижается до трех и полученные результаты низкого качества. Успешное и широкое применение нашли фильтры из кварцевого волокна, стекловолокна и поливинилхлоридные.

Для определения фтора — ионная хроматография; ионно-селективный электрод (ISE).

1. Походня И. К. Газы в сварных швах. — М.: Машиностроение, 1972. — 256 с.
2. Явдошин И. Р., Булат А. В., Швачко В. И. Влияние технологических и металлургических факторов на гигиенические показатели электродов с рутиловым и ильменитовым покрытиями // Тр. Всесоюз. конф. по сварочным материалам, Орел, окт., 1979 г. — Киев, 1982. — С. 45–53.
3. Источники поступления марганца и железа в сварочный аэрозоль / И. К. Походня, И. Р. Явдошин, А. В. Булат, В. И. Швачко // Автомат. сварка. — 1981. — № 3. — С. 37–39.
4. Войткевич В. Г., Безрук Л. И., Есауленко Г. Б. Электронно-микроскопическое исследование твердой составляющей сварочных аэрозолей // Там же. — 1984. — № 6. — С. 33–35.
5. Походня И. К., Булат А. В., Явдошин И. Р. Особенности испарения натрия, калия, магния и кальция из сварочных шлаков, содержащих двуокись титана // Там же. — 1986. — № 3. — С. 27–29.
6. Металлургия дуговой сварки. Процессы в дуге и плавление электродов / Под ред. И. К. Походни. — Киев: Наук. думка, 1990. — 222 с.
7. Волокова Н. Н., Войткевич В. Г. Нейротоксичность и физико-химические свойства аэрозолей конденсации сложного состава // Динамические процессы в сложно-организованных системах. — М.: Изд. Ин-та физ.-техн. проблем РАН, 1991. — С. 123–129.
8. Voitkevich V. Welding fumes: formation, properties and biological effects. — Cambridge: Abington publ., 1995. — 110 p.
9. Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие металла с газами / Под ред. И. К. Походни. — Киев: Наук. думка, 2004. — 442 с.
10. Zimmer A. E. The influence of metallurgy on the formation of welding aerosols // J. Environ. Monitoring. — 2002. — № 4. — P. 628–632.
11. Jenkins N. T., Pierce W. M. G., Eagar T. W. Particle size distribution of gas metal and flux cored arc welding fumes // Welding J. — 2005. — № 84. — P. 156–163.
12. Characterization of welding fume from SMAW electrodes. Pt I / J. W. Sowards, J. C. Lippold, D. W. Dickinson, A. J. Ramirez // Ibid. — 2008. — № 4. — P. 106–112.
13. Characterization of welding fume from SMAW electrodes. Pt II / J. W. Sowards, J. C. Lippold, D. W. Dickinson, A. J. Ramirez // Ibid. — 2010. — № 4. — P. 82–89.
14. Physicochemical characterization of different welding aerosols / B. Berlinger, N. Benker, S. Weinbruch et al. // Anal Bioanal Chemistry. — 2010. — № 10. — P. 1773–1789.
15. Jenkins N. T., Eagar T. W. Chemical analysis of welding fume particle // Welding J. — 2005. — № 6. — P. 87–93.
16. Characterization of welding fume generated by high-Mn consumables / M. J. Gonser, J. C. Lippold, D. W. Dickinson et al. // Ibid. — 2010. — № 2. — P. 25–33.
17. Sterjovski Z., Norrish J., Monaghan B. J. The effect of voltage and metal-transfer mode on particulate-fume size during the GMAW of plain-carbon steel. — [2008]. — 12 p. (Intern. Inst. of Welding; Doc. VIII-2092–08).
18. Quimby B. J., Ulrich G. D. Fume formation rates in gas metal arc welding // Welding J. — 1999. — № 4. — P. 142–149.
19. Pat. 89304783 application European 7, B 23 K 335/365, B 22 C 1/18, C 04 B 12/04, C 01 B 33/32. Silicate binders / T. Griffiths. — 0 342 346; fil. 11.05.89. — Publ. 15.11.89.
20. Characterization procedure for the analysis of arc welding fume / J. W. Sowards, J. C. Lippold, D. W. Dickinson, A. J. Ramirez // Welding J. — 2008. — № 4. — P. 76–83.
21. An investigation of particulate weld fume generated from GMAW of plain carbon steel / Z. Sterjovski, J. Drossier, E. de Thoisy et al. // Australasian Welding J. — 2006. — 51. — P. 21–40.
22. Examining elemental surface enrichment in ultrafine aerosol particles using analytical scanning transmission electron microscopy / A. D. Maynard, Y. Ito, I. Arslan et al. // Aerosol Sci. and Technology. — 2004. — № 38. — P. 365–381.
23. Hoet P. H. M., Brueske-Hohfeld I., Salata O. V. Nanoparticles — known and unknown health risks // J. of Nanobiotechnology. — 2004. — № 2.
24. Raloff J. Destination brain // Sci. News. — 2010. — № 11.
25. Глушкова А. В., Радилов А. С., Рембовский В. Р. Нанотехнологии и нанотоксикология — взгляд на проблему // Токсиколог. вестн. — 2007. — № 6. — С. 4–8.
26. International Standard ISO 15011-1. Health and safety in welding and allied processes — Laboratory method for sampling fume and gases generated by arc welding. Pt 1: Determination of emission rate and sampling for analysis of particulate. — First ed. — 01.04.2002.

Properties of welding fumes, such as dispersion degree, morphology of particles, methods used to analyse physical properties and element composition of particulate matter of the welding fumes, are considered. Factors affecting evolution of the welding fumes are presented.

Поступила в редакцию 09.03.2011

## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА ТОНКОЛИСТОВЫХ ОБЪЕМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

А. А. БОНДАРЕВ, В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, доктора техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены варианты совершенствования технологии изготовления сварных объемных конструкций из тонколистовых элементов. Приведены примеры малогабаритных макетов конкретных изделий. Даны рекомендации по снижению остаточных деформаций тонколистовых сварных конструкций. Показаны варианты изготовления сварных тавровых соединений, имеющих место при производстве стрингерных панелей. Дана оценка стойкости сварных соединений образованию межкристаллитной коррозии.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, алюминиевые сплавы, тонколистовые объемные конструкции, разноименные сварные соединения, механические свойства, межкристаллитная коррозия, трещиностойкость

Широкое применение алюминиевых сплавов в различных отраслях промышленности обусловлено рядом их достоинств по сравнению с другими конструкционными материалами.

Алюминиевые сплавы характеризуются большим диапазоном временного сопротивления разрыву (100...750 МПа), имеют высокую удельную прочность (благодаря малой плотности — 2,7 г/см<sup>3</sup>). Кроме того, имеют высокие тепло- и электропроводность, коррозионную стойкость в различных агрессивных средах. Сплавы алюминия отличаются хорошей технологичностью, легко поддаются обработке давлением, позволяют получать из них сложные фасонные профили. Детали из алюминиевых сплавов широко используют в различного типа конструкциях в судостроении, автомобилестроении, на транспорте. При этом для изделий авиационной техники, выполненных из алюминиевых сплавов, характерны клепаные и болтовые соединения.

Клепаное соединение — основной вид соединения в конструкции планера, самолета и вертолета. Оно хорошо работает при статических, усталостных и повторных нагружениях и позволяет получать изделия без поводок и с соблюдением строгой конфигурации.

Существенным недостатком клепаного соединения являются утяжеление конструкции, высокая трудоемкость выполнения операций и, как следствие, большие экономические затраты.

Применение болтового соединения в алюминиевых конструкциях вызвано необходимостью периодического демонтажа отдельных элементов и узлов изделий в процессе их эксплуатации. Од-

нако изготовление болтового соединения весьма трудоемко и постановка одного болта почти в 10 раз больше трудоемкости установки одной заклепки.

Прогрессивным способом соединения конструкций из алюминиевых сплавов является сварка, которая упрощает процесс производства металлоконструкций и позволяет широко использовать автоматизацию и механизацию [1].

Сварка является одним из ведущих технологических процессов изготовления конструкций в различных отраслях народного хозяйства. Особо важное значение приобретает сварка при создании герметичных сварных узлов длительной эксплуатации. В самолетостроении уже во многих случаях произошла замена клепаных и болтовых соединений на контактную точечную, роликовую сварку или такие способы сварки плавлением, как аргонодуговая, микроплазменная, плазменная, сварка плавящимся электродом.

В последние десятилетия во многих странах развивается и совершенствуется способ электронно-лучевой сварки, в том числе и применительно к изготовлению конструкций из алюминиевых сплавов [2–4].

Конструкции, изготовленные с применением электронно-лучевой сварки, успешно эксплуатируются в условиях сложных нагружений, повышенных температур, глубокого вакуума, агрессивных сред. Используя одну и ту же аппаратуру, электронным лучом можно сваривать детали из алюминиевых сплавов различных толщин: от долей миллиметра до нескольких десятков сантиметров.

В последние годы интенсивно развивается и совершенствуется металлургическое производство новых сверхлегких высокопрочных алюминий-литиевых сплавов, применение которых в сварных конструкциях уменьшает массу изделий на 10...15%. Расширению масштабов использо-



вания таких сплавов в конструкциях способствует применение электронно-лучевой сварки. Как установлено ранее [1, 2], при электронно-лучевой сварке термически упрочняемых или нагартованных алюминиевых сплавов временное сопротивление разрыву соединений на 15...20 % выше, чем при использовании дуговых способов сварки, а остаточные сварочные деформации на порядок ниже.

В нашей работе сделаны первые попытки применения технологии электронно-лучевой сварки при изготовлении объемных конструкций из тонколистовых элементов алюминиевых сплавов различных систем легирования. Конструкции из алюминиевых сплавов проектируются из прокатных листов, штампованных гнутых и пресованных профилей, фасонных штамповок и поковок. Применение таких полуфабрикатов в конструкциях, выполняемых с использованием дуговых способов сварки, связано с целым рядом трудностей как на этапе подготовки к сварке, так и при сборке и сварке соединений. Прежде всего это борьба со сварочными деформациями, применением средств по упреждению их появления или последующим устранением. В этой ситуации еще больше возникает проблем при использовании в конструкции из тонколистовых элементов соединений внахлестку или на проплав верхнего листа.

Примеры изготовления электронно-лучевой сваркой объемных панелей из тонколистовых элементов, где имеют место самые трудновыполнимые дуговыми способами типы соединений, приведены на рис. 1. Чтобы добиться высокого качества соединений и точности соблюдения геометрических форм при электронно-лучевой сварке подобных конструкций необходимо строго выполнять целый ряд конструктивно-технологичес-

ких требований. Сборка фрагментов под сварку осуществляется в сборочно-сварочном приспособлении, которое должно гарантированно обеспечить отсутствие зазоров между контактирующими поверхностями свариваемых элементов. Кроме того, в приспособлении предусматриваются теплоотводящие элементы, которые располагаются с двух сторон на всем протяжении свариваемого шва. При этом обеспечивается формирование шва с небольшим усилением. Какие-либо деформации в этом случае (типа вспучиваний или прожогов) также отсутствуют. Параметры режима сварки должны быть заранее установлены в таких пределах, чтобы при ее выполнении нижняя деталь проплавлялась не более чем на 0,5 толщины. В таких конструкциях могут применяться как одно-, так и разноименные алюминиевые сплавы. Однако на этапе проектирования изделий, закладываемая в конструкцию тот или другой сплав алюминия, необходимо располагать сведениями об их склонности к образованию кристаллизационных трещин. Учитывая, что такие швы выполняются без использования присадочных материалов и отсутствуют условия для осуществления модифицирования металла шва за счет легирующих элементов, находящихся в присадке, сплавы должны быть заранее подобраны таким образом, чтобы их трещиностойкость была наилучшей. Если же при выполнении сварки трещинообразование имеет место, тогда в технологическом процессе должны быть заложены мероприятия для предотвращения трещин. Так, на рис. 2 показаны образцы сплава 1420 после их испытания на трещиностойкость в диапазоне скоростей 20...60 м/ч. На этом сплаве наблюдаются трещины небольшой протяженности только в начальной зоне образца, где он имеет утоненную форму. Обобщенные результаты исследований стойкости алюминиевых сплавов к образованию кристаллизационных трещин приведены на рис. 3 [5]. Из рисунка видно,

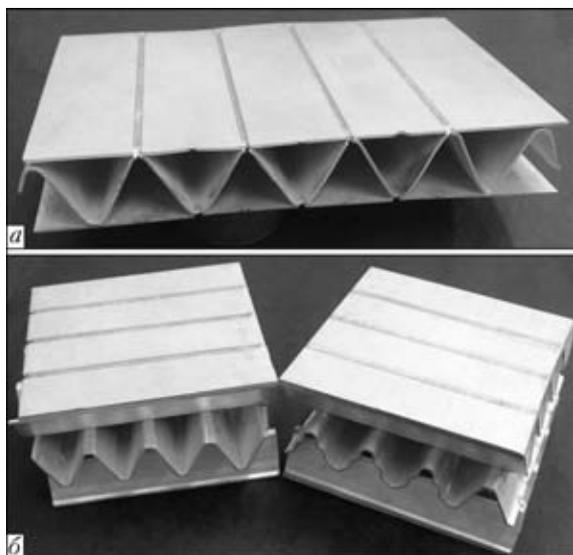


Рис. 1. Внешний вид макета тонколистовой (а) и объемной панели повышенной жесткости (б), изготовленных из алюминиевых сплавов электронно-лучевой сваркой

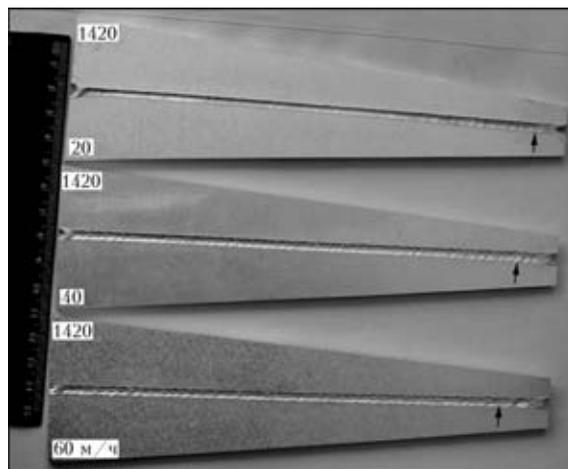


Рис. 2. Внешний вид сварных образцов из сплава 1420 после их испытания на трещиностойкость в диапазоне скоростей 20...60 м/ч

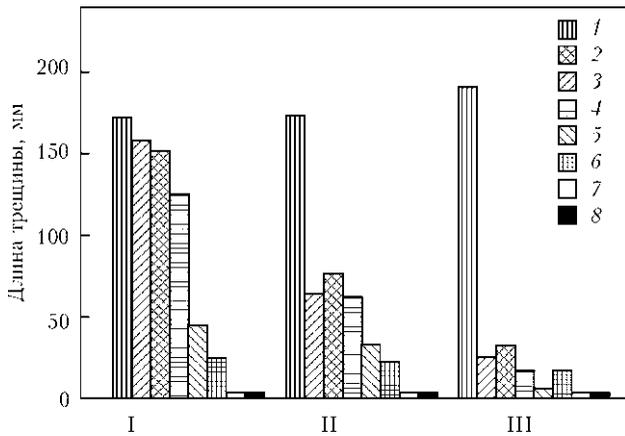


Рис. 3. Влияние скорости электронно-лучевой сварки на склонность алюминиевых сплавов к горячим трещинам: 1 — сплав Д16; 2 — АД0; 3 — 1460; 4 — 1201; 5 — АМц; 6 — 1420; 7 — 1570; 8 — АМг6; I —  $v_{св} = 20$ ; II — 40; III — 60 м/ч

что как и в сплаве АМг6 в новом высокопрочном сплаве 1570, легированном скандием, трещины отсутствуют. Кроме того, чем меньше скорость сварки, а следовательно, и меньше скорость кристаллизации металла шва, тем выше склонность к трещинообразованию.

К категории объемных тонколистовых конструкций могут быть отнесены и сварные стрингерные или оребренные панели (рис. 4). При их изготовлении с учетом специфики алюминиевых сплавов, а также расположения швов наиболее рациональным способом соединения является электронно-лучевая сварка [6, 7]. Процесс подготовки элементов, их сборка и сварка также отличаются высокой требовательностью к выполнению всех операций. Приварка ребер может осуществляться как односторонним угловым швом, так и наложением угловых швов с обеих сторон ребра. Как обычно использование присадочных материалов не практикуется, поскольку и в первом и во втором случае формируется на соединениях галтель с радиусом 1,5...3 мм. Параметры режима сварки обычно выбираются таким образом, чтобы проплавление нижнего полотнища не превышало 50 % его толщины. С этой целью в процессе сварки угол наклона электронного пучка обычно составляет 25...30° к плоскости панели. Во избежание значительных остаточных деформаций сварных панелей, как показали авторы работы [6], целесообразно использовать до сварки прием предварительного упругого растяжения свариваемых фрагментов (полотнища и ребер). Усилие растяжения не должно превышать условный предел текучести свариваемого сплава.

Однако с позиций обеспечения надежной работоспособности сварных конструкций выполнение приварки ребер, как показано на рис. 4, является нерациональным, поскольку сварные швы находятся в зоне концентрации напряжений при нагружении изделий. Перемещение сварных швов

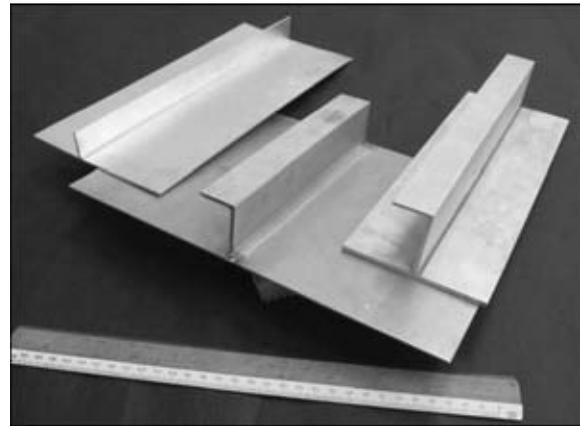


Рис. 4. Фрагменты тонколистовых стрингерных панелей, изготовленных с выполнением электронно-лучевой сварки одно- и двухсторонних угловых швов

в зону, удаленную от резких переходов, значительно повышает их надежность и работоспособность при нагружениях.

Как показала многолетняя практика, одним из факторов скрытого характера снижения сроков надежной и продолжительной эксплуатации сварных алюминиевых конструкций является их подверженность межкристаллитной коррозии, из очагов которой и начинается уже катастрофическое разрушение изделий. В наших разработках прошли испытания на межкристаллитную коррозию сварные соединения сплава Д16 и соединения разноименных алюминиевых сплавов, выполненных электронно-лучевой сваркой.

Для проведения исследований из сварных соединений перпендикулярно сварным швам вырезали по четыре образца шириной 10 мм, длиной 20 мм и толщиной 2,5 мм. Исследования проводили химическим методом в соответствии с ГОСТ 9.021-74 «Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию».

Температура рабочего раствора составляла  $30 \pm 5$  °С, состав раствора: раствор хлористого натрия плюс 0,3 % перекиси водорода (58 г/л NaCl + 10 мл/л 33 % раствора H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), продолжительность испытаний 6 ч с последующим металлографическим анализом шлифов по глубине растворивания между зерен в соответствии с ГОСТ

**Механические свойства сварных соединений разноименных алюминиевых сплавов (место разрыва образцов по шву)**

Номер образца	Марки свариваемых сплавов	$\sigma_b$ , МПа
1	Д16+АМг6	$\frac{294...312}{308,5}$
2	Д16+1570	$\frac{302...316}{314,3}$
3	Д16+1460	$\frac{296...311}{309,2}$

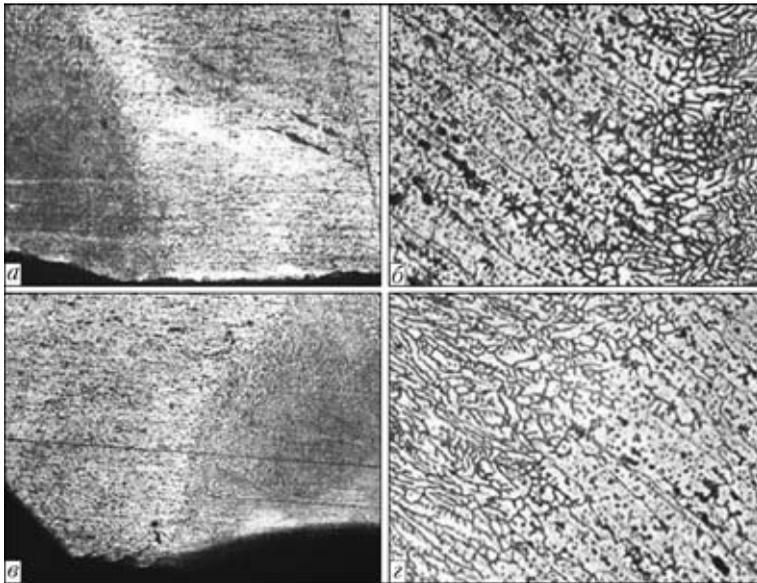


Рис. 5. Микроструктуры образцов сварных соединений сплава Д16, выполненных электронно-лучевой сваркой, после испытаний на межкристаллитную коррозию: *a, б* — контрольный образец; *в, г* — образец № 1 (*a, в* —  $\times 100$ ; *б, г* —  $\times 500$ )

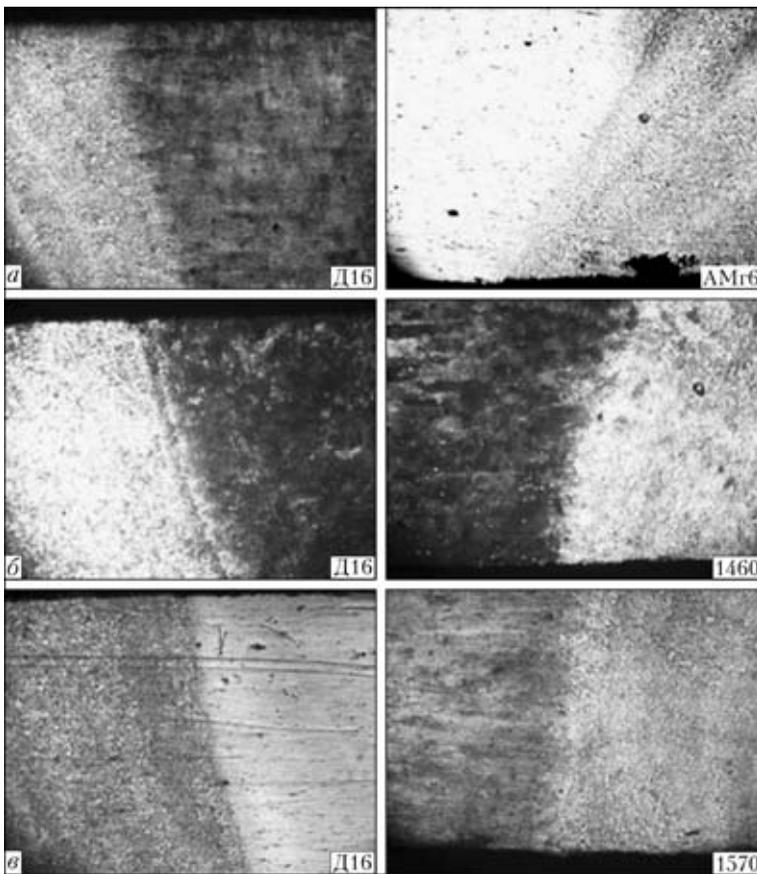


Рис. 6. Микроструктуры ( $\times 100$ ) образцов сварных соединений разноименных алюминиевых сплавов, выполненных электронно-лучевой сваркой, после испытаний на межкристаллитную коррозию: *a* — сплав Д16+АМг6; *б* — Д16+1460; *в* — Д16+1570

6032–89 «Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы испытания на стойкость против межкристаллитной коррозии» на металлографическом микроскопе «Неофот-21» (с соответствия с ГОСТ

6032–82 значение глубины разрушения границ зерен должно составлять не более 30 мкм).

Предварительное визуальное обследование образцов показало, что их состояние было удовлетворительным. Результаты исследований и фотографии микроструктуры шлифов сварных образцов сплава Д16 на склонность к межкристаллитной коррозии приведены на рис. 5.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что образцы сварных соединений алюминиевого сплава Д16, выполненные электронно-лучевой сваркой, не склонны к межкристаллитной коррозии.

Исследования на склонность к межкристаллитной коррозии соединений разноименных алюминиевых сплавов Д16+АМг6; Д16+1460 и Д16+1570, выполненных электронно-лучевой сваркой, проводили по приведенной выше методике и в растворе того же состава. Сравнив глубину поражения межзеренного растравливания испытуемых образцов (по три штуки) с контрольным образцом, проводили оценку стойкости соединений к межкристаллитной коррозии.

Результаты исследований и измерений приведены на рис. 6 и в таблице.

Как следует из анализа полученных результатов исследований, все соединения разноименных алюминиевых сплавов Д16+АМг6, Д16+1460, Д16+1570, выполненные электронно-лучевой сваркой в вакууме, не склонны к межкристаллитной коррозии.

Проведенные механические испытания (таблица) показали, что временное сопротивление разрыву соединений разноименных алюминиевых сплавов находится на уровне свойств соединений одноименных алюминиевых сплавов меньшей прочности. Таким образом, в случае использования в конструкции сварного изделия алюминиевых сплавов разных марок снижения прочностных характеристик практически не произойдет.

## Выводы

1. Разработаны конструктивно-технологические решения при создании сварных объемных конструкций и стрингерных панелей повышенной жесткости с использованием тонколистовых элементов или профильного проката.

2. Установлено, что сварные соединения сплава Д16 и разноименные стыковые соединения сплавов Д16+АМг6; Д16+1460 и Д16+1570, выполненные ЭЛС, не подвержены межкристаллитной коррозии в условиях их испытаний по ГОСТ 9.021–74.

3. Результаты выполненных опытно-поисковых работ и исследований могут быть использованы при выборе материалов и вариантов соединений для дальнейших испытаний по определению характеристик усталости, вязкости разрушения, коррозии под напряжением, живучести и остаточной прочности сварных конструктивных элементов.

1. Рабкин Д. М. *Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов.* — Киев: Наук. думка, 1986. — 256 с.

2. *Электронно-лучевая сварка* / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко, А. А. Бондарев. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
3. Патон Б. Е., Бондарев А. А. Современное состояние и новые технологии электронно-лучевой сварки конструкций // *Автомат. сварка.* — 2004. — № 11. — С. 23–31.
4. *Перспективы применения сварки при создании самолетов нового поколения* / Б. Е. Патон, А. Я. Ищенко, К. А. Ющенко и др. // Там же. — 1996. — № 6. — С. 26–27.
5. Бондарев А. А., Назаренко С. В. Определение склонности алюминиевых сплавов к образованию горячих трещин при электронно-лучевой сварке // *Современное состояние, проблемы и перспективы энергетики и технологии в энергостроении.* — Ивано, 1989. — С. 10–12.
6. *Изготовление сварных крупногабаритных тонкостенных панелей из высокопрочных алюминиевых сплавов* / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, В. И. Павловский и др. // *Автомат. сварка.* — 1989. — № 10. — С. 37–45.
7. Бондарев А. А., Назаренко С. В., Бондарев Анд. А. Совершенствование технологии изготовления сварных оребренных панелей из высокопрочных алюминиевых сплавов // *Проблемы сварки, металлургии и родственных технологий.* — Тбилиси, 1999. — С. 40–47.

Variants of improvement of the technology for fabrication of volumetric welded structures from thin-sheet elements are considered. Examples of small-size models of specific products are presented. Recommendations are given for reducing residual distortions in the thin-sheet welded structures. Variants of the welded T-joints employed in manufacture of stringer panels are shown. Resistance of the welded joints to intercrystalline corrosion is estimated.

Поступила в редакцию 10.02.2011

## НОВАЯ КНИГА

**ТИТАН: технологии, оборудование, производство:** Сб. ст. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 2011. — 324 с. — Мягкий переплет, формат 200×297 мм.

В сборнике представлены статьи, опубликованные в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за период 2005–2010 гг., по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. Авторами статей являются известные в Украине и за рубежом ученые и специалисты. Тематика статей посвящена созданию новых технологических процессов и оборудования для производства и сварки титана.

Предназначен для широкого круга инженеров, технологов, конструкторов, занятых в машиностроении, энергетике, строительстве, судостроении, металлургии и других отраслях промышленного производства, связанных с обработкой и потреблением титана; полезен также преподавателям и студентам высших учебных заведений.



Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала «Автоматическая сварка»: тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-54-84, E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
Книга реализуется в печатном виде (доставка заказной бандеролью) и в электронном виде в \*.pdf формате (отправка по электронной почте с закрытием оплаты по акту выполненных работ).



## СТЕПЕНЬ ВЛИЯНИЯ ПОДГОТОВКИ И СБОРКИ ПОД СВАРКУ НА КАЧЕСТВО СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

П. В. ЗАНКОВЕЦ, канд. техн. наук (Ин-т сварки и защитных покрытий НАН Беларуси, г. Минск)

На основе опыта изготовления сварных технологических трубопроводов с использованием математического моделирования и информационных технологий выполнены исследования и рассчитан удельный вес влияния подготовки и сборки под сварку на уровень качества сварных соединений трубопроводов различных типоразмеров.

*Ключевые слова:* ручная дуговая сварка, подготовка и сборка под сварку, технологические трубопроводы, сварные соединения, дефектность, причины брака, доминирующие факторы, уровень качества

Современный уровень компьютерной техники создает хорошие перспективы для применения достаточно сложных моделей, отражающих многофакторность и взаимосвязь явлений, которые имеют место в различных технологиях. Компьютеризация математического моделирования делает его доступным для широкого круга пользователей, связанных не только с исследованием, но и с разработкой и оптимизацией инженерных решений [1–3].

В отличие от предприятий машиностроения, ориентированных на массовое изготовление однородной продукции, сварочно-монтажное производство (СП) с помощью сварки выпускает, как правило, единичную или мелкосерийную продукцию, разнохарактерную как по назначению, так и внутреннему содержанию: способам производства, применяемым конструкциям, свариваемым и сварочным материалам. Следовательно, использование классической математической статистики, применяемой в управлении качеством для массовой (серийной) однородной продукции и монтажного производства, становится практически невозможным. В связи с этим необходимо решить ряд задач, и прежде всего задачу систематизации производства для применения аппарата математической статистики. Установлено, что при формировании генеральной совокупности сварных соединений за основу должна быть принята группировка по основным элементам производства. В качестве группировочных признаков (ГП) нами приняты марка стали, диаметр трубопровода или длина сварного соединения в металлоконструкции, толщина свариваемого металла, способ сварки, метод контроля. На этой основе разработан алгоритм, учитывающий особенности СП. Например, сварные соединения стыков диаметром

от 350 до 500 мм и толщиной стенки 6,0...8,0 мм, изготовленные способом ручной дуговой сварки (РДС), составляют однородную базовую совокупность (БС) стыков, а объекты, где выполняют сварку этих стыков, являются пространством случайных событий с определенными условиями [3].

Формирование БС математически описывается следующей моделью:

$$СМК \in \sum ОС \in \sum СП \in \sum ГЭ \in \sum ГП, \quad (1)$$

$$\text{где } СП = \sum_{i=1}^k ЭП_i; \quad ЭП = \sum_{j=1}^m ГП_j;$$

или в матричной форме

$$N_{BC_i} = \begin{vmatrix} ЭП_1 + ЭП_2 + \dots + ЭП_i \\ ГП_{11} + ГП_{21} + \dots + ГП_{i1} \\ ГП_{12} + ГП_{22} + \dots + ГП_{i2} \\ \dots + \dots + \dots + \dots \\ ГП_{1j} + ГП_{2j} + \dots + ГП_{ij} \end{vmatrix},$$

где СМК — строительно-монтажный комплекс; ОС — объект строительства; ЭП — элементы производства; ГЭ — группы элементов;  $N$  — количество элементов, входящих в БС;  $k, m$  — количество элементов соответственно производства и ГП.

За единицу БС принят сварочный стык или участок стыка длиной 300 мм. Элементы производства и их группы для каждой совокупности стыков должны изменяться незначительно и обобщать  $i$ -ю строительно-монтажную серию стыков, изготавливаемую за определенный цикл работы в определенных факторных условиях конкретной монтажной организацией. От известного определения партии продукции по ГОСТ 15895–70 введенное нами понятие отличается тем, что продукция может быть изготовлена на разных объектах и в различное время. Обязательным условием при изготовлении базовой партии является наличие единой технической документации.

Следующая задача состояла в разработке унифицированных показателей измерения дефектности. В отдельных работах приводятся показатели качества сварных швов по доле брака, доле суммарной дефектности в процентах и относительной площади дефектов  $g$  на участке контроля. Применение таких показателей для условий монтажного производства затруднено по нескольким причинам. Во-первых, нет связи показателей с действующей нормативной документацией по оценке качества. Во-вторых, расчеты относительной площади кольцевых сварных соединений затруднены. Кроме того, площадь дефектов  $g$  вуалирует выявление опасного дефекта типа сквозного свища, нарушающего плотность системы. По сравнению с протяженным неглубоким непроваром  $g$  сквозного свища меньше, чем непровара. В соответствии с требованиями ИСО 3834 и СНИП расчетные формулы устанавливают общую и недопустимую дефектность. Для оценки структуры дефектности и ее соотношений в целом по базовой совокупности стыков нами введен комплексный показатель, позволяющий оценивать дефекты как по их протяженности  $L$  ( $L_o$  — общих выявленных дефектов,  $L_6$  — забракованных, требующих устранения), так и по количеству  $D$  ( $D_o$  — количество общих выявленных дефектов,  $D_6$  — забракованных). На основании информации об  $L$  или  $D$  (или совместно) за определенный цикл контроля (месяц, квартал, год и т. д.) можно характеризовать качественное состояние сварочного производства, его процессы и условия. Такой показатель является представительным для каждой конкретной технологии, исполнителя и в целом строительной организации. Численное выражение этого показателя и его структура названы нами статистической формулой дефектности (ФБ) [3–5]. Общее выражение ФД БС имеет вид

$$\sum \sum \left| \frac{L_o, D_o}{L_6, D_6} \right| = \Pi(x_o, x_6) + \text{Ш}(y_o, y_6) + \text{Н}(z_o, z_6) + \dots, \quad (2)$$

где  $\Pi$ ,  $\text{Ш}$ ,  $\text{Н}$  — соответственно поры, шлаковые включения, непровары;  $x_o, y_o, z_o$  и  $x_6, y_6, z_6$  — соответственно общее и забракованное количество и протяженность дефектов.

Частные выражения для  $L_o$  и  $L_6$  имеют вид

$$L_o = \sum_{i=1}^n L_o^i/n = \sum_{i=1}^n \Pi_o^i/n + \sum_{i=1}^n \text{Ш}_o^i/n + \sum_{i=1}^n \text{Н}_o^i/n + \dots; \quad (3)$$

$$L_6 = \sum_{i=1}^n L_6^i/n = \sum_{i=1}^n \Pi_6^i/n + \sum_{i=1}^n \text{Ш}_6^i/n + \sum_{i=1}^n \text{Н}_6^i/n + \dots \quad (4)$$

Формула (3) дает информацию об общей дефектности, а (4) — о недопустимой по СНИП.

Для показателей  $\bar{D}_o$  и  $\bar{D}_6$  частные выражения формулы дефектности аналогичны выражениям (3) и (4).

Так, согласно ФД БС структура дефектности по причинам определяется следующим образом:

$$D_o = \sum_{i=1}^n D_o^i/n = \sum_{i=1}^n \Pi_o^i/n + \sum_{i=1}^n \text{Ш}_o^i/n + \sum_{i=1}^n \text{Н}_o^i/n + \dots, \quad (5)$$

где  $n$  — количество проконтролированных участков.

Известно, что на уровень качества сварных соединений влияет множество различных факторов: подготовка и сборка, квалификация исполнителей, сварочные материалы, сварочное и вспомогательное оборудование, сварочный процесс, организация работ, квалификация инженерно-технических работников, нарушение ритма работ, дефектоскопический контроль, термообработка, условия сварки, время года и др. По этим факторам нами выполнены дополнительные исследования, позволившие установить доминирующие в образовании дефектности факторы (90 до 97 %) — подготовка и сборка под сварку, квалификация исполнителей, сварочные материалы, сварочный процесс, сварочное оборудование [4, 5].

Однако степень влияния на уровень качества каждого фактора различна из-за большого количества типоразмеров сварных соединений, различных сварочных и свариваемых материалов, способов и условий сварки. Поэтому определение главных причин образования дефектов при сварке возможно только в конкретных производственных условиях для конкретной БС стыков.

Определение степени влияния того или иного производственного фактора на качество сварных соединений конкретных типоразмеров позволит оптимизировать сварочное производство за счет укрепления и модернизации его слабых звеньев. Уровень качества каждого фактора в свою очередь определяется его основными параметрами, которые могут влиять как положительно, так и отрицательно. Отрицательные факторные параметры являются, как правило, причиной образования дефектности (брака) при сварке (рис. 1). Критерием оптимальности служит уровень дефектности, причинами которой являются конкретные факторы и их параметры. Таким образом, реализуется важный принцип управления качеством сварки по обратной связи алгоритма фактор–причина–дефект.

Исследования проводили при получении сварных соединений технологических трубопроводов различных типоразмеров способами РДС, механизированной в среде углекислого газа, в смеси  $\text{CO}_2 + \text{Ar}$  и аргонодуговой сваркой (РАДС). Дефектность определяли по данным, полученным с



Квалификация исполнителей	Подготовка и сборка	Сварочные материалы	Сварочное оборудование	Сварочный процесс	Факторы
Разряд	Подготовка кромок	Технологические свойства	Измерительные приборы	Способ сварки	Причины
Тренированность	Зазор	Условия хранения	Состояние контактов	Тип соединения	
Стаж	Зачистка	Состояние покрытия	Стабильность тока	Режимы	
Возраст	Прихватка	Внешний вид	Стабильность напряжения	Контроль	
1,4 Фш, 0,5 Пд, 0,5 Н, 0,4 П, 0,3 Пр	1,4 Н, 1,0 Ш, 0,8 П, 0,3 Фш, 0,2 Пр	0,9 П, 0,7 Ш, 0,6 СПШ	Дефектность допустима по ТУ и СНиП	0,3 Т, 0,6 Ш, 0,6 П, 0,3 Н	
Структура дефектности ⇒ ДП Σ D <sub>о</sub> = 1,4 Н + 1,0 Ш + 0,8 П + 0,3 Фш + 0,2 Пр ⇒ Подготовка и сборка					

Рис. 1. Алгоритм определения доминирующих причин (ДП) образования дефектности сварных соединений по их структуре: Фш — дефекты формы шва; Пд — подрезы; СПШ — скопления и цепочки пор и шлаков; Т — трещины; Пр — прочие дефекты

помощью неразрушающих методов контроля (НМК) — визуального (ВК), рентгенографического (РГК) и ультразвукового (УЗК).

Алгоритм исследований представлен на рис. 1. Экспериментально и на предобъектных тренировках сварщиков различных СП изготавливали сварные соединения с определенными отрицательными

факторными параметрами. Цель исследований — установить типы дефектов и их количество, образуемое в момент действия определенных причин, определить структуру дефектности в зависимости от причин и ДП в ряду действующих причин на объектах сварочных работ.

Систематизация СП в БС и разработка количественных единиц измерения дефектности позволили создать компьютерную систему учета, контроля и анализа качества сварочных работ и сварных соединений. На основе данных НМК созданы базы данных и знаний о состоянии качества выполняемых работ и дефектности сварных соединений. Пример окна системы при работе с оперативной информацией о состоянии качества сварочных работ представлен на рис. 2.

Для практических условий важно определить, какая дефектность представляет данные ДП и, как следствие, конкретный производственный фактор технологического процесса сварки. Вероятность представления ДП определяли на основании статистических данных НМК, выполненного за цикл, не менее одного года с использованием компьютерных технологий и математического моделирования:

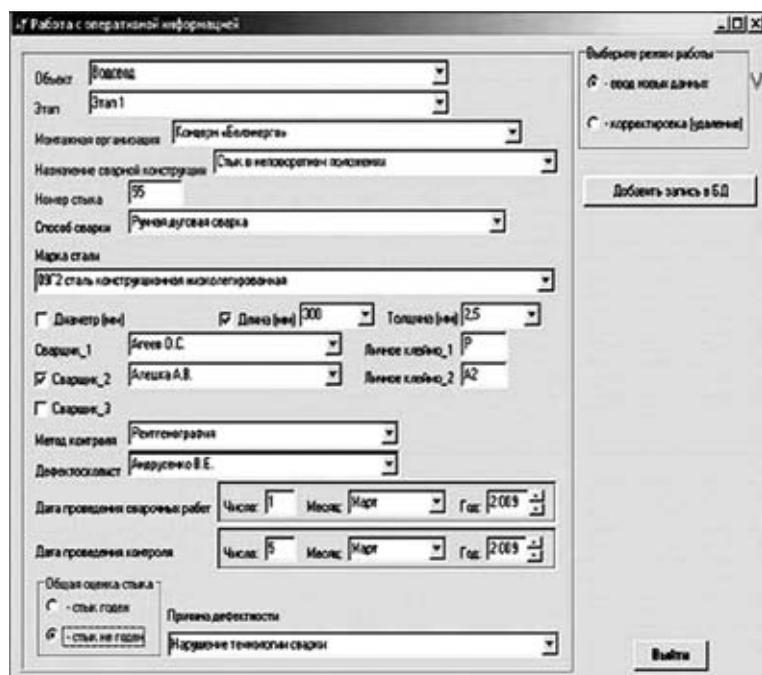


Рис. 2. Главное окно системы при работе с оперативной информацией о состоянии качества сварочных работ

$$P(\text{ДП}) = p_1/p_2 \text{ при } 0 < P(\text{ДП}) < 1, \quad (6)$$

где  $p_1$  — число практических подтверждений конкретной ДП;  $p_2$  — количество всех ДП;

$$P(\text{ДП}) = (A/\Sigma(\text{ФП})) \cdot 100 \%, \quad (7)$$

где  $\Sigma(\text{ФП})$  — количество всех предполагаемых повторений причины;  $A$  — количество практических подтверждений данной причины.

Например, за 2009 г. по фактору «Подготовка и сборка под сварку» (ПС) выявлено 2053 случая, когда ДП образования недопустимой дефектности определялись его отрицательные параметры, из них было подтверждено экспертно 1754 случая. Вероятность представления ДП причиной

$$P(\text{ДП})_{\text{ПС}} = 1754/2053 = 0,85.$$

Причины дефектности в цепочке фактор-причина-дефект анализировали с использованием массивов истории качества БС не менее, чем за два года [6–8]. Из отчетов операторов-дефектоскопистов или экспертным путем установлены основные причины и дефектность, выявленную на участке контроля в момент действия указанной причины. Причины и дефектность обрабатывали и систематизировали с помощью компьютерной техники (рис. 3, 4).

Подготовка и сборка под сварку является одним из доминирующих факторов, который определяет выходной уровень качества сварных соединений. Однако исследования удельного веса и количественная оценка его влияния на качество конкретных типоразмеров сварных соединений практически отсутствуют.

Брак, допущенный по этому фактору, приводит к специфическим дефектам, которые генерируются основными причинами (отрицательными параметрами) брака по данному фактору — плохой подготовкой кромок (угол притупления, радиус скругления), нарушением размеров зазора (соосности) между свариваемыми элементами, некачественной зачисткой (наличием ржавчины, вмятин, сколов, масел), прихваткой и др. Результаты исследований представлены в табл. 1.

Установление закономерностей образования дефектности и связи с причинами ее образования является важной задачей, решение которой позволит принимать превентивные меры по их предупреждению до начала сварочно-монтажных работ, совершенствовать

технологические процессы и осуществлять управление качеством сварки в режиме реального времени. Экспериментальные исследования функциональной связи причин образования дефектности с ее количеством не выявили, однако установлена важная статистическая взаимосвязь между структурой дефектности и причиной ее образования.

Используя результаты исследований причин дефектности по фактору ПС и формулы (3) и (6), получаем следующие выражения:

$$\begin{aligned} \text{ПС}_1 &= \text{П}(0,8) + \text{Ш}(1,3) + \text{Н}(1,4) + \text{Фш}(0,25) + \text{Пр}(0,2); \\ \text{ПС}_2 &= \text{П}(0,6) + \text{Ш}(0,9) + \text{Н}(1,7) + \text{Фш}(0,4) + \text{Пр}(0,3); \\ \text{ПС}_3 &= \text{П}(1,1) + \text{Ш}(1,4) + \text{Н}(1,3) + \text{Фш}(0,3) + \text{Пр}(0,25); \\ \text{ПС}_4 &= \text{П}(0,8) + \text{Ш}(1,0) + \text{Н}(1,5) + \text{Фш}(0,5) + \text{Пр}(0,2); \\ \text{Ф}_{\text{ПС}} &= \text{П}(0,8) + \text{Ш}(1,0) + \text{Н}(1,4) + \text{Фш}(0,3) + \text{Пр}(0,2), \end{aligned}$$

где  $\text{ПС}_1$  — подготовка кромок;  $\text{ПС}_2$  — зазор (соосность);  $\text{ПС}_3$  — зачистка;  $\text{ПС}_4$  — прихватка;  $\text{Ф}_{\text{ПС}}$  — структура дефектности по фактору ПС.

Таким образом, экспериментальным путем нами установлено, что каждый отрицательный параметр исследуемого фактора является причиной

Рис. 3. Пример окна системы при работе с базой данных о качестве сварных соединений и причинах брака

Рис. 4. Пример получения выходной информации по фактору ПС



Таблица 1. Дефектность, выявленная по причинам фактора ПС, шт.

Способ сварки	Сварено стыков, шт.	Проконтролированные участки длиной 300 мм, шт.	Поры и их скопления	Шлаковые включения	Непровары	Дефекты формы шва	Прочие дефекты
РДС	2450	7320	5850	8050	10980	2930	1830
РДС в CO <sub>2</sub>	1600	4200	2940	4100	5900	1350	920
РДС в CO <sub>2</sub> +Ar	2100	5460	4370	4920	7650	1640	1100
РАДС	1820	5100	4590	4450	6650	1530	1020
Итого	7970	22080	17750	21520	31180	7450	4870

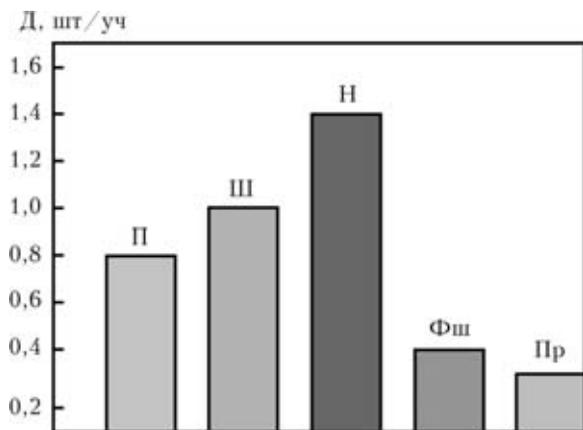


Рис. 5. Диаграмма дефектности Д, образующейся по причинам фактора ПС при сварке технологических трубопроводов диаметром от 57 до 500 мм

образования уникальной, присущей только ему структуре дефектности [9–11] (рис. 5).

В структуре дефектности по причинам фактора ПС преобладают дефекты типа Н (1,4 на участок контроля), Ш, П и их скопления, а также различные дефекты Фш.

Следовательно, причины образования дефектности сварных соединений технологических трубопроводов по фактору ПС позволяют принимать

обоснованные решения по совершенствованию его параметров, снижению удельного веса брака и повышению уровня качества сварных соединений, а кроме того, определить общий удельный вес влияния фактора на уровень качества сварных соединений конкретных типоразмеров при различных способах сварки, марках свариваемых материалов и условиях сварочного процесса.

Результаты исследования влияния фактора ПС на уровень качества (дефектность) сварных соединений технологических трубопроводов разных типоразмеров представлены в табл. 2, из которой видно, что он колеблется от 95,1 до 90,7 %. Установлено, что при механизированном и автоматизированном способах сварки соединений брак значительно меньше, чем при РДС. Из таблицы следует, что с увеличением диаметров трубопроводов удельный вес влияния на уровень качества сварных соединений подготовки и сборки возрастает независимо от способов сварки. Так, при РДС трубопроводов диаметром 57 мм из 1250 стыков всего забраковано 61, из них по причине исследуемого фактора — 11 стыков (или 18 %). В то же время при сварке трубопроводов диаметром 500 мм из 1790 стыков всего забраковано 167, из них по причинам исследуемого фактора — 57

Таблица 2. Влияние фактора ПС на уровень качества сварных соединений технологических трубопроводов

Способ сварки	Марка стали	Толщина стали, мм	Диаметр трубопровода, мм	Количество сваренных стыков, шт.	Количество забракованных стыков, шт.	Уровень качества, %	Количество забракованных стыков по фактору ПС, всего, шт.	Удельный вес фактора ПС, %
РДС	09Г2	2,5	57	1250	61	95,1	11	18,0
РДС в CO <sub>2</sub> +Ar	20Х	4,0	89	1270	73	94,3	18	24,6
РАДС	14ХГС	4,0	89	5740	360	93,7	84	23,3
РДС в CO <sub>2</sub> +Ar	20Х	6,0	112	4300	290	93,3	73	25,3
РДС	14ХГС	6,0	112	2790	215	92,3	64	29,7
РАДС	14ХГС	10,0	289	2900	235	91,9	74	31,5
РДС	20Х	10,0	289	1500	132	91,2	44	33,2
	14ХГС	14,0	500	1790	167	90,7	57	34,1
Итого				21540	1533	92,7	425	27,7

(или 34,1 %), т. е. сварка стыков больших диаметров сопряжена с усложнением технологии изготовления сварных соединений.

Основные причины роста брака состоят в том, что с увеличением диаметров трубопроводов усложняется сам процесс ПС. Даже незначительные отклонения зазора (или соосности) свариваемых элементов от требуемых техническими регламентами приводят к образованию недопустимых дефектов. Сварку в данном случае выполняют, как правило, за несколько проходов, и после каждого необходима зачистка наложенного слоя от окислы и шлаков, осуществление контроля качества и других мероприятий.

## Выводы

1. В результате исследований и на основе данных НМК качества сварных соединений технологических трубопроводов определены доминирующие факторы, генерирующие от 90 до 97 % образующихся дефектов.

2. Установлены причинно-следственные связи образования дефектности сварных соединений, что позволяет принимать превентивные меры по предупреждению брака по причинам наличия этого фактора и управлению качеством сварки по обратным связям алгоритма фактор–причина–дефект.

3. Рассчитан удельный вес влияния подготовки и сборки под сварку на выходной уровень качества сварных соединений в зависимости от типоразмеров трубопроводов и способов сварки, что позволяет оперативно принимать обоснованные управляющие решения по совершенствованию конкретных технологических процессов и обеспечению требуемого качества сварных соединений.

1. Шахматов М. В., Ерофеев В. В., Коваленко В. В. Работоспособность и неразрушающий контроль сварных сое-

динений с дефектами. — Челябинск: ЦНТИ, 2000. — 227 с.

2. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. — Киев: ИНДПРОМ, 2001. — 815 с.
3. Занковец П. В., Шелег В. К. Математическое моделирование влияния производственных факторов на образование дефектов сварных соединений // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. тр. Второй междунар. конф., 13–17 сент. 2004 г., пос. Кацивели, Крым, Украина. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2004. — С. 95–98.
4. Занковец П. В., Шелег В. К. Исследование и обоснование влияния производственных факторов на образование дефектности сварных соединений // Сварка и родственные технологии. — 2004. — № 6. — С. 93–96.
5. Совершенствование технологических процессов и оптимизация качества сборочно-сварочных работ / П. В. Занковец, В. К. Шелег, Л. С. Денисов и др. — Минск: Право и экономика, 2004. — 343 с.
6. Занковец П. В., Здор Г. Н., Шелег В. К. Разработка методов и исследование причин дефектности сварных соединений // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2006. — № 2. — С. 107–113.
7. Занковец П. В. Исследование причинно-следственных связей образования дефектов в сварных соединениях по результатам неразрушающего контроля // Защитные покрытия, сварка и контроль: Сб. тр. 37-го Межгос. сем., Минск, 29–30 марта 2006 г. — Минск: УП «Камет», 2006. — С. 67–72.
8. Занковец П. В. Математическое моделирование и информационные технологии в обеспечении качества сварных металлоконструкций // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2007. — № 2. — С. 120–128.
9. Занковец П. В., Иванов Г. А., Прончева В. Н. Компьютерная система расчета норм расхода сварочных материалов на сварку стальных трубопроводов // Трубопровод. трансп. (теория и практика). — 2007. — № 4. — С. 54–55.
10. Денисов Л. С., Занковец П. В. Исследование и анализ дефектности сварных соединений, выполненных сваркой плавлением // Технологии, оборудование, качество: Сб. тр. 11-го междунар. симпоз., г. Минск, 2008. — Минск: Принт Плюс, 2008. — С. 85–88.
11. Занковец П. В. Оптимизация качества и конкурентоспособности сварочной продукции на основе математического моделирования причинно-следственных связей образования дефектов сварных соединений // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. тр. Четвертой междунар. конф., 26–29 мая, 2009 г., пос. Кацивели, Крым, Украина. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2009. — С. 17–22.

Investigations were carried out, and contribution of the effect of preparation and assembly for welding to the level of quality of the welded joints on different-diameter pipelines was estimated based on the experience of manufacture of welded industrial pipelines by using mathematical modelling and information technologies.

Поступила в редакцию 03.03.2011



УДК 621.791.

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СТАЛИ S355 J2 В МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЯХ ПЕРЕКРЫТИЯ НАД НСК «ОЛИМПИЙСКИЙ» (г. Киев)

**В. Д. ПОЗНЯКОВ**, д-р техн. наук, **С. Л. ЖДАНОВ**, канд. техн. наук, **А. Г. СИНЕОК**, **А. А. МАКСИМЕНКО**, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлена информация об использовании на предприятиях Украины новой высокопрочной стали S355 J2 для сварных металлоконструкций перекрытия над НСК «Олимпийский» в Киеве во время его реконструкции.

*Ключевые слова:* реконструкция, сварные металлоконструкции, высокопрочная сталь, аттестация технологии, механические свойства, сварочные материалы, технология сварки

В рамках подготовки к проведению чемпионата Европы по футболу, который состоится в Украине и Польше в 2012 г., ведутся активные работы по реконструкции существующих и строительству новых спортивных объектов, а также инфраструктуры в этих городах (гостиницы, аэропорты, мосты и т. д.), где будут проходить футбольные матчи. Одним из ключевых объектов в плане подготовки к «ЕВРО-2012» Украины является НСК «Олимпийский» в Киеве, где в 2012 г. планируется проведение финальной встречи чемпионата. После реконструкции главная спортивная арена Украины должна отвечать современным требованиям УЕФА и ФИФА, обеспечивающих проведение европейских и мировых футбольных форумов. Согласно проекту и плану рекон-

струкции (автор проекта — компания «GMP Generalplanungsgesellschaft mbH») уже в 2011 г. над Киевским стадионам появится навес, защищающий зрителей от непогоды (рис. 1). Строящийся по принципу «системы колец и тросов» и состоящий из двух внешних сжатых и внутреннего растянутого колец навес будет покрывать трибуны нижнего и верхнего ярусов, а также части беговой дорожки.

Сжатые кольца — это легкие полые сварные конструкции коробчатого типа (рис. 2), которые противостоят горизонтальным силам от действия присоединенных к ним 80 пар радиальных тросов. Между собой отдельные элементы кольца соединены с помощью наклонных опор колонн (рис. 3), являющихся сварными металлоконструкциями коробчатого типа с переменным по длине сечением и набором внутренних диафрагм для придания им жесткости.



Рис. 1. Проектная конструкция навеса над НСК «Олимпийский» в Киеве

© В. Д. Позняков, С. Л. Жданов, А. Г. Синеок, А. А. Максименко, 2011



Рис. 2. Элемент сжатого пояса на монтаже



Рис. 3. Внешний вид готовых для монтажа колонн

Все сварные конструкции изготавливали в Днепропетровске на ООО «Завод Мастер Профи Украина» из листового проката стали S355 J2, произведенного отечественными металлургическими комбинатами в соответствии с EN 10025-2 2004. Сталь с пределом текучести более 350 МПа имела следующий химический состав (анализ данных сертификатов), мас. %: 0,17 C; 0,2 Si; 1,44 Mn; 0,05 V; 0,04 Nb; 0,005 V; 0,005 S; 0,015 P. Прокат изготавливали в Мариуполе: до 40 мм — на Меткомбинате им. Ильича, а свыше 40 и до 100 мм — на Меткомбинате «Азовсталь».

Ответственное назначение конструкции перекрытия обусловило необходимость разработки рациональных технологических процессов сварки стали S355 J2, обеспечивающих получение равнопрочных сварных соединений с высокой стойкостью против хрупкого и замедленного разрушения.

Сжатые сроки реконструкции предопределили быстрое принятие технологических решений по

сварке металлоконструкций из стали S355 J2. Поспособствовал этому предшествующий их изготовлению этап аттестации технологических процессов сварки в соответствии с ДСТУ 3951-2000.

На основе разработанных на ООО «Завод Мастер Профи Украина» предварительных технологических инструкций по сварке (pWPS) в заводских условиях выполняли контрольные стыковые и тавровые соединения из стали S355 J2 толщиной 16, 20 и 50 мм. Ручную дуговую сварку выполняли электродами ОК 53.70 (фирмы ESAB), механизированную в смеси M21 (Ar + 18 % CO<sub>2</sub>) — проволокой сплошного сечения Св-08Г2С диаметром 1,6 мм и автоматическую под флюсом АН-47 — проволокой Св-08ГА диаметром 4 мм с использованием новейших автоматов фирм ESAB и «Oerlikon Air Likuide 2143», специально приобретенных заводом для выполнения этого важного заказа.

На основе полученных положительных результатов неразрушающих и разрушающих

испытаний контрольных соединений были аттестованы технологические процессы сварки всех типов сварных соединений стали S355 J2 толщиной 16...50 мм, встречающихся при изготовлении металлоконструкций опорного каркаса перекрытия над стадионом.

Полученные в результате механических испытаний прочностные характеристики сварных соединений ( $\sigma_B = 540...570$  МПа) и показатели ударной вязкости ( $KCU_{40} = 75...90$  Дж/см<sup>2</sup> и острым надрезом  $KCV_{20} = 50...80$  Дж/см<sup>2</sup>) соответствуют требованиям, предъявляемым проектом к сварным соединениям отечественными и зарубежными нормативными документами.

Работы по изготовлению металлоконструкций проводили в период с января по сентябрь 2010 г., к началу 2011 г. на монтажной площадке НСК «Олимпийский» был проведен монтаж последних колонн, после чего начались работы по устройству непосредственно самого навеса.

The information is given about application of the new high-strength steel S355 J2 at the enterprises of Ukraine for welded metal structures of roofing over the NSC «Olimpiyskiy» in Kiev during its reconstruction

Поступила в редакцию 22.03.2011

## МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА «СВАРКА И РЕЗКА» В МИНСКЕ

22–25 марта 2011 г. в Минске в Выставочном комплексе «БелЭкспо» прошла 11-я Международная выставка «Сварка и резка», организованная ЗАО «МинскЭкспо» при информационной поддержке журналов «Автоматическая сварка», «Сварщик в Белоруссии», «Альянс сварщиков», «Мир металла» и др. Параллельно в этом же павильоне состоялись международные выставки «Защита от коррозии. Покрытия-2011» и «Порошковая металлургия-2011».

Выставка «Сварка и резка» является одним из наиболее интересных проектов промышленного форума. Она объединила стенды свыше 60 фирм из четырех стран ближнего и дальнего зарубежья — России, Украины, Беларуси и Франции.

Тематика выставки традиционно включала следующие разделы: сварочные материалы; оборудование для сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки; оборудование для орбитальной сварки и обработки труб, электронно-лучевой, лазерной, плазменной сварки и резки; решения по автоматизации сварочных процессов и технологической оснастке; современные технологии сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки; охрана труда и экологическая безопасность в производстве.

Сварочное оборудование и установки для дуговых и плазменных процессов сварки и контактной сварки, плазменной и газокислородной резки представляли как предприятия (фирмы)-производители (S.A.S.Polysoude, Франция; Государственный Рязанский приборный завод, Россия; ЧНПУП Завод «Электротеплоприбор», ООО «Бел-ЭЛСО», Беларусь; Каховский завод электросварочного оборудования, ОАО «Зонт», Украина), так и многочисленные торгующие организации из Беларуси («ООО «Белевротех», УП «Белгазпромдиагностика», «Бел-СваМо», ЧПУП «ВнешИТС», ОДО «Кемфин», ООО «Оливер» и др.).

Характерным для нынешней выставки в Минске является то, что ведущих в СНГ и в дальнем зарубежье «игроков» на рынке сварочного оборудования и материалов широко представили их белорусские партнеры: ООО «БелСваМо» — крупнейший в Беларуси поставщик профессионального оборудования, материалов и инструмента таких фирм, как «Lincoln Electric» (США), «Dalex» (Германия), «Тесна» (Италия), «Multimet» (Польша), «Eckert» (Германия–Польша); ООО «Оливер» — производитель (первый в Беларуси) омедненной сварочной проволоки Св-0ХГ2С и поставщик собираемых по лицензиям промышленных инверторов, полуавтоматов, промышленных инверторов, полуавтоматов, машин для контактной

сварки; ОДО «Кемфин» — дистрибьютор в РБ финских фирм «Kemppi», «Kemecweld», «Hetmasters»; ИООО «Ривал Сварка» — дистрибьютор и оптовый поставщик в РБ сварочного оборудования и расходных материалов, предлагаемых польской компанией «Rywal-RHC», а также «Lorch» (Германия), «Thermal Dynamics» (США) и др.; УП «Белгазпромдиагностика» и ЗАО «Объединенная сварочная компания», предлагающих сварочное оборудование, расходные материалы, средства защиты для сварщиков таких известных в мире фирм, как «Fronius» (Австрия), «Boehler-Welding», «УТР» и «Weldotherm» (Германия); ЧТУП «Алви-Торг» — продавец оборудования и материалов ведущих производителей России, Франции, Италии, Испании, Германии, Украины, а также резки и горелки для газопламенной обработки собственного производства; ОДО «Промсварка» — дистрибьютор компании ESAB (Швеция); ООО «Белевротех» — быстрорастущая компания, которая специализируется на поставках сварочного оборудования, материалов и комплектующих от производителей из СНГ и дальнего зарубежья; «ВнешИТС» — поставщик сварочного оборудования компании «ИТС» и фирм «СЭЛМА», «ЭСВА»; ИОО «Абикор Бинцель Техник» — поставщик сварочных горелок, электрододержателей и плазменных резаков от «Abicor Binzel» (Германия).

Производители сварочных материалов в СНГ на выставке были представлены Торговым домом «Межгосметиз» (Россия), вошедшим совместно с ОАО «Межгосметиз Мценск» в компанию «Lincoln Electric», Гомельским заводом пусковых двигателей, Светлогорским заводом сварочных электродов (Беларусь), Артемовским машиностроительным заводом «Вистек», а также дистрибьюторами Зеленоградского электродного завода (ООО «Амиос-строй») и Лосиноостровского электродного завода (ОДО «Бриз»).

На выставке было представлено также вспомогательное оборудование для дуговых способов сварки и наплавки, щитки и современные маски, профессиональная одежда для сварщиков, системы местных вытяжных устройств, фильтров, агрегатов для удаления и очистки воздуха в производственных помещениях. В рамках выставки в пленарном режиме прошел однодневный международный симпозиум «Сварка и родственные технологии».

Несомненно это придаст новый импульс развитию деловых связей между производителями и потребителями продукции сварочного производства.

В. Н. Липодаев, д-р техн. наук



УДК 621.791.009(100)

## ПРОМЫШЛЕННАЯ ВЫСТАВКА «ПАТОН ЭКСПО-2011»

12–14 апреля 2011 г. в Киеве на территории выставочного центра «КиевЭкспо-Плаза» прошла промышленная выставка «ПАТОН ЭКСПО-2011». Она включала 46 стендов, демонстрирующих достижения фирм-участников от Украины (36), Польши (3), Турции (1), Италии (1), Германии (1), Финляндии (1).

На выставке было представлено различное сварочное оборудование, производимое как предприятиями Украины, так и зарубежными фирмами. Среди экспонатов источники питания, автоматы и полуавтоматы для дуговой сварки, установки для аргонодуговой сварки и воздушно-плазменной резки, машины для контактной точечной, стыковой и шовной сварки, а также сварочные материалы. Среди наиболее крупных украинских производителей сварочного оборудования в выставке принимали участие КЗЭСО (г. Каховка), ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона (г. Киев), «ДОНМЕТ» (г. Краматорск), «ЗОНТ» (г. Одесса). Известные зарубежные производители были представлены своими представителями в Украине («Фрониус Украина», «Бинцель Украина», «Велдотерм Украина»), России — АОУТ «Полисуд С.А.С», а также фирмой «Kjellberg Finsterwalde». Они экспонировали образцы оборудования и аксессуары для сварки плавящимся и неплавящимся электродом, оборудование для термической обработки. Производители сварочных материалов были представлены Опытным заводом сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины и ООО «Фрунзе-Электрод» (г. Сумы). Среди организаций, занимающихся реализацией сварочного оборудования, материалов и принадлежностей на рынке Украины, следует отметить «Экотехнологию» (г. Киев), «Дельта — современные технологии» (г. Днепрпетровск), «Триада сварка» (г. Запорожье) и др.

Судя по номенклатуре представленных на выставке изделий большое внимание уделяется развитию компактного сварочного оборудования, в том числе и источников питания, которое условно можно разбить на группы: трансформаторы, традиционные выпрямители, выпрямители на основе инверторов.

Наиболее крупные производители источников питания КЗЭСО и «Фрониус Украина», имеющие международный сертификат соответствия ISO-9001, показали экспозицию, включающую различные источники питания переменного и постоянного тока. В частности, КЗЭСО представил иллюстративные материалы по сварочным трансформаторам с механическим регулированием на токи 250, 315 и 500 А, универсальным выпрямителям типа ВДУ

на 300, 500, 1250 А и выпрямителям от 300 до 600 А для механизированной сварки. На стенде КЗЭСО были также представлены рекламные материалы о специализированных комплексах для сварки и ремонта железнодорожной техники.

ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона продемонстрировал новые образцы источников питания. Это малогабаритные трансформаторы серии ТДС на 150, 180 и 200 А и трансформаторы серии СТШ СГД на 315 и 400 А, укомплектованные стабилизаторами горения дуги, универсальные по роду тока источники типа ВД-255СГД, ВД-400СГД, а также выпрямители на базе инверторов ВДИ-120, ВДИ-160 и ВДИ-200 с дополнительными функциями, выполняемыми в автоматическом режиме и повышающими их технологическую эффективность. Следует также отметить выпускаемый заводом выпрямитель ВС-650СР для сварки в углекислом газе. Выпрямитель укомплектован специальным дросселем, позволяющим стабилизировать длину дугового промежутка и размер переносимых в ванну капель. В рекламном проспекте ОЗСО была представлена информация об источниках питания для электрошлаковых технологий на токи 3 и 10 кА.

Экспозиция «Фрониус Украина» включала современное сварочное оборудование, а именно: выпрямители для сварки МИГ/МАГ с дискретным и плавным регулированием, импульсно-дуговой сварки, а также управляемые источники питания на основе инверторных преобразователей. Все выпрямители для сварки МИГ/МАГ комплектуются подающими механизмами.

Фирма «Кельберг» представила установки для воздушно-плазменной резки на токи 300 и 500 А. Такое сварочное оборудование, как трансформаторы, полуавтоматы, были представлены в виде проспектов.



Как показала выставка, на рынке Украины имеется достаточно широкий ассортимент различного по конструктивному и схемному исполнению сварочного оборудования, обеспечивающего регулировку параметров режима сварки в широком диапазоне, а также достаточно высокие эксплуатационные и технологические характеристиками.

В дни проведения выставки «Фрониус Украина» в своем учебном центре организовала дни открытых дверей. Для всех желающих посетителей выставки была организована доставка их в с. Княжичи для участия в мероприятии. Программа открытых дверей включала отдельные презентации, проводимые менеджерами фирмы, по следующим темам:

- оборудование для сварки стали TransSteel;
- оборудование для воздушно-плазменной резки Hypertherm;
- ВТН-оборудование для сварки метизов;
- Virtual Welding — практические навыки сварки;
- автоматизация. Стандартные компоненты;
- автоматизация. Орбитальная сварка;
- автоматизация. Обзор реализованных проектов 2010–2011 гг.;
- ТТ 1750 Puis. Оборудование для сварки ТИГ;
- высокопроизводительная сварка TIME, TIME TWIN;
- СМТ-процесс сварки;
- оборудование для сварки ММА, ТИГ, МИГ/МАГ.

В рамках выставки в течение 12–13 апреля работала международная научно-техническая конференция «Остаточный ресурс и проблемы модернизации систем магистральных и промышленных трубопроводов». В ее работе приняли участие ученые и ведущие специалисты ряда институтов Национальной академии наук Украины, ГК «Укртрансгаз», НАК «Нефтегаз Украины», ОАО «Укртранснефть», МВТУ им. Н. Э. Баумана, ОАО «Газпром», сертификационных центров и других организаций. Открыл конференцию зам. директора ИЭС им. Е. О. Патона академик НАН Украины Л. М. Лобанов. Он отметил, что в странах СНГ в исторически короткий срок была создана уникальная по протяженности и производительности система трубопроводов для транспорта природного газа, нефти и продуктов их переработки. Протяженность магистралей превышает 250 тыс. км, при этом преобладают в этой системе трубопроводы большого диаметра, работающие при высоком давлении. Газотранспортная система Украины, включая магистральные газопроводы и газопроводы ответвления, имеет суммарную длину более 35 тыс. км. Работу системы обеспечивают более 70 компрессорных станций. Транспорт нефти осуществляется по магистральным трубопроводам общей длиной более 4,6 тыс. км. Работу системы обеспечивают около 40 нефтеперекачивающих станций.

Интенсивное строительство магистральных трубопроводов в Украине было начато в 1960-х годах, а основные, в том числе транзитные трубопроводы большого диаметра, были проложены в 1970–1980-х годах. Таким образом, большая часть трубопроводов эксплуатируется уже длительное время. По этой причине весьма актуальными являются проблемы оценки технического состояния и остаточного ресурса магистральных трубопроводов. Анализ показывает, что основными причинами нарушения их работоспособности являются дефекты труб, отклонения от нормативных положений при строительстве, эксплуатации и ремонте, механические повреждения и коррозия. При этом с увеличением сроков эксплуатации количество отказов из-за коррозии значительно возрастает. По данным экспертных оценок, доля отказов в связи с коррозией металла после 20 лет эксплуатации трубопроводов составляет 35...45% общего количества отказов.

В последние годы существенно возросло внимание предприятий нефтегазового комплекса к работам по определению технического состояния магистральных трубопроводов, хотя объемы выполняемых работ в этом направлении все еще недостаточны. Серьезность проблемы заключается в том, что уровень таких работ во многих случаях не соответствует современным требованиям диагностики объекта. В основном эти работы ограничиваются проведением внутритрубной диагностики с выявлением мест коррозионного повреждения металла. Вместе с тем, определение реального состояния действующих трубопроводов и оценка ресурса их эксплуатации требуют комплексного подхода при проведении диагностических работ.

Возникает ряд аспектов, связанных с расчетной оценкой допускаемых дефектов. Существующие нормативы имеют расхождения в отношении их размеров. Кроме того, необходимо учитывать возможности подрастания технологических дефектов и деградацию служебных свойств металла в результате старения во времени. Практика показывает, что условия эксплуатации трубопроводов, отличающиеся от нормативных, могут существенно изменить механические свойства металла. При этом важное значение имеют напряженно-деформированное состояние и среда. На изменение свойств металла существенно влияет пластическая деформация, которая может возникать в зонах конструктивных концентраторов напряжений (места сварки тройников, изменений геометрии трубы), а также в зонах различного рода дефектов (таких, как трещины, непровары, несплавления, вмятины, царапины).

Высокие требования, которые предъявляются к уровню комплексного диагностирования трубопроводного транспорта, включая их обследование с применением различных физических и электро-механических методов, оценку работоспособности на основе экспериментальных и расчетных методов,



подготовку обоснованных выводов относительно остаточного ресурса и оптимальных параметров работы, требуют участия высококвалифицированных специалистов и применения сложного оборудования. Кроме того, необходимо совершенствование нормативной базы, а также методологии и способов диагностики.

Обеспечение безопасной и надежной работы систем трубопроводного транспорта в значительной степени достигается своевременным выполнением ремонтно-восстановительных работ и реконструкции. Важная роль в выполнении таких работ принадлежит сварочным работам. Поэтому не случайно одновременно в выставочном центре проводятся совместные выставки: по трубопроводному транспорту, сварке и родственными технологиям, неразрушающим методам контроля и диагностики.

В пленарном режиме на конференции было заслушано 30 докладов. Наибольший интерес был проявлен к докладам: Е. М. Вышемирского (ОАО «Газпрома») «Техническая политика ОАО «Газпром» в области сварочного производства», А. Я. Красовского, И. В. Лохмана, И. В. Орыняка (ИПП НАНУ) «Оценка остаточного ресурса магистрального трубопровода, поврежденного стресс-коррозией», В. И. Махненко, А. С. Миленина, О. И. Олейника (ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ) «Современные

проблемы ремонта сухопутных магистральных трубопроводов без вывода их из эксплуатации», Ю. В. Банахевича, И. В. Лохмана, И. З. Буры (ГК «Укртрансгаз») «Прогнозирование остаточного ресурса трубопровода с учетом эксплуатационных условий нагружения», В. А. Троицкого, А. И. Бондаренко (ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ) «Ультразвуковой контроль протяженных и труднодоступных участков трубопроводов», В. С. Романюка (ГП «ОКБТ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ») «Способ и конструкции, обеспечивающие ликвидацию аварий, связанных с подводной добычей и транспортировкой нефти и газа», В. С. Буга, О. И. Олейника (ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ) «Новые технологии ремонта магистральных трубопроводов» и др.

В заключение участники конференции отметили существенный вклад ее в решение проблем обеспечения, эксплуатации, надежности систем трубопроводного транспорта. Была высказана потребность всестороннего развития научно-технического сотрудничества специалистов стран СНГ по вопросам технического состояния и остаточного ресурса конструкций и сооружений.

В. В. Андреев, В. А. Корицкий, кандидаты техн. наук,  
В. Н. Липодаев, д-р техн. наук

УДК 621.791.009(100)

## ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕМИНАР ПО СВАРОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ

13 апреля 2011 г. в с. Княжичи Киевской обл. в Технологическом центре ООО «Фрониус Украина» состоялся однодневный семинар по сварочным материалам, организованный дирекцией и специалистами ООО «Интерхим-БТВ», представляющими в Украине австрийскую компанию «Boehler Welding». Такие семинары стали уже традиционными для ООО «Интерхим-БТВ» и обусловлены возросшим в последние годы интересом предприятий ряда отраслей промышленности Украины к разработкам концерна «Boehler Thyssen Welding».

В семинаре приняли участие свыше 20 представителей служб главного сварщика таких предприятий, как ОАО «Турбоатом» (г. Харьков), «Криворожсталь» (г. Кривой Рог), ОАО «Крюковский вагоностроительный завод» (г. Кременчуг) и других, а также представители Института электросварки им. Е. О. Патона.

Семинар открыл директор ООО «Интерхим-БТВ» В. И. Чернецкий. Он поблагодарил дирекцию ООО «Фрониус Украина» за предоставленную возможность проведения семинара в прекрасных условиях Технологического центра и ознакомил слушателей с программой семинара. Она включала две

презентации: первая — доклад Timo Swys («Soudokay», Бельгия) на тему «Материалы для износостойкой наплавки» и вторая — доклад Norbert Friedrich («Boehler Thyssen Welding», Австрия) на тему «Сварка современных дуплексных сталей».

Timo Swys кратко осветил историю развития завода в Бельгии, производящего порошковые проволоки, ленты и флюсы. С 1991 г. «Soudokay» полностью перешла под юрисдикцию концерна «Boehler Thyssen Welding», с 2010 г. — в виде отдельного дивизиона. «Soudokay» — также один из брендов концерна, на котором трудятся сегодня 39400 сотрудников. Годовой оборот концерна составляет 8,5 млрд евро. Продукция концерна реализуется в 40 странах мира, а его производство налажено в 24 странах. Так, например, в Австрии производятся порошковые проволоки, электроды, проволоки сплошного сечения; в Германии — все виды сварочных материалов, припой для пайки; в Швеции («AVESTA») — нержавеющие стали и пасты для обработки сталей; в Бразилии — электроды, порошковые проволоки для сварки и наплавки, в Мексике — электроды, порошковые проволоки для наплавки, припой, пасты для пайки. Для удовлетворения рынка



Азии сварочными материалами организовано производство порошковых проволок для сварки и наплавки в Индонезии и Китае. Доля в мировом рынке продаж сварочных материалов концерна «Boehler Thyssen Welding» в Европе составляет 40 %, в Азии — 36.

Характеризуя производство в Бельгии докладчик отметил, что завод специализируется на производстве порошковых проволок, лент, флюсов, подающих механизмов, широко применяемых в технологических процессах по восстановлению разнообразных видов оборудования в металлургии (засыпные конуса, ролики МНЛЗ, молоты, штампы), цементной промышленности (бандажи печей), горнорудной промышленности (восстановление зубьев машин и ковшей, деталей дробилок). Для каждого типа изделий предлагается соответствующая проволока для наплавки. Часто предлагается сочетание «проволока+флюс», «лента+флюс» для восстановительных работ на объектах химической и бумажной промышленности.

Металлургические заводы Украины все чаще приобретают материалы «Soudokaу», что позволяет в кратчайшие сроки восстанавливать часто уникальное оборудование, простои которого сопряжены со значительными потерями.

• ООО «Интерхим-БТВ» наряду с реализацией сварочных материалов концерна в Украине оказывает услуги по ремонтно-восстановительным работам. Они, в частности, включают:

- наплавку ножей гратоснимателей рельсосварочных машин;
- ремонтную наплавку деталей стрелочных переводов;
- сварку подкрановых рельсов;
- наплавку деталей автосцепного устройства железнодорожных вагонов;
- заварку трещин водоохлаждаемой крышки цилиндра локомотива;
- наплавку зубьев ковшей экскаватора;
- наплавку ковша экскаватора;
- напыление защитного покрытия на медную фурму доменной печи;

• наплавку молотка дробилки коксохимического производства;

• ремонт вакуумных водокольцевых насосов ВВН, ДВВН, ВК, НЭШ;

• наплавку зубьев шестерен;

• наплавку металлорежущего инструмента.

Второй докладчик Norbert Friedrich, ответственный за техническую поддержку продуктов концерна в Европейских странах и Америке, отметил, что концерн «Boehler Thyssen Welding» входит в тройку крупнейших производителей сварочных материалов в мире. Главное предприятие в Австрии производит 20000 т в год сварочных порошковых проволок, из которых 75 % реализуется на рынке Европы. Номенклатура проволок включает материалы для сварки низко-, средне- и высоколегированных сталей, теплоустойчивых сталей, сплавов на основе никеля. Доля проволок для сварки высоколегированных сталей составляет 17 %, что определяет «Boehler Welding» как ведущего производителя в Европе этого класса материалов. На долю проволок для сварки среднелегированных сталей приходится 20 % и низколегированных — 63 %.

В докладе отмечено, что объемы применения сварочных порошковых проволок позволяют судить о степени механизации и автоматизации сварочных процессов в странах. Сегодня в Европейских странах усредненно доля применения порошковых проволок составляет около 10, в Северной Америке — 21, в Японии — 30, а в Южной Корее — 39 %. Поэтому Европа является перспективным регионом, где ожидается рост потребления порошковых проволок.

Инновационным достижением «Boehler Welding» явилась реализация технического решения по заварке стыка порошковых проволок лазером, гарантирующая герметичность от проникновения влаги в сердечник проволоки и последующего насыщения металла шва водородом.

В целом применение порошковых проволок обеспечивает следующие преимущества: уменьшение расхода сварочных материалов; получение гладких швов без подрезов; практически сварку без разбрызгивания; отсутствие цветов побежалости в



зоне соединения; резкое снижение затрат времени на послесварочную обработку зоны сварки; допустимость более низкой квалификации сварщика; значительный рост производительности сварки (достигающий уровня, характерного для автоматической сварки под флюсом); снижение коробления тонкостенных сварных узлов; возможность применения для высоколегированных порошковых проволок в качестве защитного газа углекислого газа (вместо  $Ar+O_2$ ); возможность изготовления проволок диаметром от 0,9 мм для сварки тонкостенных изделий с минимальным короблением; возможность производства металлокерамических порошковых проволок на хромистой ленте для сварки металла толщиной от 0,6 мм. Сравнительный анализ показывает, что несмотря на более высокую стоимость порошковых проволок по сравнению, например, с покрытыми электродами; экономия от их использования с учетом всех затрат составляет 35 % на 1 м шва.

«Boehler Welding» выпускает широкую гамму порошковых проволок для сварки высоколегированных сталей. Причем многие из них выпускаются в двух модификациях: FD — для высокопроизводительной сварки в нижнем положении и PW-FD — для сварки во всех пространственных положениях. Этими проволоками можно сваривать стали

толщиной до 110 мм. Большим достижением считает докладчик явилось решение по сварке дуплексных сталей толщиной до 55 мм с обеспечением комплекса физико-механических свойств и коррозионной стойкости соединений. Дуплексные стали весьма перспективны в нефтепереработке, при производстве танкеров для перевозки химикатов, при изготовлении платформ нефтедобычи на шельфах, сооружении хранилищ и в других областях.

Предлагаемые «Boehler Welding» материалы (электроды и порошковые проволоки) типа 22/9, а также технологические приемы при многослойной сварке дуплексных сталей толщиной до 55 мм, ограничивающие погонную энергию сварки при выполнении корня шва и первого прохода предупреждают протекание нежелательных фазовых превращений в околошовной зоне, приводящих к снижению коррозионной стойкости и неудовлетворительным механическим свойствам.

Доклады, заслушанные на семинаре, вызвали живой интерес слушателей. Динамичная форма представления, хорошее иллюстративное оформление и добротный перевод, уточняющие вопросы и обстоятельные ответы по ходу выступлений позволили удовлетворить запросы участников семинара.

В. Н. Липодаев, д-р техн. наук

УДК 621.791.009(100)

## МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ТИТАН-2011 В СНГ»

25–28 апреля 2011 г. во Львове (Украина) состоялась организованная ЗАО «Межгосударственная ассоциация «Титан» традиционная ежегодная Международная конференция «Титан в СНГ». В конференции приняли участие более 200 участников из стран СНГ (Украина, Россия, Казахстан, Беларусь) и дальнего зарубежья (США, Япония, Германия, Италия, Китай, Люксембург, Польша, Швейцария, Румыния). На конференции с докладами выступили ученые и специалисты из ведущих научно-исследовательских организаций и промышленных предприятий Украины, России и других стран: Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Института металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Института геологических наук НАН Украины, Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Донецкого физико-технического института им. А. А. Галкина НАН Украины, Государственного научно-исследовательского и проектного института титана, Запорожской государственной инженерной академии, ГП «Запорожский титаномагний комбинат», ГП «Антонов», ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», ФГУП «Все-

российский институт авиационных материалов», ОАО «Всероссийский институт легких сплавов», «МАТИ» — Российского государственного технологического университета им. К. Э. Циолковского, Уральского государственного технического университета «УПИ», Института физики прочности и материаловедения СО РАН, ОАО «Корпорация «ВСМПО-АВИСМА», ОАО «Чепецкий механический завод», ОАО «Калужский турбинный завод», ОАО «Уралредмет» и др. Всего заслушано более 95 докладов по пяти секциям:

- сырье и металлургия;
- технологии плавки и обработки титановых сплавов;
- титановые сплавы и технологии для потребностей медицины;
- материаловедение и технологии титановых сплавов;
- экономика титана.

Особое внимание на конференции уделили вопросам применения титана в медицине. На специальной секции были представлены результаты работ специалистов Украины и России по созданию новых высокоэффективных титановых сплавов для

изготовления имплантов и эндопротезов с уникальными физико-механическими свойствами, в частности, сплавов на основе никелида титана с эффектом запоминания формы, а также технологические процессы их производства и обработки.

От ИЭС им. Е. О. Патона было представлено восемь докладов, освещающих результаты исследований в области создания новых титановых сплавов, в том числе системы Ti-Si с дисперсионным упрочнением, определением их структуры, механических характеристик и свариваемости; получения слитков алюминидов и никелидов титана с применением способов электронно-лучевой и электрошлаковой плавки; разработки новых технологических процессов аргонодуговой и электронно-лучевой сварки титановых сплавов, а также износостойкой аргонодуговой наплавки титановой порошковой проволокой.

Подробный анализ современного состояния рынка титана сделан в докладах О. М. Ивасишина (ЗАО «Межгосударственная ассоциация «Титан»), А. Н. Строшкова (ОАО «Корпорация «ВСМПО-АВИСМА»), Нисино Мотоки (Advanced Material

Japan Co., Япония), Кристиана Деколе (Tirus International SA, Швейцария) и других.

Основными отраслями потребления титановой продукции продолжают оставаться военное и гражданское самолетостроение (42%), а также промышленное применение (51%), которое включает энергетическое и химическое машиностроение, судостроение и производство оборудования для цветной металлургии.

Развивающиеся рынки титана включают производство оборудования для опреснения морской воды, медицины, спорта, нефтегазодобычи, транспортного машиностроения, которое в настоящее время занимает уже 7% рынка титана.

Следует отметить высокий уровень проведения конференции и выразить благодарность ее организаторам в лице ЗАО «Межгосударственная организация «Титан» и ее председателя А. В. Александрова, а также сотрудникам Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАН Украины.

С. В. Ахонин, д-р техн. наук

## Э. М. ЭСИБЯНУ — 80



В июне исполнилось 80 лет Эдуарду Миграновичу Эсибяну, кандидату технических наук, лауреату Государственной премии УССР, видному специалисту в области плазменной техники. После окончания Бакинского промышленного института Э. М. Эсибян в течение пяти лет ра-

ботал на машиностроительном заводе в Баку, а в 1961 г. успешно окончил аспирантуру (руководитель — академик АН УССР К. К. Хренов) и продолжил научную деятельность в ИЭС им. Е. О. Патона. В 1965 г. в руководимой им лаборатории была создана первая в мировой практике установка для воздушно-плазменной резки (ВПР), разработаны энергетические, технологические и конструктивные основы плазматронов и источников питания для ВПР. В последующие годы под руководством Э. М. Эсибяна разработана серия установок типа АВПР и «Киев», серийное производство которых обеспечило их широкое распространение с высокой экономической эффективностью. В дальнейшем идея использования воздуха в качестве рабочего газа при ВПР получила распространение во многих развитых странах. В течение 15 лет Э. М. Эсибян возглавлял междуна-

родное сообщество специалистов в области плазменной техники стран-участниц Совета Экономической Взаимопомощи. В последние годы он руководил научно-производственным предприятием «Плазматрон» НТК «ИЭС им. Е. О. Патона». Здесь под его руководством создано и организовано производство нового поколения установок ВПР типа «Киев» и «Дуплекс».

В настоящее время Э. М. Эсибян выдвинул идею и разрабатывает проект замены взрывоопасной газокислородной резки и сварки, повсеместно применяемой при ремонте водяных и тепловых сетей жилищно-коммунального хозяйства, на безопасную и высокоэффективную плазменную технологию. Для разработки и осуществления этого масштабного по объемам применения проекта автор планирует организовать творческий коллектив и привлечь соответствующие инвестиции.

Э. М. Эсибян — автор более 100 научных работ, в том числе более 50 изобретений и патентов, двух монографий.

*Сердечно поздравляем юбиляра, желаем ему крепкого здоровья и благополучия!*

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

## НОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МИКРОПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

В сентябре 2009 г. в Эссене на выставке «Сварка-резка 2009» был представлен комплект двух установок, разработанных и изготовленных в ИЭС им. Е. О. Патона — MPS004 (для микроплазменного напыления) и PPS002 (для микроплазменной наплавки). Установки различаются функционально, но их объединяет один общий узел — источник питания KEMPPИ MASTERTIG 3000.

В ИЭС им. Е. О. Патона давно проводили работы по созданию оборудования для микроплазменных процессов, в частности, установки для микроплазменного напыления MPS001 и MPS002, в которых использовали специализированные источники питания собственного производства. В дальнейшем в качестве источника питания выбрали серийный источник для сварки ТИГ со специальной модульной приставкой для плазменной сварки.

На первом этапе работ создали установку MPS003 для микроплазменного напыления, которая включала источник питания KEMPPИ MASTERTIG 3000, блок контроля процесса, ручной плазмотрон для микроплазменного напыления и дозатор подачи порошка. Эксплуатация установки показала, что надежность работы установки и качество выполняемых работ значительно улучшились. Дальнейшая эксплуатация установки потребовала расширения ее функциональных возможностей — в комплект установки MPS004 (рис. 1)

ввели механизм подачи проволоки и циклон для отвода газа, транспортирующего порошок.

Благодаря прецизионному механизму подачи проволоки в качестве присадочного материала использовали проволоки диаметром 0,4...0,6 мм, а благодаря циклону применяли в качестве дозатора подачи порошка стационарные высокоточные серийные питатели, которые позволяют проводить гарантированную микроподачу порошка в плазменную струю.

### Технические характеристики установки MPS004

Сварочный ток, А .....	20...50
Сварочное напряжение, В .....	20...50
Плазмообразующий и защитный газ .....	аргон
Расход плазмообразующего газа, л/мин .....	0,5...4,0
Расход защитного газа, л/мин .....	1,0...10,0
Производительность, кг/ч .....	0,1...1,0

С использованием MPS004 можно осуществлять как широкослойное нанесение металлических и неметаллических покрытий на различные поверхности, так и узкое локальное (до 2 мм шириной). Установки MPS004 нашли применение во Франции, Южной Корее, Китае, Индии, России.

Следующим этапом стало создание установки для микроплазменной сварки и наплавки с применением порошковых материалов. Для установки типа УПНС-304 был принят также модульный принцип: серийно выпускаемый источник для сварки ТИГ, включающий модуль-приставку для



Рис. 1. Установка MPS004 для микроплазменного напыления



Рис. 2. Установка PPS002 для микроплазменной наплавки

плазменной сварки и плазменно-порошковой наплавки, ручной плазмотрон и дозатор порошка.

Установка PPS002 (рис. 2) укомплектована источником питания KEMPPi MASTERTIG 3000, блоком контроля PPS002.01, плазмотроном ППС04, дозатором ППС42, педалью включения-отключения процесса сварки и переносным пультом для корректировки процесса.

**Технические характеристики установки PPS002**

Сварочный ток, А .....	5...120
Сварочное напряжение, В .....	20...40
Мощность плазмотрона, кВт .....	4
Расход плазмообразующего газа, л/ч, до .....	400
Расход защитного газа, л/ч, до .....	900
Подача порошка .....	импульсная
Длительность импульсов, с .....	0,1...2,0
Частота импульсов, с .....	0,2...4,0
Производительность, кг/ч, до .....	2

Установка предназначена для сварки и наплавки ручным плазмотроном сложных геометрических поверхностей деталей из жаропрочных высоколегированных сплавов, в частности, турбинных лопаток (рис. 3). В качестве присадки используются порошки грануляцией 50...250 мкм. При необходимости установка может быть укомплектована машинным плазмотроном. Возможно проведение процесса без порошка либо с использованием присадочной проволоки. Процесс осуществляется в импульсном режиме, с импульсной подачей порошка. Режимы импульсного сварочного тока выставляются на панели управления источника питания, а режимы импульсной подачи порошка — на панели блока управления. С помощью установки свариваются детали переменного сечения, например, вдоль обвода пера турбинной лопатки, поэтому в оборудовании предусмотрена возможность контролируемой регулировки сварочного тока и подачи порошка в процессе сварки с помощью переносного пульта. Это позволяет формировать размер наплавляемого валика по контуру переменного сечения.

Установка имеет два режима сварки, переключатель которых находится на панели блока контроля: сварка-наплавка с подачей порошка из дозатора и плазменная сварка без подачи порошка.



Рис. 3. Наплавка на торец пера лопатки турбины

Дозатор устанавливается на блоке контроля на кронштейне, что позволяет перемещать дозатор за плазмотроном. Порошок из дозатора через порошок канал длиной 0,5...1,0 м попадает в два канала ввода порошка в плазмотрон и по ним — в зону сварки. Обычно в ручных плазмотронах порошок подводится в зону сварки через ручку плазмотрона и чулок с коммуникациями (Castolin, Stellite GmbH) длиной до 3 м. При этом осуществляется постоянная подача порошка. На разработанной установке реализована импульсная подача порошка в зону сварки. При этом важно минимизировать расстояние от дозатора до зоны сварки. При необходимости установка может быть укомплектована плазмотроном ППС04.03 с подводом порошка через чулок коммуникаций и дозатором ППС49.07 с постоянной подачей порошка.

Эксплуатация комплекта установок MPS004 и PPS002 показала универсальность и преимущества такого оборудования. Имея один источник для сварки ТИГ и комплект дополнительных модулей к нему, можно охватить широкий спектр специализированных сварочных работ: сварку ТИГ, плазменную сварку, плазменно-порошковую наплавку, микроплазменное напыление.

С. Г. Войнарович, канд. техн. наук,  
 А.А. Наконечный, А. А. Фомакин, Д. Б. Яковчук, инженеры,  
 А. В. Яровицин, канд. техн. наук  
 (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

**ПРОИЗВОДИТЕЛИ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИМЕЮЩИЕ СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ  
в системе УкрСЕПРО, выданный в НТЦ «СЕПРОЗ» (по состоянию на 01.01.2011 г.)\***

№ п/п	Наименование предприятия	Адрес	Сертифицированная продукция	Дата окончания действия сертификата
36	Фирма «МУЛТИМЕТ Sp.z.o.o»	Польша 59-17 Przemkow Ul. Fabryczna, 10	<b>Проволока стальная сварочная</b> ИМТ2, ИМТ3 <b>Проволока порошковая</b> FLUXOFIL 19HD	12.03.2011
37	ООО «ГАНЗА»	50049 г.Кривой Рог, ул. Скандинавская, 33	<b>Электроды</b> ЦД-1, ОЗЛ-8 АНО-21, УОНИ 13/45	12.10.2012
38	ООО «ЭКОМ-ПЛЮС»	69065 г. Запорожье, ул. Бетховена, д. 18	<b>Электроды</b> АНО-21, АНО-4, МР-3	06.05.2011
39	Фирма «FRO S.p.A.»	15/A, Via Torricelli, 37135, Verona, Италия	<b>Электроды</b> AL CROMO E225,PH 35S DRY,PH KV4, AL CROMO E225V,PH 55H,PH KV4L, ETC BS 310, PH 56S,PH KV5L,ETC PH 118, PH 56ST,PH KV7, ETC PH 35S,PH 600B,PH KV7M, ETC PH 46,PH 801,PH MN,ETC PH 46S, PH 801AC,PH RS 22.9.3L, ETC PH 48,PH 802, PH RS 308H, ETC PH 68,PH 803,PH RS 308L, ETC PH 75H,PH 88S,PH RS 308L VD, ETC PH 76S,PH 88S HR,PH RS 309L, ETC PH 85,PH BS 307,PH RS 309L EW, ETC PH 85CP,PH BS 308L,PH RS 309Mo, ETC PH 87,PH BS 308L VU,PH RS 310, ETC PH 88S,PH BS 308LT,PH RS 312, ETC PH 88S HT,PH BS 309Cb,PH RS 316L, ETC PH 98,PH BS 316L,PH RS 316L EW, ETC PH BS 309Mo,PH BS 316L VU,PH RS 317, ETC PH BS 309L,PH BS 316LT,PH RS 318, ETC PH BS 309Mo,PH BS 347,PH RS 347, ETC PH BS 310Mo,PH BS 347,TENACITO ®, ETC PH BS309L,PH BS 410NiMoS,TENACITO 100, ETC PH CNI82,PH BS 410S,TENACITO 140, ETC PH MN,PH BS 430S,TENACITO 38R, ETC PH NiCu 70-30,PH CuNi 70-30,TENACITO 65R, ETC PH RS 308L,PH KV 2HR,TENACITO 70, ETC PH RS 308LEW,PH KV 3HR,TENACITO 70B, ETC PH46S,PH KV 5HR,TENACITO 80, MOLYCORDER K6, PH KV 7M,ULTRACTO, PH 77,PH KV2L,UNIVERS, PH 27P,PH KV3L, BASICORD A,FRO B300,MANGANFRO, FRO Al12Si,FRO B600,TENSILFRO 2000, FRO Al5Si,HARDFRO 600,TOOLFRO, FRO Al99.5,HARDFRO V1000 <b>Проволока порошковая</b> CRISTAL F119,FLUXOFIL 30,FLUXOFIL 54 YURRE, FLUXOCORD 35.25-3D,CRISTAL F208, FLUXOFIL 31, FLXUOFIL 56, FLUXOCORD 36, FLUXOFIL M8,FLUXOFIL 31S, FLXUOFIL M56, FLUXOCORD 37,FLUXOFIL M10,FLUXOFIL 35, FLUXOFIL 56S, FLUXOCORD 37STC, FLUXOFIL M10PG, FLUXOFIL 36, FLUXOFIL 58, FLUXOCORD 38C, FLUXOFIL M10S, FLUXOFIL M36, FLUXOFIL M58, FLUXOCORD 40, FLUXOFIL 11, FLUXOFIL 37, FLUXOFIL 58WIG, FLUXOCORD 40C, FLUXOFIL 11HD, FLUXOFIL 37STC, FLUXOFIL 59, FLUXOCORD 40E, FLUXOFIL 12, FLUXOFIL 38C, FLUXOFIL 62, FLUXOCORD 41, FLUXOFIL 13,F LUXOFIL 40, FLUXOFIL 66, FLUXOCORD 41.1, FLUXOFIL 14, FLUXOFIL 40Mod, FLUXOFIL 70, FLUXOCORD 41B, FLUXOFIL 14HD, FLUXOFIL 41, FLUXOFILCORD 116, FLUXOCORD 41RMA, FLUXOFIL 14HDS, FLUXOFIL M41PG, FLUXOFILCORD 116Mod, FLUXOCORD 42, FLUXOFIL 15,FLUXOFIL 42,FLUXOFIL 131, FLUXOCORD 42Mod, FLUXOFILCORD 16, FLUXOFIL 42LT, FLUXOFIL 140Mod, FLUXOCORD 43.1, FLUXOFILCORD 16F, FLUXOFIL 44,FLUXOFIL M41, FLUXOCORD 44, FLUXOFIL 18, FLUXOFIL 45, FLUXOFIL TENAX, FLUXOCORD 44TN, FLUXOFIL 19B, FLUXOFIL M45, FLUXOFIL M42 K=H, FLUXOCORD 45, FLUXOFIL 19HD, FLUXOFIL 48, FLUXOFIL M141,FLUXOCORD 45KMod,FLUXOFIL 19HDS, FLUXOFIL 48HD, FLUXOCORD 9Ct, FLUXOCORD 48, FLUXOFIL 20, LUXOFIL 48S, LUXOCORD 9CтMo, FLUXOCORD 48HD, FLUXOFIL 20HD, LUXOFIL M48, FLUXOCORD 31, FLUXOCORD 54-6, FLUXOFIL 21HD, FLUXOFIL 50, FLUXOCORD 31HD, FLUXOCORD 54-6C, FLUXOFIL 25, FLUXOFIL 51, FLUXOCORD 35.25, FLUXOCORD 58, FLUXOFIL 28HD, FLUXOFIL 52, FLUXOCORD 35.25, FLUXOCORD 62, FLUXOFIL 54, FLUXOCORD 35.25-2D, FLUXOCORD TENAX	

№ п/п	Наименование предприятия	Адрес	Сертифицированная продукция	Дата окончания действия сертификата
			<p><b>Проволока стальная сварочная</b>  ALUFIL AI 99,5 Ti, ALUFIL AlMg 3, ALUFIL AlMg 4,5 Mn, ALUFIL AlMg 5, ALUFIL AlMg 4,5MnZr, ALUFIL AlSi 10 Mg, ALUFIL AlSi 12, ALUFIL AlSi 5, ALUROD AI 99,5 Ti, ALUROD AlMg 3, ALUROD AlMg 4,5 Mn, ALUROD AlMg 5, ALUROD AlMg 4,5MnZr, ALUROD AlSi 12, ALUROD AlSi 5, CARBOFIL A 250, CARBOFIL A 300, CARBOFIL A 350, CARBOFIL A 500, CARBOFIL A 600, CARBOFIL NiCu1, CARBOFIL NiMo1, CARBOFIL NiMoCr, CARBOROD 1, CARBOROD Ni 1, CARBOROD Ni 2, COPPERFIL 70-30, COPPERFIL CuAl8, COPPERFIL CuSi 3, INNOBRONZE M-0922, INNOBRONZE M-1022, INNOCAS T M-NiFe, FREEZAL S625, NIFIL 59, NIFIL 600, NIFIL 625, NIROD 59, NIROD 600, NIROD 625, OE-G I, OE-G II, OE-G III, OE-G IV, OE-G V, CARBOFIL, CARBOFIL 1, CARBOFIL 1 CF, CARBOFIL 1 GOLD, CARBOFIL 1 TP, CARBOFIL 1A (G3Si), CARBOFIL 1A (G4Si), CARBOFIL 1A CF, CARBOFIL 1A GOLD, CARBOFIL Cu, CARBOFIL Ni 1, CARBOFIL Ni 2, CITOFIL 2, CITOFIL 3, CARBOFIL 9 Cr, CARBOFIL CrMo1, CARBOFIL CrMo2, CARBOFIL CrMo5, CARBOFIL Mo, CARBOROD CrMo 1, CARBOROD CrMo 2, CARBOROD CrMo 5, CARBOROD Mo, OE-91, OE-CrMo WV 12, OE-CrMo S300V, OE-CROMO W225, OE-S1 CrMo2, OE-S1 CrMo5, OE-S2 CrMo WV 12, OE-S2 CrMo1, OE-SD3 Ni? Mo, OE-SD3 2,5NiCrMo, OE-A 105, OE-Ni 1, OE-Ni 38, OE-S2 3,5 Ni, OE-S2 Mo B, OE-S2 Ni1, OE-S2 Ni2, OE-S2 NiCu1, OE-S3, OE-S3 Si 1, OE-SD3 Mo, OE-SD3 NiMo1, OE-SD3 NiMo1, INERTFIL 22 12, INERTFIL 22 12, INERTFIL 22 9 3, INERTFIL 24 13 Si, INERTFIL 307, INERTFIL 308L, INERTFIL 308L Si, INERTFIL 309L, INERTFIL 309L Mo, INERTFIL 309L Si, INERTFIL 310, INERTFIL 312, INERTFIL 316L, INERTFIL 316L Si, INERTFIL 316LN, INERTFIL 318, INERTFIL 318 Si, INERTFIL 347, INERTFIL 347 Si, INERTFIL 904L, INERTROD 22 9 3, INERTROD 307, INERTROD 308L, INERTROD 308L Si, INERTROD 309L, INERTROD 309L Mo, INERTROD 309L Si, INERTROD 309L Si, INERTROD 310, INERTROD 316 LN, INERTROD 316L Si, INERTROD 318, INERTROD 318 Si, INERTROD 318 Si, INERTROD 347, INERTROD 347 Si, INERTROD 904L, OE-20 16 nCr, OE-22 12, OE-307, OE-308L, OE-309 L Mo, OE-309 L Mo, OE-316L, OE-318, OE-347, OE-B 19 12 3 nCr, OE-B 23 11 LnB, OE-CROMO S 225, AS 25, CROMO 225Mo, OE S2 Mo, FRO SF, AS 35, CROMO 225Mov, OE S4 Mo, FRO SFR, AS 35Si, CROMO 300Mov, OE-CROMO S225V, FRO SO, AS 36, SGI, OE-S1, FRO TENAX, AS 37LN, SG2, O E-S2, FRO TIG I, AS 40, A105, OE-S2CrMo1, FRO TIG II, AS 40A, OE-S4, ALTIG SGI, AS 48, OE-SD3, ALTIG SG2, AS 67, OE-SD3 NiMo, ALTIG SG3, AS Cr1Mo, S2 Mo, AS Cr2Mo, WL WIRE 308 L Si, WL WIRE 316 L Si, WL WIRE 347 Si, WL ROD 308 L, WL ROD 316 L</p> <p><b>Флюсы сварочные</b>  AS231, AS486, AS50, OP 191, AS231S, AS470, AS55, OP 192, AS231SC, AS231M, AS60, OP F500, AS350, R10, AS72, OP 192P, AS461, AS620, AS73, Pie18 UP, AS589, LEXAL F500, AS80, AS589R, AS440, AS81, OP 191 (FXA 28R), AS592, RV7Ni, AS90, OP 192 (FXA 27 SB), RV7, AS438, AS124, OP F500 (FXA 300 IR), CN100, AS231G, AS 88, OP 126 (FXA 76 B), CN305, AS231F, AS709/5, AS550, OP132, AS 18, AS231B, AS461G, RV5, AS630, AS350V</p>	28.12.2011
40	Фирма ISAF S.p.A	Via Maggio, 4 - 38089 Storo (TN) - Италия	<p><b>Проволока стальная сварочная</b>  IS 10, IS 5, IS 10S, IS TS, IS T, IS C, IS D2, IS SUPERIOR, CARBOFIL 1, CARBOFIL 1-A, CITOFIL 2, CARBOFIL NiMoCr, CARBOFIL GK2, CARBOFIL SG3, CARBOFIL CORTEN A/48, FILCORD-C, FILCORD-ZN, FILCORD-D, FILCORD TENAX S, FILCORD TENAX, FILCORD 48, IS PREMIUM</p>	03.04.2012
41	Фирма UAB «ANYKSCIU VARIS», Литва	Vairuotoj 10, 91207 Anyksciai, Lithuania (Литва)	<p><b>Электроды</b>  ANO 4, MP 3, AV 21, AV 22, AV 23, AV 31, AV 43, UONI 13/55, AV 61, AV 66, AV1 308L, AV1 316L, AV1 310, AV1 Ket Ni, AV1 KetNiFe, AV1 KetNiFeCu, AV1 Alium5, AV1 Alium12, AV1 AP60, AV1 AP63, AV APL60, AV APL600, AV T 590, AV 307/APL</p>	29.10.2012
42	ООО «Мендол»	51931, г. Днепропетровск, ул. Г. Романовой, 11/53	<p><b>Электроды</b>  АНО-4, АНО-21, АНО-27, МР-3, УОНИИ-13/45, УОНИИ-13/55СМ, ЦИ-39, ЦУ-5, ЭН-60М, ЦН-61Л, Т-590, Т-620, ЦНИИН-4, ОЗЛ-6, ОЗЛ-8, ЦЛ-11, НЖ-13, НИИ-48Г, ЭА-400/10У, ЦЧ-4, МНЧ-2, ЭА-395/9, ЭА-981/15, НР-70</p>	21.07.2011
43	ООО «АРГЕНТА»	49130 г. Днепропетровск, ул. Захарченко, 4/112	<p><b>Электроды</b>  АНО-4, УОНИ -13/55, Т-590</p>	25.11.2011
44	ООО ПНФ «Галэлектросервис»	79053 г. Львов, ул. В. Великого, 51/119	<p><b>Электроды</b>  АНО-4, АНО-21, АНО-27, АНО-36, МР-3, УОНИ-13,45, УОНИ -13/55, НР-70, ЦНИИН-4, Т-590, Т-620, ЦЧ-4, ЦЛ-11</p>	18.05.2012
45	ЗАО «ЭСАБ-СВЭЛЬ»	198096, Санкт-Петербург, ул. Корабельная, 6, корпус 5, Россия	<p><b>Электроды</b>  УОНИИ-13/45, УОНИИ-13/45А, УОНИИ-13/45Р, УОНИИ-13/55, УОНИИ-13/55Р, ОЗС-12, МР-3, АНО-ТМ, ОК 46,00, ОК 53,70</p>	19.04.2015

№ п/п	Наименование предприятия	Адрес	Сертифицированная продукция	Дата окончания действия сертификата
			<b>Флюсы</b> OK Flux 10.71, OK Flux 10.74	19.04.2015
46	Фирма «Lincoln Electric Italia S.r.l.»	Via Nazionale, 32 - Localita Corsalone 52010 Chiusi della Verma - Arezzo, Италия	<b>Проволока стальная сварочная</b> Ultramag, Ultramag SG 3, CF 14/16 S6, CF 18/18L, Arcweld	11.06.2013
47	Фирма «HARRIS CALORIFIC INTERNATIONAL Sp. Z o.o.»	58-200 м. Dzierzoniow, ul.Strefowa, 8, Польша	<b>Проволока порошковая</b> Outershield 71C, Outershield 71E-H, Outershield 71M-H	11.06.2013
48	Фирма «AB Sandvik Materials Technology»	SE-811 81 Sandviken, Швеция	<b>Проволока</b> 19.9.L; 19.9.Nb; 19.9.NbSi; 19.12.3.L; 19.12.3.LSi; 19.13.4.L; 19.12.3.Nb; 19.12.3.NbSi; 18.8.Mn; 18.8.CMn; 24.13.L; 24.13.LSi; 24.13.LHF; 24.13.Si; 22.15.3.L; 25.20.C; 29.9; 22.8.3.L; 25.10.4.L; 29.8.2.L; 22.12.HT; 28.34.HT; 25.20.L; 25.22.2.LMn; 20.25.5.Lcu; 27.31.4.Lcu; Sanicro 60; Sanicro 68HP; Sanicro 72HP <b>Легга</b> 19.9.L; 19.9.LNb; 19.12.3.L; 24.13.L; 23.12.L; 22.11.L; 24.13.LNb; 23.11.LNb; 21.11.LNb; 21.13.3.L; 22.8.3.L; 25.22.2.LMn; 20.25.5.Lcu; 27.31.4.Lcu; Sanicro 69HP; <b>Электроды</b> 19.9.LR; 19.9.NbR; 19.12.3.LR; 19.12.3.LRH; 19.12.3.LRV; 23.12.2.LR; 24.13.LR; 29.9.R; 22.9.3.LR; 25.10.4.LR; 22.12.HTR; 20.25.5.LCUR; 25.22.2.LMnB; 7.31.4.LCUR; Sanicro71; Sanicro60	22.12.2013
49	Фирма «TRAFILERIE DI CITTADELLA SPA»	Via Mazzini, 69 35013 Cittadella Padova - Италия	<b>Проволока порошковая</b> FILEUR RS-HP, FILEUR ARS, FILEUR ARS 5, FILEUR ARS 10, FILEUR ARS 11, FILEUR ARS 15, FILEUR ARS 18, FILEUR ARS 20, FILEUR ARS 35, FILEUR ARS 40, FILEUR ARS 45, FILEUR VAB 5, FILEUR AB 10, FILEUR B 15, FILEUR B 18, FILEUR AB 25, FILEUR B 29, FILEUR B 35, FILEUR AB 40, FILEUR B 45, FILEUR B 47, FILEUR AMC 01, FILEUR AMC 05, FILEUR NG-T4, FILEUR NG-T11, FILEUR AMC 50 NG, FILEUR AMC 51, FILEUR AMC 55, FILEUR AMC 56, FILEUR AMC 56 Ti, FILEUR AMC 57, FILEUR AMC 60, FILEUR AMC 75, FILEUR AMC 76, FILEUR AB 37, FILEUR AB 48, FILEUR AB 65, WIREX WRS Normal EP, Super 46, Univers, Perfectt, Rekord 38, Extra 46 S, EBR, EBE, BN 35, BN 45, BN 55, Omnia 46, Bester 6013, Basic One	18.12.2013
50	Фирма «Sprawmet sp. Z.o.o»	PL-41605 Swietochlowice, ul. Imieli 14-Польша		18.03.2014
51	«Частная научно-производственная коммерческая фирма «Ремаш»	г. Днепродзержинск, ул. Героев Сталинграда, 6.157а	<b>Проволока порошковая</b> ВЕЛТЕК-Н250-PM, ВЕЛТЕК-Н350-PM, ВЕЛТЕК-Н370-PM, ВеТ ПП-Нп 14ГСТ, ВЕЛТЕК-Н220У, ПП-АН1, ПП-АН8, ППс-ТМВ6, ВЕЛТЕК-Н480С, ВЕЛТЕК-Н500-PM, ВЕЛТЕК-Н505-PM, ВЕЛТЕК-Н550-PM, ВеТ ПП-Нп 25Х5ФМС, ВеТ ПП-Нп 35В9Х3СФ, ВЕЛТЕК-Н620, ВеТ ПП-Нп 80Х20РЭТ	21.09.2011
52	ООО ПКП «Системы эффективного развития»	г. Донецк, ул.Булаева, 8	<b>Прутки медные</b> М1, М2, М3 <b>Прутки латунные</b> ЛС59, Л63	29.04.2015
53	Фирма «Selectarc Industries»	F-90600, Grandvillars, Place des Forges, Франция	<b>Электроды</b> Selectarc 18/8MnBCW, Selectarc Inox2509Mo, Selectarc Ni 690, Selectarc HBmCr, Selectarc B7016Sp, Selectarc 308 HR, Selectarc INOX 385, Selectarc Ni 182, Selectarc HB650B, Selectarc B36S, Selectarc Inox307HR, Selectarc Inox310MoL, Selectarc Ni 82, Selectarc HB14Mn, Selectarc B 7018S, Selectarc 316 HR, Selectarc Inox383, Selectarc Ni-A, Selectarc HBCavit, Selectarc B7028, Selectarc 309 HR, Selectarc Inox 309LB, Selectarc B 90, Selectarc HB13Mn, Selectarc B 60, Selectarc 309MoHR, Selectarc 24/12S, Selectarc B91, Selectarc HB13MnB, Selectarc B611N, Selectarc INOX 13/4, Selectarc INOX 25/35H, Selectarc MS 6013, Selectarc HB 65, Selectarc B609, Selectarc Inox 312HR, Selectarc Inox630B, Selectarc INOX25/35XM, Selectarc 51, Selectarc HB 68, Selectarc B 69, Selectarc Inox17/4Mo, Selectarc INOX21/33, Selectarc 511, Selectarc HB 67, Selectarc B 70, Selectarc Inox17/4, Selectarc Inox 308LF, Selectarc 512, Selectarc HB65S, Selectarc B 72, Selectarc Inox430B, Selectarc Inox 309Mo, Selectarc 513, Selectarc HB Mar 50, Selectarc B 73, Selectarc Inox 316NG, Selectarc Inox309LMo, Selectarc 575, Selectarc HB 450 HT, Selectarc B74, Selectarc Inox316L, Selectarc Inox309L, Selectarc 515, Selectarc HB 600 HT, Selectarc B 75 Cu, Selectarc Inox317L, Selectarc Inox318B, Selectarc D6, Selectarc HB 40HT, Selectarc B76, Selectarc Inox SD, Selectarc 58, Selectarc HB 48HT, Selectarc B 77,	

№ п/п	Наименование предприятия	Адрес	Сертифицированная продукция	Дата окончания действия сертификата
54	ООО «Укрпроммехарк»	г. Днепрпетровский, пер. Станкостроительный, 3 49073, г. Днепрпетровский, ул. Пограничная, 44 тел./факс: (056) 370-74-43	Selectarc 307 B, Selectarc Inox309NbV, Selectarc 48SP, Selectarc HB 56HT, Selectarc B 78,Selectarc Inox308Mo, Selectarc Inox309MoLB, Selectarc 51M, Selectarc HB400HT, Selectarc B 81, Selectarc 20/10 BC, Selectarc Inox430MoB, Selectarc 54,Selectarc HB480HT, Selectarc B 82, Selectarc INOX 347, Selectarc 316HR, Selectarc 50, Selectarc HB560HT, Selectarc B 84, Selectarc 20/10 MBC, Selectarc Inox13/1, Selectarc 56, Selectarc HB50Co, Selectarc B842, Selectarc INOX 318, Selectarc Inox410NiMo, Selectarc 55,Selectarc HB570HT, Selectarc B762M, Selectarc 24/12 S, Selectarc 308HR, Selectarc 160, Selectarc B769D, Selectarc 24/12 Mo, Selectarc 20/10BC, Selectarc 180, Selectarc B 92 Co, Selectarc B76 HR, Selectarc 29/9S, Selectarc AISi5, Selectarc 434,Selectarc HB96, Selectarc B608, Selectarc Inox 308 B, Selectarc A1102, Selectarc RD67, Selectarc HB95CoB,Selectarc B68SC, Selectarc 308VD, Selectarc AL 100,Selectarc 575F, Selectarc HBC 62, Selectarc B 691P, Selectarc INOX 316 B, Selectarc AL 105,Selectarc 52,Selectarc HB10Cr, Selectarc FONTE-Ni, Selectarc 316 VD, Selectarc AL 112, Selectarc R60, Selectarc HB68Nb, Selectarc FONTE-Ni 2, Selectarc Inox308L, Selectarc Cu110, Selectarc R63, Selectarc HRT 60, Selectarc FONTE-Ni3, Selectarc Inox E316L-17, Selectarc Cu114, Selectarc R68, Selectarc HRT 63,Selectarc FONTE-Ni4, Selectarc Inox316SC, Selectarc Cu115, Selectarc Galva 46, Selectarc HRT 68, Selectarc FERRO-Ni, Selectarc Inox 312S, Selectarc Cu116, Selectarc R75Cu, Selectarc HRT 60WC, Selectarc Fonte NiFe-2, Selectarc 25/20 R, Selectarc Cu117, Selectarc Therm 200,Selectarc HRT Ni60WC, Selectarc Fonte NiFe260, Selectarc 25/20 B,Selectarc Cu118,Selectarc 6010, Selectarc Fonte NiFe50, Selectarc INOX310H,Selectarc Cu120,Selectarc DCS,Selectarc Co 12,Selectarc Fonte NiCu,Selectarc Inox310Mn,Selectarc Cu300,Selectarc CUT 100,Selectarc Co 21,Selectarc Fe-Ni/Cu, Selectarc Inox330, Selectarc CuNi10,Selectarc 9010, Selectarc Co 21S,Selectarc BIMETAL NiFe, Selectarc Inox310R,Selectarc CuNi30, Selectarc HB 25, Selectarc Co25, Selectarc Fonte BMP,Selectarc INOX 308H, Selectarc Ni190, Selectarc HB40,Selectarc Co 6, Selectarc Fonte Fe, Selectarc INOX 308H B,Selectarc Ni-C,Selectarc HB40B, Selectarc Co1HR,Selectarc Fonte Fe-2,Selectarc INOX 316H, Selectarc Ni22,Selectarc HB300B, Selectarc Co12HR,Selectarc Fonte Fe-3,Selectarc INOX 316H B,Selectarc Ni276,Selectarc HB350B, Selectarc Co21HR, Selectarc Fonte Fe45,Selectarc INOX 347B, Selectarc Ni59, Selectarc HB380B, Selectarc Co25HR,Selectarc Fonte Fe3Mo,Selectarc 29/9W,Selectarc NiTi 3,Selectarc HB63S,Selectarc Co6HRL,Selectarc Fonte Fe-4F,Selectarc INOX 2209,Selectarc Ni 624,Selectarc HB 60,Selectarc Co21HL,Selectarc Fonte Fe-4M,Selectarc INOX 2209B,Selectarc Ni 625,Selectarc HB 61 B,Selectarc Co28HR, Selectarc C7010A1,Selectarc Inox2509MoB,Selectarc Ni 625BF,Selectarc HB61R,Selectarc HB650CB,Selectarc C8010, Selectarc 6809MoB,Selectarc Ni 617,Selectarc HMN,Selectarc B47,Selectarc C6010,Selectarc Inox2509MoWB	10.02.2012
55	ООО ВТК «ЭРА»	г. Днепрпетровский, ул. Пограничная, 44 тел./факс: (056) 370-74-43	Проволока Св-08, Св-08А, Св-08Г2с, Св-08Гта, Св-08ГА-О Электроды МР-3, АНО-4, УОНИ-4, УОНИ-13/55, АНО-21	17.02.2012

П. А. Проценко, аудитор,  
руководитель группы сертификации материалов ГП НТЦ «СЕПРОЗ»

Подписано к печати 10.05.2011. Формат 60×84/8. Offsetная печать. Усл. печ. л. 9.04. Усл.-отт. 9,84.  
Уч.-изд. л. 10,24 + 5 цв. вклеек. Цена договорная.  
Печать ООО «Фирма «Эссе». 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.