

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Главный редактор  
**Б. Е. ПАТОН**

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

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

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

**УЧРЕДИТЕЛИ:**

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

**ИЗДАТЕЛЬ:**

Международная ассоциация  
«Сварка»

**Адрес редакции:**

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

**Редакторы:**

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

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**

*Махненко В. И., Шекера В. М., Великоиваненко Е. А.,  
Олейник О. И., Розынка Г. Ф., Пивторак Н. И.* Анализ  
условий возникновения и развития коррозионных трещин в  
зоне кольцевых сварных соединений магистральных  
газопроводов ..... 5  
*Нестеренков В. М., Протосей Н. Е., Архангельский Ю. А.*  
Технологические особенности электронно-лучевой сварки  
бурильных долот ..... 12  
*Никонова Е. С., Кораб Н. Г., Кондратенко В. Ю.* Напряжен-  
но-деформированное состояние сварных соединений труб  
из полимеров, выполненных способом стыковой сварки  
под углом ..... 20  
*Корж В. Н., Попиль Ю. С.* Особенности использования  
водородно-кислородного пламени при газопламенной  
обработке металлов ..... 24

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ**

*Бах Ф.-В., Беньяш А., Лау К., Конья Р.* Вневакуумная элект-  
ронно-лучевая сварка конструкционных сталей ..... 29  
*Ка П., Мартикайнинен Дж., Джерстром П., Ууситало Дж.*  
Влияние точности сборки на качество угловых соединений  
при сварке короткой дугой ..... 35  
*Барвинко А. Ю.* Оценка остаточного ресурса сварных соеди-  
нений вертикальной стенки резервуаров после 20-25 лет  
эксплуатации ..... 42  
*Малинов Л. С., Малинов В. Л., Орлов Л. Н., Голякевич А. А.*  
Новая порошковая проволока, обеспечивающая эффект  
деформационного упрочнения наплавленного металла  
при эксплуатации ..... 46  
**СВАРКА ЗА РУБЕЖОМ**  
Технологические ноу-хау ..... 49

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

*Шоповалов Е. В., Коляда В. А.* Система слежения за  
расположением шва в установках для нанесения  
антикоррозионного покрытия ..... 52  
Патенты в области сварочного производства ..... 54  
По страницам журнала «Welding and Cutting» ..... 57  
Новые книги ..... 58

**ХРОНИКА**

Выставка «Металлы Сибири: Металлургия. Машино-  
строение. Металлообработка. Сварка» в Новосибирске ..... 60  
Памяти В. В. Смирнова ..... 61  
ИНФОРМАЦИЯ ..... 62

# Avtomaticheskaya Svarka

№ 5 (673)

May 2009

Published since 1948

EDITORIAL BOARD:

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

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

THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

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

FOUNDERS:

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

PUBLISHER:

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

Editors:

E. N. Kazarova, T. V. Yushchina  
*Electron galley:*  
I. S. Batasheva, A.I.Sulima,  
I. R. Naumova,  
I. V. Petushkov

State Registration Certificate  
KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved

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

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

## CONTENTS

NEWS ..... 3

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL

*Makhnenko V. I., Shekera V. M., Velikoivanenko E. A., Oleinik O. I., Rozyinka G. F., Pivtorak N. I.* Analysis of conditions of initiation and propagation of corrosion cracks in the zone of circumferential joints of main gas pipelines ..... 5

*Nesterenkov V. M., Protosey N. E., Arkhangelsky Yu. A.* Technological peculiarities of electron beam welding of drilling bits ..... 12

*Nikonova E. S., Korab N. G., Kondratenko V. Yu.* Stress-strain state of polymer pipe welded joints made by butt welding under angle ..... 20

*Korzh V. N., Popil Yu. S.* Peculiarities of application of hydrogen-oxygen flame in gas-flame treatment of metals ..... 24

### INDUSTRIAL

*Bach Fr.-W., Beniyash A., Lau K., Konya R.* Nonvacuum electron beam welding of structural steels ..... 29

*Kah P., Martikainen J., Jernstrom P., Uusitalo J.* Effect of assembly accuracy on quality of fillet joints in short-arc welding ..... 35

*Barvinko A. Yu.* Assessment of residual life of vertical welded joints of tanks after 20-25 years of service ..... 42

*Malinov L. S., Malinov V. L., Orlov L. N., Golyakevich A. A.* New flux-cored wire providing the effect of strain hardening of deposited metal in service ..... 46

### WELDING ABROAD

Technological know-how ..... 49

### BRIEF INFORMATION

*Shapovalov E. V., Kolyada V. A.* System of tracking the weld position in installations for anti-corrosion coating deposition ..... 52

Patents in the field of welding ..... 54

Review of journal «Welding and Cutting, 2008» ..... 57

New books ..... 58

### NEWS

Exhibition «Metals of Siberia: Metallurgy. Machine building. Metal Treatment. Welding» in Novosibirsk ..... 60

Memory of V. V. Smirnov's ..... 61

INFORMATION ..... 62

Journal «Avtomaticheskaya Svarka» is published in English under the title «The Paton Welding Journal»

## УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СВАРОЧНЫЙ ПОЛУАВТОМАТ MIG/MAG M 2070 CuSi

Известная германская компания «LORCH» разработала и предлагает на рынке сварочного оборудования универсальный сварочный полуавтомат MIG/MAG для работ в автомастерских, позволяющий выполнять сварку черной стали, алюминия, MIG-пайку (оцинкованный металл), сварку нержавеющей стали, точечную сварку.

Полуавтомат LORCH N 2070 CuSi предназначен для выполнения наиболее ответственных сварочных работ, производимых в автомобильных мастерских. Все чаще кузова автомобилей производятся из оцинкованной стали. Возможность их ремонта обеспечивается то-



лько методом MIG-пайки. M 2070 CuSi успешно сваривает оцинкованные поверхности с помощью материала CuSi 3 диаметром 0,8 или 1,0 мм в защитной среде аргона. 4-роликковый подающий механизм и приспособленная сварочная горелка ML 1500 позволяют реально сваривать алюминий проволокой диаметром 1,0 мм. Аппарат отлично подходит также для сварки обычной или нержавеющей стали.

### Технические характеристики

Способы сварки:

MIG/MAG сварка  
MIG-пайка

Напряжение питания 3-50/60  
Гц, В 3x400

Свариваемые материалы:  
сталь/нерж.  
сталь/алюминий  
Максимальный ток

питания, А	4,5
cos φ	0,89
Сетевые предохранители, А	10
Ток сварки, А	15-150
Напряжение дуги, В	14,8-27,5
Ступени регулировки тока	7
Максимальная мощность, кВт	4,5
Ток сварки при ПВ 60% (40 °С), А	120
Ток сварки при ПВ 100% (40 °С), А	100
Диаметр стальной сварочной проволоки, мм	0,6-0,8
Диаметр алюминиевой проволоки, мм	1,0
Класс защиты	IP23
Класс изоляции	F
Подающий механизм	4-роликковый
Ролики в комплекте, мм	0,8/1,0

Полуавтомат комплектуется сварочной горелкой ML 1500 3 (подготовленной для MIG-пайки), газовым редуктором и кабелем «земля».

## НОВЫЙ СВАРОЧНЫЙ ЦЕНТР

ПК «Завод «Турбоатомгаз» собрал и ввел в эксплуатацию новый сварочный центр, оснащенный уникальным комплексом для автоматической наплавки на шейки и упорные диски роторов новых паровых турбин, рассчитанных для работы на повышенных параметрах пара. Роторы этих турбин впервые изготовлены из особо прочной высоколегированной хромистой стали, что потребовало для обеспечения надежной работы ротора с подшипниками выполнения сложной технологической операции по наплавке металла на шейки упорные диски роторов. Новый комплекс для наплавки и термообработки роторов паровых турбин оснащен по последнему слову техники, отдельные его элементы изготовлены по индивидуальным проектам. Кроме австрийской фирмы «Фрониус», спроектировавшей и изготовившей оборудование для наплавки, в создании комплекса участвовали фирмы из

Германии и Финляндии. В III квартале 2009 г. на ЛМЗ будут выполнены наплавки двух роторов турбин для Харанорской ГРЭС (Томская обл.), а затем двух роторов аналогичной турбины для Черепетской ГРЭС.

Подготовка на заводе к таким работам началась давно в сварочной лаборатории на «Турбоатомгазе» и в ЦКТИ, где проведен целый комплекс научно-исследовательских работ, в том числе триботехнические испытания экспериментальной наплавки на вал, выполненной в лаборатории отдела сварки филиала и прошедшей предварительную проверку на заводе. По существу моделировали операции, которые будут проходить на штатных роторах, чтобы убедиться в правильности выбранной технологии.

Специалисты ЛМЗ уверены, что уникальное оборудование будет использовано и для выполнения других работ по изготовлению турбинного оборудования.

## ГИПЕРДУПЛЕКСНАЯ ХОРОШОСВАРИВАЕМАЯ КОРРОЗИОННО- СТОЙКАЯ СТАЛЬ SANDVIK SAF 2707 HD

Фирмой «AB Sandvik Materials Technology» (Швеция) разработана сталь Sandvik SAF 2707 HD, имеющая хорошо сбалансированный химический состав, структуру с приблизительно 50 % феррита и 50 % аустенита. Она рассчитана на применение в кислых средах, содержащих хлориды. Комбинация хрома, азота и молибдена повышает стойкость к локальным видам коррозии (питтинговой и щелевой). Для двухфазных сталей важно, чтобы показатель PRE (эквива-



лент стойкости к питтинговой коррозии) двух фаз аустенита и феррита, был одинаков, чтобы исключить коррозионное воздействие на более слабую фазу. У стали Sandvik SAF 2707 HD среднее значение PRE равно 49.

Индивидуальные значения PRE каждой из двух фаз обычно отличаются от среднего в пределах единицы PRE. Элементный состав также сбалансирован и обеспечивает высокую ударную вязкость и пониженный риск образования хрупких фаз при отжиге.

Номинальный химический состав стали Sandvik SAF 2707 HD следующий, мас. %: 0,03 C; 27 Cr; 6,5 Ni %; 5 Mo; 0,4 N (PRE-49).



При двухфазной структуре предел текучести вдвое выше (около 800 МПа), чем у аустенитных нержавеющей сталей при соответствующей стойкости к питтинговой коррозии. Более высокая прочность дуплексной стали позволяет во многих случаях значительно уменьшить толщину стенки изделия, уменьшить массу и общие затраты на сооружение оборудования. Несмотря на высокую прочность, сохраняется высокий уровень пластичности, и операции при изготовлении изделий такие, как гибка или вытяжка, можно выполнять по тем же технологиям, что и для аустенитных сталей. Для теплообменных труб типичны предел текучести  $\sigma_{0,2} = 800$  МПа и временное сопротивление 1000 МПа. Относительное удлинение в состоянии после закалки и отжига превышает 25 %. Диапазон температур применения дуплексных нержавеющей сталей составляет приблизительно

(-50) – (+300) °С. Ограничение нижнего предела состоит в том, что дуплексные стали, как и другие материалы с ферритной матрицей, подвергаются охрупчиванию при пониженных температурах. Верхний предел также установлен с учетом охрупчивания при 475 °С. Сталь Sandvik SAF 2707 HD обладает очень высокой ударной вязкостью. Переход из вязкого состояния в хрупкое имеет место при температуре ниже -50 °С.

В целом сталь Sandvik SAF 2707 HD обладает хорошей свариваемостью. Для сварки стали Sandvik SAF 2707 HD разработали присадочный материал Sandvik SAF 27.9.5L. Наплавленный металл и металл зоны термического влияния имеют ферритно-аустенитную структуру с содержанием феррита в пределах 30-70 %. Высокое содержание азота в материале обеспечивает быстрое образование аустенита при сварке. Чтобы компенсировать потерю азота в металле шва при сварке в защитном газе, следует применять защитный газ состава Ar + 2-3 % N. Присадочный материал Sandvik SAF 27.9.5L имеет повышенное содержание никеля, чтобы повысить стойкость к питтинговой коррозии. Выделения такие, как Cr<sub>2</sub>N и σ-фаза, могут отрицательно повлиять на коррозионные и механические свойства, если их присутствие в микроструктуре окажется достаточно велико. Для структурной стабильности Sandvik SAF 2707 HD термический цикл при сварке необходимо строго контролировать, чтобы получить оптимальные свойства сварного шва. Следует избегать чрезмерно большого теплоотвода, чтобы минимизировать опасность образования σ-фазы и других интерметаллидных фаз. Слишком малый теплоотвод также нежелателен из-за вероятности чрезмерно большого образования феррита и выделения нитридов.

Высокая коррозионная стойкость стали Sandvik SAF 2707 HD подтверждена в тепло-

обменниках на нескольких промышленных установках.

## UNISTICK 360C, 510C, 650C

Компания «Helvi» (Италия) предлагает серию сварочных тиристорных выпрямителей UNISTICK на токи: 20...350 (360C), 20...460 (510C), 20...600 А (650C). Они обеспечивают стабильный процесс сварки при использовании всех типов качественных электродов диаметром от 2 до 8 мм, а также электродов с целлюлозным видом покрытия и алюминиевых электродов. Оснащены системами внешней регулировки и контроля «Горячий запуск» и



«Давление дуги». Могут использоваться для сварки вольфрамовым электродом или высокочастотной дугой (при комплектации дополнительным блоком). Имеют разъем для дистанционного управления. Идеально подходят для профессиональной сварки на поверхностях, прокладке нефтепроводов и в других областях.

### Технические характеристики UNISTICK 360C (510C) [650C]

Напряжение питания, В	230/400 В 50/60 Гц
Мощность, кВт	19(24) [24]
Напряжение холостого хода, В	80(80) [66-80]
Диапазон тока, А	20-350(20-460) [20-600]
Стандартный ток, А при 35 % ПВА	350(460) [600]
	60 % 255(350)
	100 % [425]
Диаметр электрода, мм	2-6(2-6) [2-8]
Масса, кг	142(161) [230]



# АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ КОРРОЗИОННЫХ ТРЕЩИН В ЗОНЕ КОЛЬЦЕВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **В. М. ШЕКЕРА**, канд. техн. наук,  
**Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО**, канд. физ.-мат. наук, **О. И. ОЛЕЙНИК**, **Г. Ф. РОЗЫНКА**,  
**Н. И. ПИВТОРАК**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены условия образования коррозионных трещин в зоне кольцевых монтажных и продольных заводских сварных стыков магистральных газопроводов. Для конкретного случая аварии выполнен анализ силовых условий и сопротивляемости материала образованию и развитию коррозионных трещин под напряжением вплоть до спонтанного разрушения.

*Ключевые слова:* сварные магистральные газопроводы, кольцевые стыки, возникновение и развитие коррозионных трещин, диаграмма трещиностойкости, номинальные напряжения, концентрация напряжений, коэффициенты интенсивности напряжений

Наиболее опасными дефектами сварных магистральных газопроводов являются коррозионные трещины, которые относительно плохо выявляются методом внутритрубной диагностики. Возникновение и развитие таких дефектов до критических размеров, когда происходит спонтанное разрушение трубопроводов, определяется рядом факторов:

- разрушением антикоррозионной изоляции поверхности трубопровода и соответственно образованием контакта с внешней средой (грунтом);

- временем пребывания стенки трубы  $\Delta t_k$  в условиях коррозии под напряжением;

- степенью агрессивности внешней среды (влажность грунта, его химический состав и т. п.);

- уровнем растягивающих напряжений в стенке трубопровода и наличием зон концентраций напряжений;

- способностью материала стенки трубопровода сопротивляться возникновению и росту коррозионных трещин.

Наличие перечисленных факторов является необходимым условием для возникновения и развития коррозионных трещин, однако каждый из них не является достаточным для образования дефекта указанного типа.

Как правило, длительность надежной работы защитного покрытия трубопровода заметно ниже проектной и реальной продолжительности работы самого трубопровода. При этом вероятность разрушения (отслоения) покрытия зависит от его типа, условий нанесения и эксплуатации. В зависимости от условий нанесения покрытия зона

монтажных сварных соединений может быть достаточно уязвимой.

Время  $\Delta t_k$  пребывания стенки трубопровода после разрушения покрытия в условиях коррозии под напряжением трудно поддается детерминированному расчету. Оценка этой величины в значительной степени зависит от периодичности контроля состояния изоляции (либо переизоляции) трубопровода, длительности остановок трубопровода, изменения агрессивности среды и др. Достаточно консервативной оценкой  $\Delta t_k$  при надежных методах контроля состояния изоляционного покрытия является период между очередными контрольными проверками (около 2...5 лет), если при этом они совмещены по времени с внутритрубной диагностикой состояния стенки трубопровода. Очень важно, чтобы за время  $\Delta t_k$  коррозионные трещины с учетом их возникновения и роста (слияния) не достигли критических размеров, при которых происходит спонтанное разрушение.

Степень агрессивности внешней среды для магистральных газопроводов в основном определяется свойствами тех грунтов, в которые укладывают трубопроводы (вопрос коррозионных повреждений на внутренней поверхности, характерный для нефтепроводов [1], в данной работе не рассматривается). При этом большое значение имеет степень влажности грунта, обусловленная периодическими либо постоянными притоками влаги.

Результаты исследований, проводимых в ИЭС им. Е. О. Патона, показали, что при периодическом увлажнении грунта при его высыхании на поверхности трещины появляется пленка из продуктов коррозии, разрушение которой после интенсивного притока влаги занимает определенное время, что заметно сказывается на средних зна-



чениях скорости роста трещины по толщине стенки при постоянных напряжениях от силовой нагрузки. Постоянная достаточно высокая влажность агрессивной среды характерна для магистральных трубопроводов, уложенных в болотистой местности, по дну озер, рек, морей. При укладке их в твердый грунт высокая влажность, связанная с атмосферными осадками, носит периодический характер. С учетом отмеченных обстоятельств экспериментальные исследования кинетики роста коррозионных трещин в лабораторных условиях при постоянной высокой влажности (водные растворы вытяжек соответствующих грунтов [2]) дают консервативные данные, что на определенном этапе изучения проблемы вполне приемлемо для получения расчетных прогнозов остаточного ресурса безопасной эксплуатации.

Уровень номинальных растягивающих напряжений в стенке трубы определяется внутренним давлением газа в ней, а также изгибными деформациями, связанными чаще всего с проседанием грунта под трубой и изгибающими моментами от собственного веса трубы и грунта засыпки. Большое значение имеют местные геометрические особенности (например, зоны сварных соединений), обуславливающие концентрацию номинальных напряжений. Как правило, эти зоны в районе продольных (заводских) и кольцевых (монтажных) сварных соединений являются наиболее уязвимыми для возникновения и развития соответственно продольных и окружных коррозионных трещин.

Из практики известно, что коррозионные трещины возникают и развиваются в зоне как продольного, так и окружного шва, хотя условия возникновения относительно нормальных напряжений, ответственных за образование и развитие таких дефектов, разные. В обычных условиях при хорошем прилегании трубы к грунту и незначительных изгибных деформациях по номинальным нормальным напряжениям продольные сварные соединения более уязвимы (при прочих равных условиях), чем кольцевые. Однако заводские условия получения продольных сварных соединений в ряде случаев обеспечивают более низкую концентрацию напряжений, чем в кольцевых соединениях, что может затормозить зарождение и рост коррозионной трещины на начальной стадии ее развития.

При нагружении трубопроводов только внутренним давлением указанный фактор будет иметь место, если значения коэффициента концентрации в зоне монтажного кольцевого сварного шва на наружной поверхности трубы будут в 2 раза выше, чем в зоне продольного сварного шва, выполненного в заводских условиях. Последнее подтверждается известными зависимостями, связываю-

щими источники концентрации напряжений в сварных стыковых соединениях (рис. 1).

Суммарный коэффициент  $\alpha$  концентрации номинальных нормальных напряжений  $\sigma_{ij}^H = Q_j/s$ , действующих поперек сварного соединения, который связан с геометрией (формой) стыкового шва  $\alpha_\phi$  возможным смещением кромок  $\alpha_{cm}$  и угловыми деформациями  $\alpha_y$ , выражается зависимостью [3]

$$\alpha = [1 + (\alpha_{cm} + \alpha_y - 2)]\alpha_\phi \quad (1)$$

где

$$\alpha_\phi = 1 + \left(\frac{s}{\rho}\right)^{2/3} \left\{ \frac{s}{g} \operatorname{ctg} \theta + 4,0 + \frac{s}{1+l/s} \right\}^{-2/3}$$

при  $0,15 \leq l/s \leq 2,5$ ;  $0,01 < \rho/s \leq 0,1$ ;  $0,1 \leq g/s \leq 0,2$ ;  $\theta \leq 30^\circ$  (обозначения в (1) соответствуют геометрическим параметрам стыкового соединения на рис. 1).

Для стыкового соединения продольного шва можно принять  $\alpha_{cm} = 1$ ,  $\alpha_y = 1$ . Для кольцевого шва, как правило, значения  $\alpha_{cm}$  и  $\alpha_y$  больше 1. Однако, если принять их равными 1, т. е. при отсутствии смещения кромок и угловатости, то даже за счет  $\alpha_\phi$  при увеличении отношения  $s/\rho$  в 3 раза и прочих равных условиях,  $\alpha$  увеличивается в 2 раза. Естественно, что при качестве выполнения кольцевого монтажного соединения на уровне такового для продольного заводского, более уязвимым с позиций зарождения коррозионных трещин будет зона продольного шва.

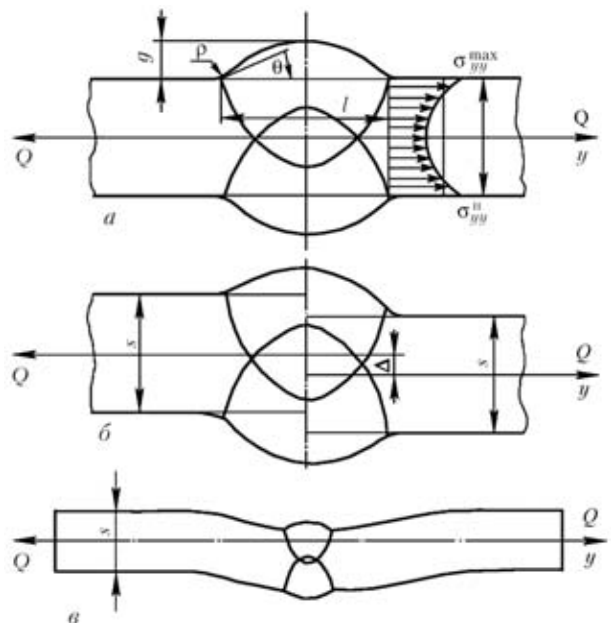


Рис. 1. Геометрические параметры стыкового соединения, определяющие концентрацию напряжений, обусловленную формой шва (а), смещением кромок (б) и наличием угловых деформаций (в)



Тем не менее, в ряде работ (например, [4]) повышенное внимание уделяется коррозионным трещинам и разрушению в зоне кольцевых монтажных сварных стыковых соединений магистральных газопроводов, при этом указанные явления связывают с наличием изгибающих моментов, возникающих при проседании грунта по длине трубопровода и соответствующем его провисании  $l$ . Образующиеся при этом максимальные напряжения от внутреннего давления  $P$  распределенной нагрузки (вес трубы и грунта засыпки) вдоль оси  $z$  трубы составляют

$$\sigma_{zz}^{\max} = P \frac{R}{2\delta} + M_{\max} \left( \frac{1}{\pi R^2 \delta} + \frac{1}{2\pi R^3} \right), \quad (2)$$

где  $M_{\max} = \frac{(q_{\text{тр}} + q_{\text{гр}})l^2}{B}$ ;  $q_{\text{тр}}$  — вес единицы длины трубы,  $q_{\text{тр}} = \gamma_{\text{тр}} 2\pi R \delta$ ;  $q_{\text{гр}}$  — вес грунта засыпки на единицу длины трубы,  $q_{\text{гр}} = \gamma_{\text{гр}} A_{\text{гр}}$ ;  $\gamma_i$  — удельный вес металла трубы ( $i = \text{тр}$ ) либо грунта ( $i = \text{гр}$ );  $A_{\text{гр}}$  — площадь поперечного сечения грунта засыпки (рис. 2) высотой  $h$  над верхней образующей трубопровода

$$A_{\text{гр}} = \frac{R}{2} [4h + R(4 - \pi)]. \quad (3)$$

Значения  $B$  меняются от 12 (в середине провисания пролета  $l$ ) до 24 (на концах пролета). Для рассмотренного в работе [4] случая: труба из стали типа X70 ( $2R \times \delta = 1420 \times 15,5$  мм) при  $\gamma_{\text{тр}} = 7,7$  Н/см<sup>3</sup> и  $\gamma_{\text{гр}} = 4,9$  Н/см<sup>3</sup>,  $h = 120$  см,  $A_{\text{гр}} = 19200$  см<sup>2</sup>, получим  $q_{\text{тр}} = 52,6$  Н/см = 5,26 Н/мм,  $q_{\text{гр}} = 941,8$  Н/см = 94,18 Н/мм.

Соответственно значения максимальных номинальных напряжений, полученные по (2), в зависимости от длины  $l$  провисания пролета при  $P = 7,5$  МПа приведены в табл. 1.

Поскольку окружные напряжения  $\sigma_{\beta\beta}$  от провисания трубы в пределах рассматриваемых значений  $l$  меняются мало и равны 343,6 МПа, то из приведенных данных следует, что при  $l < 20$  м и одинаковом качестве заводского и монтажного соединений (т. е. одинаковых значениях  $\alpha$ ) зарождение и развитие коррозионных трещин будет происходить быстрее в продольном соединении.

**Таблица 1.** Максимальные напряжения в различных участках провисания пролета

Место провисания пролета	$\sigma_{zz}^{\max}$ (МПа) при $l, \text{ м}$			
	0	10	20	30
Центр	171,8	206,3	309,8	482,3
Конец	171,8	189,0	240,8	327,0

Примечание. Стрелка прогиба  $f(l/2) \approx 120(1/20)^2$  [мм] трубы в центре провисания пролета.

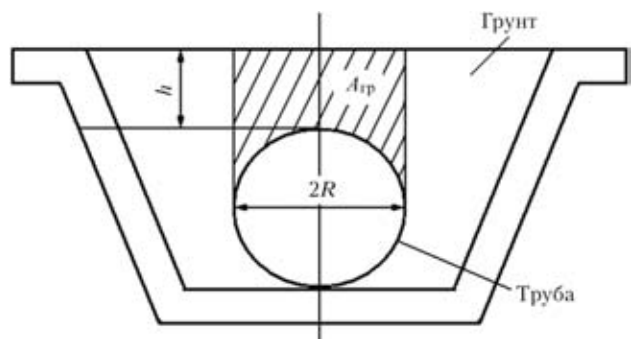


Рис. 2. Схема поперечного разреза траншеи с уложенным магистральным трубопроводом

Однако при более высоких значениях  $\alpha$  в кольцевом монтажном соединении либо при  $l > 25$  м и одинаковых значениях  $\alpha$  возникновение таких дефектов вполне может происходить быстрее в зоне этого соединения. Именно с этих позиций в работе [4] объясняется образование в рассматриваемом конкретном случае коррозионных окружных трещин в зоне монтажного кольцевого шва газопровода Ямбург–Западная граница, что привело в итоге к разрушению трубопровода. По данным соответствующего осмотра, разрушению предшествовало развитие кольцевых коррозионных трещины до ее максимального размера (длина  $2c = 525$  мм, глубина  $a = 8$  мм).

С помощью современных подходов механики разрушения тел с трещинами [3] можно определить, что при указанных размерах трещины  $2c \times a$  ее спонтанное распространение с большей вероятностью происходит при  $l \approx 20$  м. Согласно [3], критерий спонтанного роста рассматриваемой трещины можно записать в виде

$$Y = K_r - f(L_r) > 0, \quad (4)$$

где  $K_r = K_I / K_{IC}$  — отношение расчетного коэффициента  $K_I$  интенсивности напряжений на контуре рассматриваемой трещины к критическому значению  $K_{IC}$  для определенного материала трубы в этой зоне:

$$f(L_r) = (1 - 0,14L_r^2) [0,3 + 0,7 \exp(-0,65L_r^6)] \text{ при } L_r \leq L_r^{\max};$$

$$f(L_r) = 0 \text{ при } L_r > L_r^{\max}. \quad (5)$$

Для трубных сталей (система Fe–Mn–C) значение  $L_r^{\max} = 1,3$  по [5] на основании диаграммы определения разрушения (ДОР) при статическом нагружении тел с трещинами (рис. 3);  $L_r = \sigma_{ref} / \sigma_T$  (где  $\sigma_T$  — предел текучести материала;  $\sigma_{ref}$  — реферативное напряжение, соответствующее возникновению пластической неустойчивости в зоне трещины при данном виде нагружения). Согласно работе [5], для рассматриваемого случая



$$\sigma_{ref} = \frac{1}{3} \left[ \sigma_{\epsilon} + \sqrt{\sigma_{\epsilon}^2 + (\sigma_m^3)^2} \right], \quad (6)$$

где  $\sigma_{\epsilon}$  — чисто изгибная составляющая напряжения  $\sigma_{zz}^{max}$  в (2);  $\sigma_{\epsilon} = M_{max} / 2\pi R^3$ ;  $\sigma_m$  — мембранные напряжения,  $\sigma_m = P(R/2\delta) + M_{max} / (\pi R^2 \delta)$  (2); значения  $Z$  определяются по зависимости

$$Z = \frac{\pi}{2 \arccos(A \sin \theta) - \frac{a}{\delta} \theta} \left[ \frac{2 - 2\delta/R + a/R}{2 - \delta/R} \right], \quad (7)$$

где

$$\theta = \frac{2c\pi}{8R};$$

$$A = \frac{a(1 - \delta/R)(2 - 2\delta/R + a/R) + (1 - \delta/R + a/R)^2}{\delta \cdot 2[1 + (2 - \delta/R)(1 - \delta/R)]}.$$

С учетом указанных выше значений  $a$ ,  $\delta$ ,  $R$ ,  $c$  получим  $A = 0,565$ ,  $\theta = 0,290$ ,  $Z = 1,177$ . Соответствующие результаты расчета  $\sigma_{ref}$  для номинальных напряжений  $\sigma_{zz}^{max}$  в сечениях на концах и в центре пролета  $l$  приведены в табл. 2. Там же приведены значения  $L_r$  при  $\sigma_T = 490$  МПа. Из таблицы видно, что значения  $L_r$  не превышают  $L_r^{max} = 1,30$ . Согласно работе [5], значения  $K_I$  в вершине трещины при  $a/c < 0,01$  находят из зависимости

$$K_I = \sqrt{\pi a} (G_0 \sigma_m + G_1 \sigma_{\epsilon}), \quad (8)$$

где  $G_0 = 2,3$  и  $G_1 = 1,1$  [5].

В таблице также содержатся результаты расчета  $K_I$  по (8). Для вычисления  $K_r = K_I / K_{IC}$  необходимо знать значения  $K_{IC}$  в зоне трещины, полученные для конкретной трубной стали типа X70 при температуре наружной поверхности трубы.

Авторы работы [5] рекомендуют для расчета значений  $K_{IC}$  при отсутствии экспериментальных данных использовать соответствующие корреляционные зависимости, связывающие  $K_{IC}$  с интегралом  $J_{IC}$  либо ударной вязкостью  $KCV$ . В частности, если использовать корреляционную зависимость Rolve–Navak [5] в виде

Таблица 2. Расчетные значения  $\sigma_{ref}$ ,  $L_r$  и  $K_I$  для кольцевой трещины размером  $2c \times a = 525 \times 8$  мм в трубе (1420 × 15,5 мм) на различных участках провисания пролета  $l$

$l$ , мм	Центр пролета			Конец пролета		
	$\sigma_{ref}$ , МПа	$L_r$	$K_I$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	$\sigma_{ref}$ , МПа	$L_r$	$K_I$ , МПа·м <sup>1/2</sup>
0	202,2	0,413	62,6	202,2	0,413	62,6
10	242,8	0,495	75,2	222,4	0,453	68,9
20	364,6	0,744	112,9	283,4	0,578	87,8
30	567,7	1,160	175,8	384,9	0,785	119,2

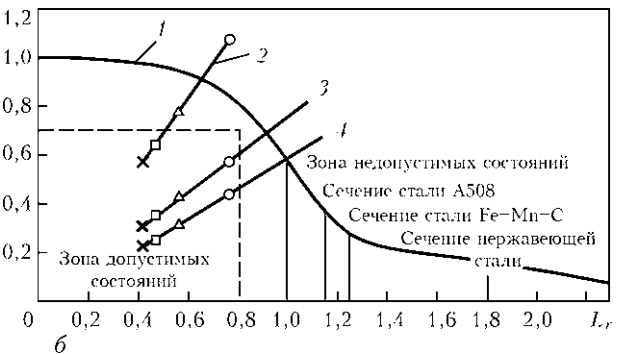
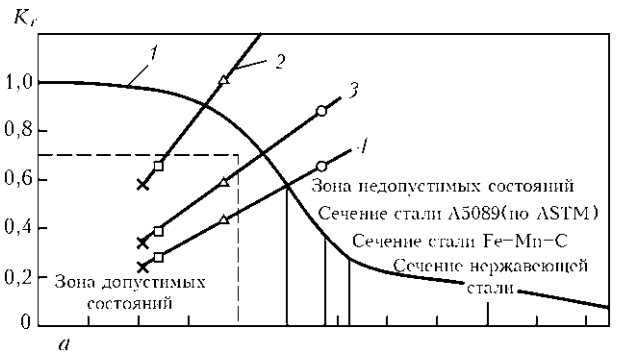


Рис. 3. ДОР (1) и расчетные кривые  $K_r(L_r)$ , полученные для окружной трещины размером  $2c \times a = 525 \times 8$  мм в трубе Ду 1420 × 15,5 мм из стали типа X70 при  $p = 0,05$  (2), 0,50 (3), 0,95 (4) для сечений в центре провисания пролета ( $a$ ) и на его концах ( $b$ ):  $\times$  —  $l = 0$ ;  $\square$  — 10;  $\Delta$  — 20;  $\circ$  — 30 м

$$K_{IC} = 8,47(KCV)^{0,63}, \quad (9)$$

что соответствует минимальному уровню значений  $K_{IC}$ , при которых вероятность неразрушения не ниже 0,05, то при  $KCV^{+20} \approx 59,2$  Дж/см<sup>2</sup> для трубной стали типа X70 получим  $K_{IC}(0,05) = 110,8$  МПа·м<sup>1/2</sup>.

Для вероятности неразрушения  $p > 0,05$  используем зависимость [5]

$$K_{IC}(p) = 20 + K_d [-\ln(1 - p)]^{0,25} \text{ [МПа·м}^{1/2}\text{]}. \quad (10)$$

При  $K_{IC}(0,05) = 110,8$  МПа·м<sup>1/2</sup>,  $K_d = 190,8$  МПа·м<sup>1/2</sup>; соответственно при  $p = 0,5$ ,  $K_{IC}(0,50) = 194,1$  МПа·м<sup>1/2</sup> и  $p = 0,95$ ,  $K_{IC}(0,95) = 271$  МПа·м<sup>1/2</sup>. На рис. 3,  $a$  приведены расчетные кривые  $K_r(L_r)$  для случая, когда коррозионная трещина находится в сечении центра провисания пролета длиной  $l$  при различных значениях  $K_{IC}(p)$ . Точки пересечения этих линий с кривой ДОР показывают, при каких усло-





виях вероятно спонтанное разрушение рассматриваемой коррозионной трещины в зависимости от  $l$  и  $p$ . На рисунке видно, что при сопротивлении материала хрупкому разрушению  $K_{IC} = 110,8 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ , соответствующему вероятности неразрушения  $p = 0,05$ , критическая длина  $l_{кр} = 17,2$ , при  $p = 0,50$   $l_{кр} = 23,7$  м, а при  $p = 0,95$   $l_{кр} = 27,0$  м.

Эти результаты получены для положения монтажного стыка в центре провисания пролета при проседании грунта под трубой. Результаты, полученные для стыка в зоне концов провисания пролета, при  $p = 0,05$   $l_{кр} = 25$  м и  $p \geq 0,5$   $l_{кр} < 30$  м приведены на рис. 3, б. При расстоянии между кольцевыми сварными соединениями 8...12 м на длине  $l > 30$  м помещаются 2...3 трубы, т. е. всегда вблизи центра провисания пролета имеется стык, поэтому данные, представленные на рис. 3, определяют верхнюю и нижнюю границы реальных значений. Это дает основание полагать, что в рассматриваемом случае значения  $l$  находились в пределах 20...25 м, что, очевидно, достаточно для спонтанного роста рассматриваемой трещины размером  $2c \times a = 525 \times 8$  мм. Однако с позиций ее образования без заметного увеличения концентрации напряжений  $\alpha$  в зоне кольцевого соединения не обошлось. Процесс образования и развития коррозионной трещины до критических размеров при рабочем давлении  $P = 7,5$  МПа и  $l = 20...25$  м можно представить следующим образом.

После разрушения изоляции начинается процесс коррозии под напряжением по механизму анодного растворения, когда поверхность трубы покрывается сеткой мелких трещин, вытянутых в направлении, перпендикулярном действию максимальных растягивающих напряжений. Появление таких трещин зависит как от уровня указанных напряжений, так и от сопротивляемости материала их образованию. Поэтому они могут возникать не обязательно в вершине концентратора напряжений (см. рис. 1), где за счет термомеханического цикла сварки материал упрочняется и может приобретать более высокое сопротивление стресс-коррозии, нежели материал периферийной зоны, на которую распространяется влияние этого концентратора. Поскольку на свободной поверхности поперек протяженного вдоль оси  $x$  концентратора (см. рис. 1) напряжения  $\sigma_{yy}$  определяются зависимостью

$$\sigma_{yy}(y) = \sigma_{yy}(y_k) + \int_{y_k}^y \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} dy, \quad (11)$$

где  $y_k$  — координата вершины концентратора напряжений  $\sigma_{yy}$ , то с увеличением значений  $y$  процесс снижения напряжений  $\sigma_{yy}(y)$  происходит доста-

точно медленно по сравнению с  $\sigma_{yy}(y_k)$ , так как  $\sigma_{xy}$  по оси  $x$  меняется мало.

В этой связи вполне объяснимо наблюдаемое на практике образование коррозионных трещин в основном металле параллельно сварному шву на некотором расстоянии от линии сплавления [4], где сопротивляемость появлению дефекта ниже.

По мере развития мелких трещин происходит их слияние с образованием магистральных трещин, рост которых определяется уже диаграммой статической коррозионной трещиностойкости данного материала в агрессивной среде [2] (рис. 4). В соответствии с этой диаграммой скорость роста трещины  $v$  определяется коэффициентом интенсивности напряжений  $K_I$  в соответствующих точках вдоль контура трещины. Начиная с некоторых размеров таких трещин, когда  $K_I > K_{ISCC}$ , изменяется основной механизм их роста — с анодного растворения на водородное охрупчивание, при котором скорость роста трещины значительно возрастает.

Для неглубоких трещин, вытянутых вдоль кольцевого шва, когда  $c \gg a$  при номинальных напряжениях  $\sigma_{zz}^{max}$  на уровне 300 МПа ( $l \approx 20$  м) и  $K_{ISCC} \approx 10...15 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ , этот переход имеет место при глубине трещины  $a = 0,1$  мм и ее длине  $2c = 10...15$  мм [2]. На скорость роста таких коррозионных трещин по их длине значительное влияние оказывает процесс слияния соседних трещин, а по глубине — интенсивность отвода продуктов коррозии. Указанные обстоятельства затрудняют получение расчетной оценки развития трещины в реальных условиях. Однако при наличии диаграмм статической коррозионной трещиностойкости, типа приведенных на рис. 5 и 6, можно с определенной консервативностью проводить отдельные характерные оценки.

Например, для рассматриваемой окружной трещины размером  $2c \times a = 525 \times 8$  мм можно оценить время ее развития от исходных размеров (примерно  $2c_0 = 10$  мм,  $a_0 = 0,1$  мм), когда начинается ее рост по механизму водородного ох-

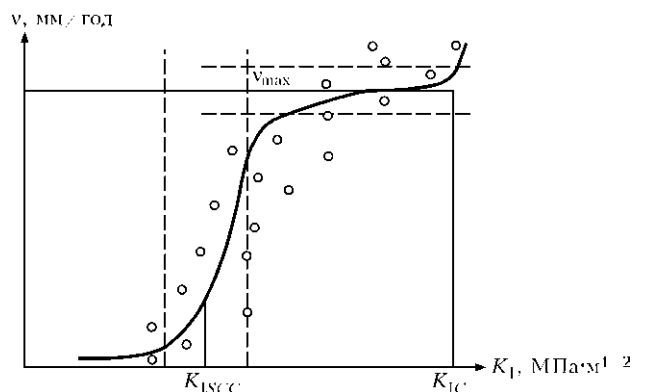


Рис. 4. Диаграмма статической коррозионной трещиностойкости трубной стали

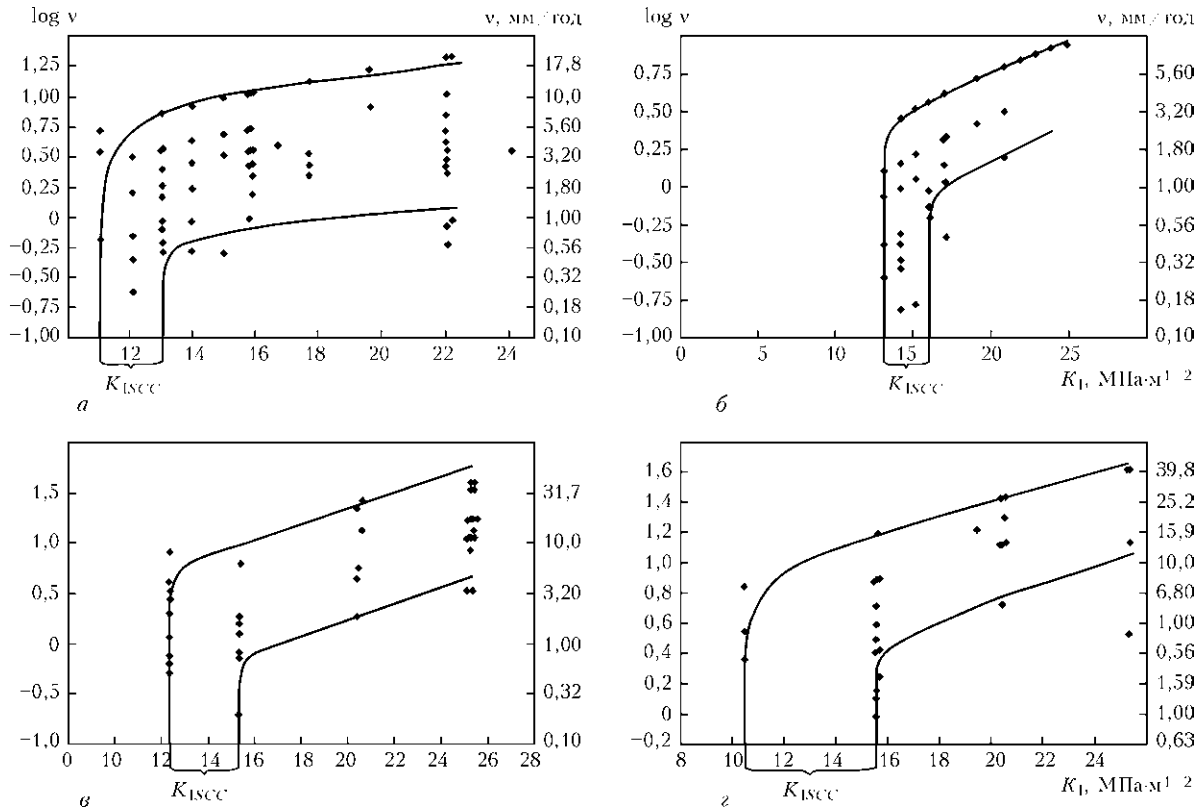


Рис. 5. Диаграммы статической коррозионной трещиностойкости, полученные для трубной стали 17Г1С при кратковременных испытаниях: *а* — 3%-й раствор NaCl, время испытания  $t = 534$  ч, средняя скорость роста трещины  $v_{cp} = 3,16$  мм/год; *б* — водная вытяжка чернозема,  $t = 265$  ч,  $v_{cp} = 2,12$  мм/год; *в* — водная вытяжка суглинка,  $t = 271$  ч,  $v_{cp} = 3,1$  мм/год; *г* — водная вытяжка песчаной почвы,  $t = 163$  ч,  $v_{cp} = 7,25$  мм/г

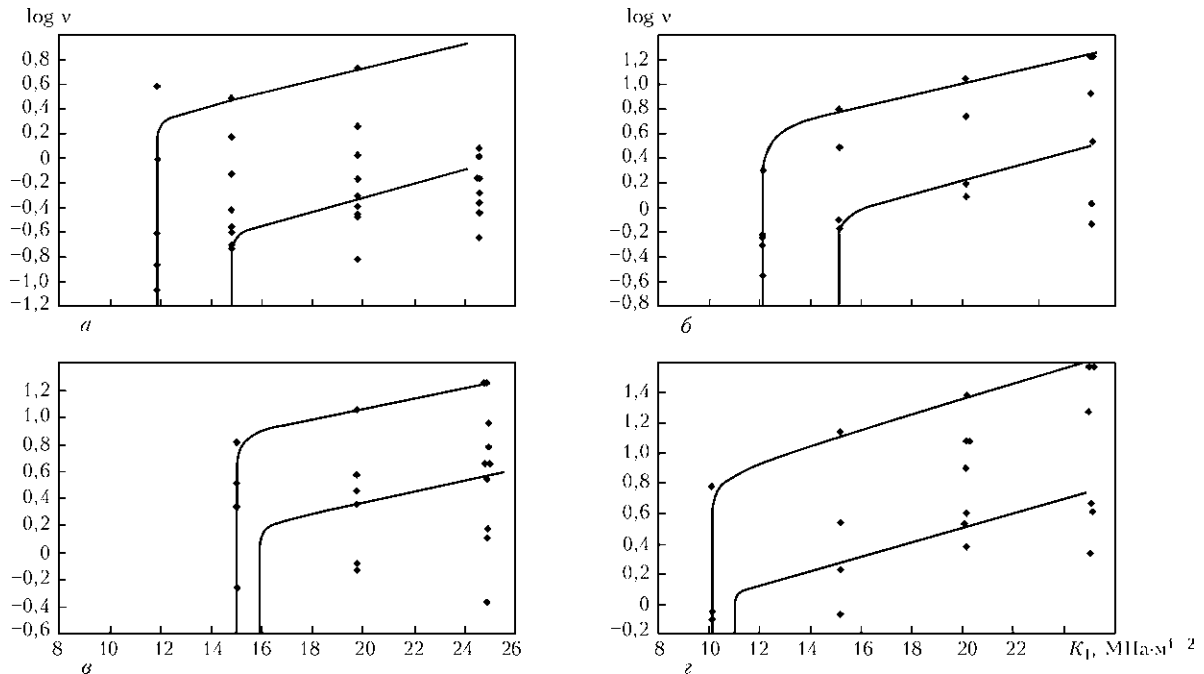


Рис. 6. Диаграммы статической коррозионной трещиностойкости, полученные для трубных сталей X60 (*а, б*) и 13Г1СУ (*в, г*) при кратковременных испытаниях: *а* — 3%-й раствор NaCl,  $t = 449$  ч,  $v_{cp} = 0,41$  мм/год; *б* — водная вытяжка суглинка,  $t = 167$  ч,  $v_{cp} = 1,84$  мм/год; *в* — 3%-й раствор NaCl,  $t = 168$  ч,  $v_{cp} = 2,24$  мм/год; *г* — водная вытяжка суглинка,  $t = 134$  ч,  $v_{cp} = 4,2$  мм/год

рупчивания, т. е. от  $K_I = K_{ISCC} \approx 12,5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  до  $K_I^{\max} \approx 0,9K_{IC}$ , хотя данные, типа приведенных

на рис. 5 и 6, полученные при кратковременных испытаниях по методике [2], ограничиваются обычно значениями на уровне  $K_I = 30 \dots 40 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ .

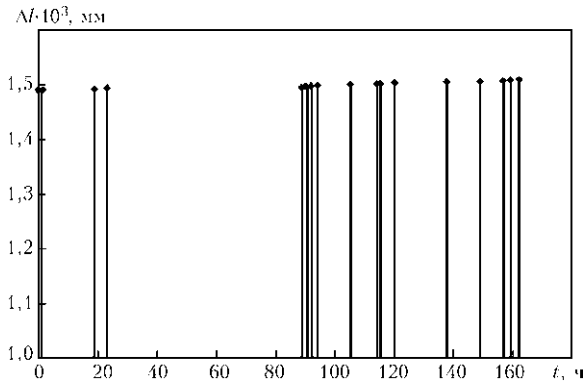


Рис. 7. Приращения  $\Delta l$  трещины, соответствующие одному сигналу акустической эмиссии при испытании образца из стали типа X60 в 3%-м растворе NaCl при  $K_I = 25 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$

С этой целью используем известную зависимость [2]

$$\frac{da}{dt} = HK_I^2, \quad (12)$$

где  $H$  — постоянный коэффициент пропорциональности для данных условий, определяется при  $K_I > K_{ISCC}$ .

С учетом такого приема, интегрируя (12) во времени от  $t_0$  (исходный размер трещины составляет  $0,1 \times 10 \text{ мм}$ ) до  $t$  ( $a = 8 \text{ мм}$ ), получим  $t - t_0 = 1,2 \text{ год}$  (при этом использовали экспериментальные данные:  $K_I = 25 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$   $da/dt = 1/4 \text{ мм/год}$ , рис. 7). Соответственно средняя скорость роста трещины по глубине равна  $6,7 \text{ мм/год}$ . Начальная длина одиночной трещины  $2c_0 = 10 \text{ мм}$  увеличивается за это время примерно на  $5...6 \text{ мм}$ , поскольку  $K_I(c)$  на поверхности трещин меньше  $K_I(a)$  в ее глубине [3], т. е. для достижения трещиной критической длины  $2c = 525 \text{ мм}$  необходимо слияние  $n$  одиночных макротрещин с начальными размерами  $2c_0$ , где  $n = 525 / (2c_0 + 6) \approx 33$  при  $2c_0 = 10 \text{ м}$ , что вполне реально.

Отметим характерную особенность роста коррозионных трещин, вытекающую из результатов, полученных по методике [2] при испытаниях на трехточечный изгиб образцов типа Шарпи с предварительно выращенной усталостной трещиной длиной около  $10 \text{ мм}$  вдоль всего фронта. По аналогии с циклическим нагружением [3] регистрируемые приращения трещины  $\Delta l$  (рис. 7) соответствуют равномерному распределению приращения  $\Delta a$  вдоль всего фронта распространения

трещины. На рис. 7 такие данные приведены при постоянном значении  $K_I = 25 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  за время испытания около  $168 \text{ ч}$ , в течение которого было зарегистрировано 17 сигналов акустической эмиссии, т. е. каждому сигналу примерно соответствует  $\Delta a = 0,0016 \text{ мм}$ . С учетом высокой избирательности процесса роста трещины вдоль фронта имеются все основания полагать, что в отличие от роста усталостной трещины процесс ее распространения проходит не одновременно вдоль фронта, т. е. в данном случае каждому сигналу в среднем соответствует приращение площади трещины  $\Delta S = 10\Delta a = 0,016 \text{ мм}^2$  при средних ее размерах  $\Delta a > 0,0016 \text{ мм}$  и  $2\Delta c < 10 \text{ мм}$ . Однако этот вопрос требует специальных исследований.

### Выводы

1. Проседание грунта в траншее под магистральным трубопроводом на длине  $20...30 \text{ м}$  является источником дополнительных номинальных осевых напряжений в стенке трубы, которые существенно повышают склонность к образованию коррозионных трещин под напряжением в зоне кольцевых соединений по сравнению с продольными.

2. Подходы механики разрушения тел с трещинами и наличие соответствующих диаграмм статической коррозионной трещиностойкости позволяют достаточно глубоко анализировать процесс кинетики развития указанных дефектов во времени, что имеет большое значение для прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации магистральных трубопроводов.

1. Андрейків О. Є., Кушнір Р. М., Цирульник О. Т. Визначення залишкового ресурсу труби нафтопроводу з урахуванням наявних дефектів у її стінці і реальних умов експлуатації // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин.— К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2006. — С. 328–331.
2. Махненко В. И., Шекера В. М., Оноприенко Е. М. Определение параметров упрощенной диаграммы статической коррозионной трещиностойкости трубных сталей при почвенной коррозии // Автомат. сварка. — 2008. — № 10. — С. 31–35.
3. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. — Киев: Наук. думка, 2006. — 618 с.
4. Романенко С. В. Анализ причин разрушения магистрального газопровода в поперечном направлении // Газ. пром-сть. — 2008. — № 1. — С. 55–57.
5. Fitness-for-service: Recommended practice 579. — Washington: American Petroleum Institute, 2000. — 625 p.

The paper deals with the conditions of formation of corrosion cracks in the zone of circumferential site and longitudinal shop butt welded joints of the main gas pipelines. Analysis of force conditions and material resistance to stress corrosion cracking initiation and propagation up to spontaneous fracture has been performed for a specific accident case.

Поступила в редакцию 21.11.2008



## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ БУРОВЫХ ДОЛОТ

**В. М. НЕСТЕРЕНКОВ**, д-р техн. наук, **Н. Е. ПРОТОСЕЙ**, канд. техн. наук, **Ю. А. АРХАНГЕЛЬСКИЙ**, инж.  
(Ин-т электросварки им. О. Е. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности ЭЛС буровых долот, применяемых в нефтедобывающей промышленности. Показано, что наилучшее качество сварного шва достигается при использовании эллиптической развертки электронного луча при отношении осей 2:1 и максимальной амплитуде равной двум радиусам сосредоточенности электронного пучка. Для улучшения качества сварного шва в подшарошечной части буровых долот рекомендовано использовать вставки из модифицирующих материалов в виде фольги толщиной до 0,2 мм.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, шарошечные долота, закаливающиеся стали, парогазовый канал, сквозное проплавление, сканирование электронного луча, модифицирующий материал

Для бурения нефтяных и газовых скважин применяются шарошечные долота, являющиеся основным инструментом высокоскоростного бурения земных пород. В настоящее время общий объем шарошечного бурения достигает десятков миллионов метров в год и требуется дальнейшее многократное повышение этого объема. В связи с этим актуальное значение приобретает проблема совершенствования существующего инструмента. Шарошечные долота работают в жестких условиях воздействия высокоабразивной жидкости при высоких статических и динамических нагрузках, поэтому к прочностным и эксплуатационным показателям предъявляются повышенные требования.

Для соединения трех элементов долота в одну конструкцию (рис. 1) в настоящее время широко используют электронно-лучевую сварку (ЭЛС). Этот способ обеспечивает минимальные деформации долот при наименьшем термическом воздействии на узлы шарошечных подшипников. Однако традиционные материалы в первую очередь стали 14ХН3А и 20ХН3А, которые применяются в конструкции буровых долот, имеют ограниченную свариваемость и свойства металла сварных соединений на этих сталях в ряде случаев не отвечают условиям высокоскоростного бурения. С увеличением размеров долот и одновременно свариваемых толщин повышается вероятность образования мелких трещин в сварных соединениях, которые приводят к нарушению их гидроплотности и снижению срока эксплуатации.

С целью повышения эксплуатационных характеристик сварных соединений можно либо подбирать другие материалы для изготовления долот, либо модифицировать металл шва. На наш взгляд, второй путь более предпочтителен с точки

зрения возможности получения положительных результатов при относительно небольших затратах. Его можно осуществить, подавая в сварочную ванну легированную присадочную проволоку или применяя фольгу, изготовленную из материала-модификатора, которую можно вставлять в свариваемые стыки долота до сварки. Существуют определенные трудности в подаче присадочной проволоки при сварке швов в подшарошечной области долота и можно ожидать нарушений формирования швов при использовании вставок-модификаторов, которые увеличивают зазор в стыке. Наибольшие трудности для качественного фор-



Рис. 1. Внешний вид трех элементов долота до сборки и сварки (а) и сваренного электронным пучком долота (б)

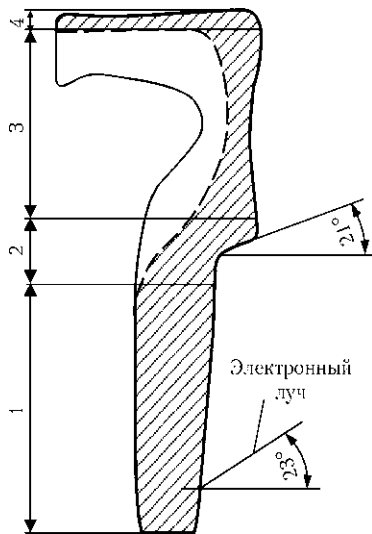


Рис. 2. Схема сечения долота, свариваемого электронным лучом: 1 — ниппельная часть долота; 2 — переход от ниппельной к затылочной; 3 — затылочная; 4 — подшарошечная

мирования представляет участок шва, где электронный луч практически параллелен свариваемому металлу (рис. 2, участок 2).

Из-за конструктивной особенности долота его сварка ведется электронным пучком, расположенным под углом  $23^\circ$  к горизонту. Такой угол позволяет получить требуемую глубину проплавления (на рис. 2 она показана штриховкой) в подшарошечной части долота без разрушения шарошек (см. рис. 1). Согласно техническим условиям на буровые долота ниппельная часть долот должна быть сварена с полным проплавлением и с формированием обратного валика. При переходе к затылочной части глубина проплавления снижается и составляет примерно  $1/3$  толщины свариваемых заготовок. Такое же соотношение глубины проплавления к толщине изделий сохраняется и на подшарошечной части долота. В то же время наличие уступа при переходе от ниппельной к затылочной части долота резко ухудшает условия формирования шва, так как направление силы тяжести и динамического напора паров сварочной ванны совпадают в этой области, что приводит к вытеканию жидкого металла из ванны и образованию крупных дефектов в шве. Задача получения качественного формирования шва значительно усложняется в связи с тем, что при переходе от ниппельной части долота к затылочной требуемая глубина проплавления уменьшается от полного проплавления на всю толщину свариваемых заготовок до частичного, на глубину, равную  $1/3$  толщины свариваемой заготовки. И если при сквозном проплавлении выход паров происходит в обе стороны парогазового канала, то при частичном проплавлении выход паров со стороны корня шва закрывается, давление паров в канале повышается и изменяются условия формирования шва. В рассматриваемом случае при прохождении

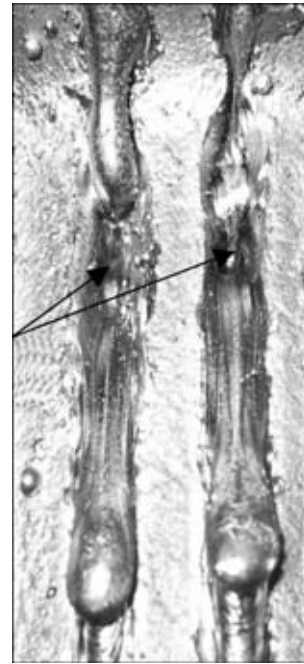


Рис. 3. Выплески металла ванны (отмечено стрелками) при ЭЛС уступа на затылочной части долота

электронным пучком уступа на затылочной части долота парогазовый канал в определенный момент времени открывается снизу и повышенное давление паров, характерное для несквозного проплавления, способствует вытеканию металла из сварочной ванны (рис. 3). Таким образом существует необходимость более детального рассмотрения технологических особенностей ЭЛС буровых долот с учетом формирования шва на проблемных участках, обеспечения стабильности производства и повышения эксплуатационных характеристик.

#### Особенности режима ЭЛС буровых долот.

Сложный профиль проплавления компонентов долота, резко меняющийся угол встречи электронного пучка с поверхностью свариваемого металла определяют трудности составления программы режима ЭЛС. Так, для обеспечения геометрии проплавления ниппельной части долота необходимо использовать погонную энергию сварки  $22,5$  кДж/см, в то время как для сварки подшарошечного участка требуется  $15$  кДж/см. В процессе исследований установлено, что наряду с определением требуемых погонной энергии и положения фокуса пучка относительно поверхности изделия, необходимо определить и режим технологических колебаний электронного пучка. Сварка статическим пучком не позволяла получить требуемую воспроизводимость геометрии и качества сварных соединений.

Проведенные ранее исследования [1] показали высокую эффективность использования колебаний пучка в технологии ЭЛС. В данной работе установлено, что применение продольной или по-



перечной развертки электронного луча в случае ЭЛС буровых долот наклонным пучком на «подъем» не способствует стабильности протекания сварочного процесса, поскольку при продольной развертке возбуждаются колебания расплава в плоскости сварки параллельно движению электронного луча. Это приводит к вытеканию расплавленного металла из сварочной ванны и, как следствие, к нарушению стабильности сварочного процесса. При поперечной развертке электронного пучка парогазовый канал увеличивается в диаметре, что также способствует вытеканию расплава из канала и образованию дефектов в сварном шве (рис. 4). Таким образом, при ЭЛС изделий с вертикальной ориентацией сварного шва использование разверток данной конфигурации представляется нецелесообразным.

В то же время применение круговой развертки с радиусом немного больше радиуса сосредоточенности электронного пучка  $R$  ( $r \geq R$ ) позволяет капиллярным силам удерживать расплав в парогазовом канале, не допуская его вытекания. Однако при круговой развертке существует еще одна проблема — неустойчивость парогазового канала по отношению к аксиально-симметричным колебаниям расплава на стенках канала.

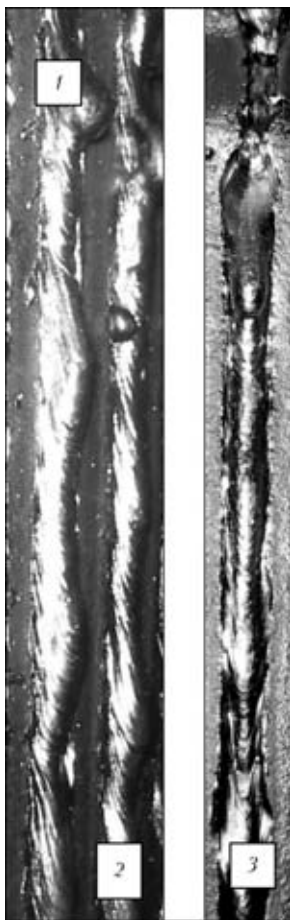


Рис. 4. Неравномерность формирования швов при использовании поперечной (участок 1), продольной (2) и круговой (3) развертки пучка

Вследствие симметрии задачи, обусловленной формой развертки, круговая развертка электронного луча может возбуждать нулевую моду ( $m = 0$ ) колебаний расплава, соответствующую аксиально-симметричным колебаниям внутренней поверхности парогазового канала типа перетяжек и растяжений. В частности, частота нулевой моды колебаний расплава в парогазовом канале  $\omega_0(k)$  определяется согласно дисперсионному соотношению из работы [2]:

$$\omega_0^2(k) = \frac{\sigma}{\rho} \frac{k}{R^2} (k^2 R^2 - 1) C_0(k), \quad (1)$$

где  $k$  — волновой вектор колебаний;  $\sigma$ ,  $\rho$  — соответственно коэффициент поверхностного натяжения и плотность расплавленного металла;  $C_0(k)$  — коэффициент, зависящий от волнового вектора и размеров парогазового канала.

Для сквозного парогазового канала, формируемого на участке 1 (рис. 2) бурового долота, длина волны колебаний расплава равна глубине канала, которая на данном участке меняется примерно от 25 до 30 мм. Следовательно, волновой вектор колебаний  $k = 2\pi/H$  меняется от 2,5 до 2 см<sup>-1</sup>. Для радиуса канала 1...1,5 мм, который образуется при сварке ниппельной части долота, получаем  $kR$  порядка 0,2...0,38, что меньше единицы ( $kR < 1$ ). Это означает, что применение круговой развертки приводит к неустойчивости парогазового канала уже на начальном участке сварки долот.

Как показала практика, подавить неустойчивость парогазового канала удается с помощью комбинированной развертки электронного луча, обеспечивающей его сканирование одновременно вдоль двух осей  $X$  и  $Y$  — параллельно и перпендикулярно направлению сварки. Мгновенное распределение мощности электронного пучка  $q(r, t)$  в проекции на плоскость  $XY$  (перпендикулярно электронному лучу) имеет следующий вид [2]:

$$q(r, t) = q_0 \exp\left(-\frac{r(t)^2}{R^2}\right) = q_0 \exp\left(-\frac{|\mathbf{r}_{xy} - \mathbf{r}_e(t)|^2}{R^2}\right), \quad (2)$$

где  $q_0$  — максимальная мощность на оси электронного пучка;  $\mathbf{r}_{xy}$ ,  $\mathbf{r}_e$  — соответственно текущий радиус-вектор в плоскости  $XY$  и мгновенный радиус-вектор оси электронного пучка (в формуле (2) было использовано векторное равенство  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_{xy} - \mathbf{r}_e$ ).

Очевидно, что для достаточно больших частот сканирования электронного пучка усреднение величины  $q(x, y, t)$  по периоду  $T$  позволяет заменить временную зависимость пространственной. Иными словами, можно рассматривать процесс сканирования электронного луча как пространственное рассредоточение пучка, приводящее к уменьшению его пиковой мощности.

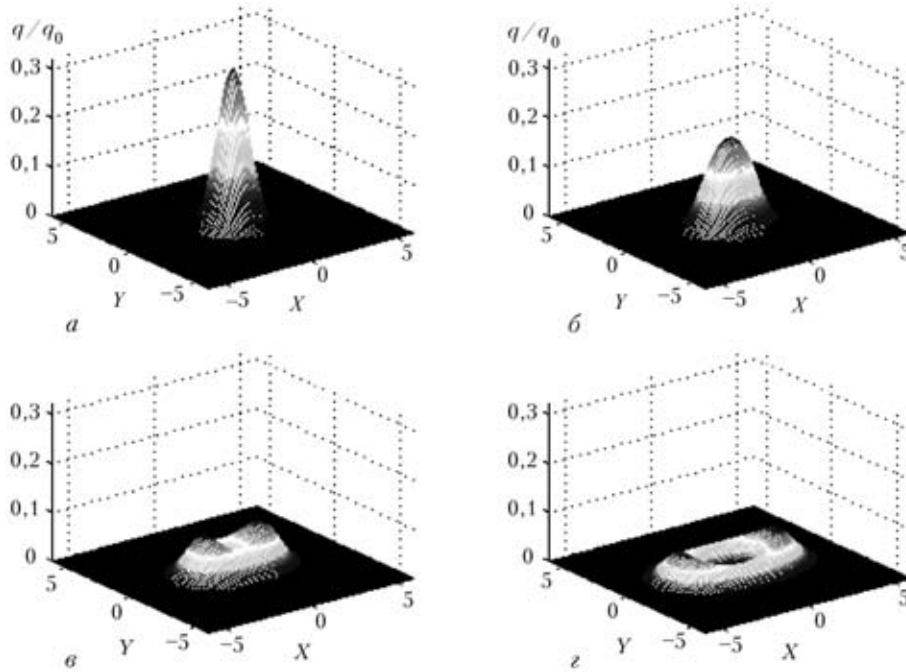


Рис. 5. Распределение нормированной плотности мощности электронного пучка  $q/q_0$  при использовании комбинированной развертки электронного луча:  $X(t) = A \cos \omega t$  и  $Y(t) = B \cos \omega t$  при различных амплитудах сканирования:  $a$  — 0;  $б$  —  $1R$ ;  $в$  —  $2R$ ;  $г$  —  $3R$

Так, для двух периодических функций  $f(t) = f(t + T_1)$  и  $g(t) = g(t + T_2)$  произвольного вида, описывающих сканирование электронного пучка (с гауссовым распределением) вдоль двух взаимно перпендикулярных осей  $X$  и  $Y$ , усредненную по периоду мощность пучка  $\langle I(x, y) \rangle$  можно записать в следующем виде:

$$\langle I(x, y) \rangle = \frac{I_0}{T} \int_0^T \exp \left\{ -\frac{(x + f(t))^2 + (y + g(t))^2}{R^2} \right\} dt, \quad (3)$$

где  $I_0$  — пиковая мощность пучка;  $T$  — наименьший общий период функций  $f(t)$  и  $g(t)$ .

Таким образом, формула (3) для произвольных функций  $f(t)$  и  $g(t)$  позволяет избавляться от временной зависимости, заменив ее на пространственную.

В случае применения развертки пучка по эллипсу функции  $f(t)$  и  $g(t)$  можно представить в виде:  $X(t) = A \cos \omega t$  и  $Y(t) = B \sin \omega t$ , где  $\omega$  — частота развертки электронного пучка;  $A$ ,  $B$  — соответственно амплитуды сканирования электронного луча вдоль осей  $X$  и  $Y$ . Для такой развертки на рис. 5 представлено пространственное распределение усредненной по периоду нормированной плотности мощности двумерного электронного пучка, рассчитанное для различных амплитуд сканирования  $A = (0..3)R$  при фиксированном отношении амплитуд  $A/B = 2:1$ .

Главная ось направлена вдоль оси  $X$ . Все распределения мощности на рисунке нормированы таким образом, чтобы объем под каждой из двумерных поверхностей был равен единице:

$\int q(x, y) dx dy / q_0 = 1$ , а расстояния измеряются в радиусах сосредоточенности электронного пучка  $R$ .

Статический электронный пучок, изображенный на рис. 5,  $a$ , имеет гауссово распределение плотности мощности. Из рисунка видно, что с увеличением амплитуды сканирования происходит перераспределение мощности электронного пучка вдоль оси  $X$  и он перестает быть гауссовым. Наряду с этим падает и максимальная плотность мощности пучка, которая при  $A = 3R$  составляет порядка 25 % пиковой мощности статического электронного пучка.

Как видно из рисунка, при небольших амплитудах сканирования ( $A \leq 2R$ ) распределение мощности электронного пучка незначительно отличается от аналогичного распределения мощности при использовании одномерной косинусоидальной развертки вдоль оси  $X$ . Однако, начиная с амплитуд сканирования  $3R$  и выше ( $A \geq 3R$ ), распределение мощности принимает четко выраженную форму овала (или эллипса) с провалом в центральной его части.

Эксперименты показали, что использование овальной развертки электронного луча с амплитудой сканирования  $A \geq 3R$  приводит к нарушению стабильности сварочного процесса и, как следствие, к появлению различного рода дефектов в сварных швах буровых долот. Наилучшее качество сварного шва достигнуто при небольших амплитудах сканирования пучка ( $A = 2R$ ,  $B = R$  и  $B/A = 1/2$ ), т. е. при таких амплитудах, когда провал в центре распределения мощности еще не проявляется.



Ввиду симметрии, эллиптическая развертка соответствует второй моде колебаний ( $m = 2$ ) расплава в парогазовом канале, которая отвечает попеременному сжатию и растяжению канала вдоль двух взаимно перпендикулярных направлений (рис. 6). Поэтому при использовании эллиптической развертки электронного луча в парогазовом канале возбуждается устойчивая вторая мода колебаний ( $m = 2$ ), подавляя при этом как неустойчивую нулевую моду ( $m = 0$ ), так и первую моду колебаний ( $m = 1$ ), соответствующую продольным смещениям расплава. Колебания второй моды расплава в парогазовом канале осуществляются на более высоких частотах, чем первой или нулевой моды колебаний жидкого металла. Согласно данным работы [2], дисперсионное соотношение для второй моды колебаний имеет следующий вид:

$$\omega_2^2 = \frac{\sigma}{\rho} \frac{k}{R^2} (k^2 R^2 + 3) C_2, \quad (4)$$

где  $C_2$  — коэффициент, зависящий от волнового вектора и размеров парогазового канала, определяется по следующей формуле:

$$C_2(k) = \frac{[K'_2(kR_1) I_2(kR_2) - I'_2(kR_1) K_2(kR_2)]}{[I_2(kR_1) K'_2(kR_2) - K_2(kR_1) I'_2(kR_2)]}, \quad (5)$$

где  $R_1, R_2$  — соответственно внутренний и внешний радиусы канала;  $I_2, K_2$  — модифицированные функции Бесселя 1, 2-го рода;  $I'_2, K'_2$  — соответствующие производные от этих функций по их аргументу.

Для сквозного канала глубиной  $H = 3$  см соответственно с внутренним и внешним радиусами  $R = 0,08$  и  $0,12$  см коэффициент  $C_2$  для первой гармоники колебаний примерно равен  $C_2 \approx 32$ . Тогда собственная частота второй моды колебаний составляет порядка  $\omega_2 \approx 1230$  рад/с, что соответствует частотам развертки  $f \approx 195$  Гц. На практике частота развертки выбирается больше —  $f \approx 200 \dots 300$  Гц для уменьшения амплитуды резонансных колебаний расплава в парогазовом канале.

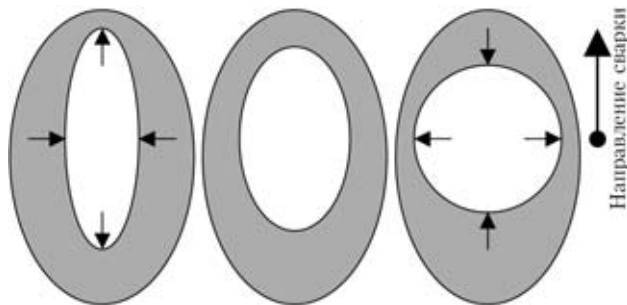


Рис. 6. Вторая мода колебаний расплава ( $m = 2$ ) в парогазовом канале (стрелками указано направление сжатия и растяжения расплавленного металла в канале)

**Капиллярный эффект при ЭЛС стыков с зазорами.** Как упоминалось выше, угол наклона электронного пучка к поверхности свариваемого изделия должен оставаться постоянным на протяжении всего сварочного процесса, чтобы не повредить шарошки бурового долота. При этом появляются определенные сложности в формировании сварного шва в подшарошечной части сварного шва. Так, на горизонтальном участке шва образуются микротрещины из-за неполного провара, обусловленного малым углом наклона электронного луча к поверхности долота (около  $23^\circ$ ).

Для повышения эксплуатационных характеристик сварных соединений и устранения дефектов в подшарошечном участке шва использовали Г-образные вставки из материала-модификатора в виде фольги из нержавеющей стали или титана, которые помещали в стыках долота. Наличие вставок из фольги приводит к образованию зазора между составными частями долота по всей длине стыка. Образовавшийся зазор накладывает дополнительные трудности при формировании сварного шва. Как показали эксперименты, слишком большой зазор приводит к вытеканию жидкого металла и, как следствие, к образованию дефектов в сварном шве. В то же время малый зазор не влияет на формирование шва, но эффект модификации при применении тонкой фольги сводится к нулю. Очевидно, для правильного выбора толщины вставок материала-модификатора необходимо провести оценку максимально допустимого зазора, при котором металл не вытекает из ванны и, следовательно, не нарушается стабильность сварочного процесса.

Для оценки зазора можно использовать известную задачу из гидродинамики о капиллярном поднятии жидкости между двумя параллельными пластинами, расположенными на некотором расстоянии  $d < a$ , где  $a$  — капиллярная постоянная вещества [3]. Как известно, капиллярная постоянная определяется по формуле

$$a = \sqrt{2\sigma/\rho g}, \quad (6)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести.

Для стали ( $\sigma = 1500 \cdot 10^{-5}$  Н/см,  $\rho = 7,8$  г/см<sup>3</sup>) капиллярная постоянная  $a = 0,63$  см. Следовательно, парогазовый канал радиусом  $R = 1 \dots 2$  мм, образующийся при ЭЛС металлов, представляет собой капилляр, в котором капиллярные силы оказывают большое влияние на течение расплавленного металла по стенкам канала. Более того, в зазоре между сегментами долота, размер которого меньше диаметра парогазового канала, капиллярный эффект может проявляться еще более выражено, чем в самом канале.

Согласно данным работы [3] для пластин, погруженных в смачиваемую жидкость, высота стол-





ба поднятия жидкости между пластинами  $Z_0$  и высота капиллярного пристеночного слоя жидкости  $Z_1$  могут быть определены из следующих формул:

$$Z_0 = a \sqrt{A - 1}, \quad Z_1 = a \sqrt{A_\sigma - \sin \theta}, \quad (7)$$

где  $\theta$  — угол смачивания;  $A_\sigma$  — коэффициент, который определяется по формуле

$$A_\sigma = \frac{a^2}{d^2} \cos \theta, \quad (8)$$

где  $d$  — расстояние между пластинами.

Когда расстояние между пластинами много меньше, чем капиллярная постоянная жидкости ( $d \ll a$ ), то  $A_\sigma \gg 1$  и, следовательно, высоты поднятия жидкости  $Z_0$  и  $Z_1$  являются величинами одного порядка:

$$Z_0 \approx Z_1 = \frac{a^2}{d} \cos \theta. \quad (9)$$

Для расплава на поверхности металла угол смачивания практически равен нулю (полное смачивание), поэтому выполняется условие  $\cos \theta \approx 1$ . Например, при зазоре 0,3 мм формула (9) дает высоту поднятия расплава до  $Z_0 \approx 4$  мм.

На практике расплавленный металл в ходе сварочного процесса не может подниматься на такую большую высоту в узком зазоре, так как он будет непременно охлаждаться боковыми стенками и застывать в пространстве зазора. Поэтому формула (9) дает несколько завышенную оценку для высоты поднятия расплава в зазоре стыков долот.

В общем случае задача капиллярного подъема расплава в зазоре с учетом его охлаждения на стенках зазора не имеет точного решения и должна решаться численными методами. Подобное решение является крайне громоздким и лежит за пределами рассмотрения настоящей статьи. Оценку максимально допустимого зазора, при котором не нарушается стабильность сварочного процесса, можно провести исходя из следующих физических соображений. Очевидно, что наличие зазора приводит к уменьшению количества металла, участвующего в формировании сварного шва. При малом зазоре данный эффект практически не сказывается на формировании шва, однако с увеличением зазора начинает нарушаться баланс переноса вещества на передней стенке парогазового канала. Кроме того, при достаточно большом зазоре происходит капиллярное втягивание расплава в зазор, что приводит к дополнительному уменьшению количества расплава, текущего по стенкам парогазового канала. Очевидно, что это приводит к еще более сильному нарушению баланса переноса массы металла в ходе сварочного процесса. В данной концепции характерным раз-

мером для оценки допустимой толщины зазора может служить толщина слоя расплава на передней стенке парогазового канала. Для сохранения баланса металла необходимо, чтобы зазор  $d$  не превышал толщину слоя расплава  $D$  ( $d < D$ ). Исходя из анализа макрошлифов продольных сечений швов толщина слоя расплава на передней стенке канала может лежать в пределах 0,2...0,4 мм. Эксперименты показали, что удовлетворительное качество сварных швов достигается при зазоре 0,1...0,2 мм, что хорошо согласуется с проведенной выше оценкой.

Как отмечалось выше, одной из особенностей ЭЛС буровых долот является прохождение электронным пучком затылочной области долота, где имеется выступ более 1 см. При ЭЛС вертикальных стыков столб расплава в зазоре удерживается за счет лапласова давления в зазоре  $P_L$ , а также за счет давления газа и паров металла в парогазовом канале  $P_V$  и давления отдачи на передней стенке канала  $P_R$  (рис. 7). Поэтому при ЭЛС ниппельной части долота даже при наличии зазора в стыках вытекания расплава из сварочной ванны не происходит.

При прохождении ступенчатого участка 2 парогазовый канал открывается в верхней части, и, следовательно, давление  $P_V$  исчезает. В результате равновесие столба расплава нарушается, и как следствие, может происходить затекание избыточного расплавленного металла со ступеньки под электронный пучок. Для устранения эффекта затекания при подходе сварочного луча к затылочной области необходимо обеспечить условия ламинарного течения жидкого металла в канале проплавления. С этой целью следует, в первую очередь, плавно уменьшить на рассматриваемом участке скорость сварки, что и делается в технологическом цикле ЭЛС буровых долот.

**Экспериментальные результаты.** На рис. 8, а четко видна трещина, образовавшаяся в сварном шве, который получен при ЭЛС без материала-модификатора. Использование материала-модификатора позволяет избежать появления трещин в сварных швах (рис. 8, б), что повышает эксплуатационные характеристики свариваемого изделия. Сварку выполняли при использовании развертки электронного пучка по эллипсу с частотой 300 Гц и соотношением осей эллипса 2:1 (мм). Такая развертка пучка обеспечивает равномерное формирование шва по всей длине (см. рис. 1, б).

В данной работе применяли модификаторы в виде пластинок из титана или нержавеющей стали 10X18H10T толщиной 0,2 мм. Ширина и длина пластинок зависела от типа свариваемых долот и могла изменяться в пределах 15...20 мм по ширине и 45...70 мм по длине. Такие вставки не нарушают формирования швов, не требуют перделки существующего электронно-лучевого

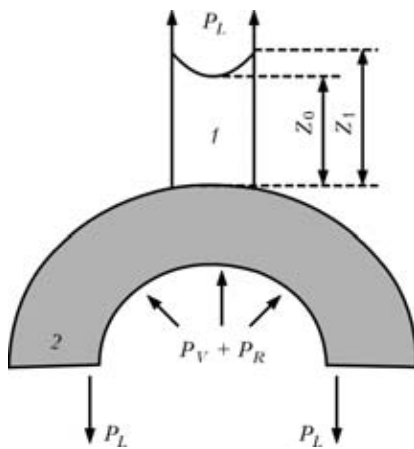


Рис. 7. Схема капиллярного поднятия расплава в зазоре между сегментами буровых долот (1) и расплав на передней стенке парогазового канала (2)

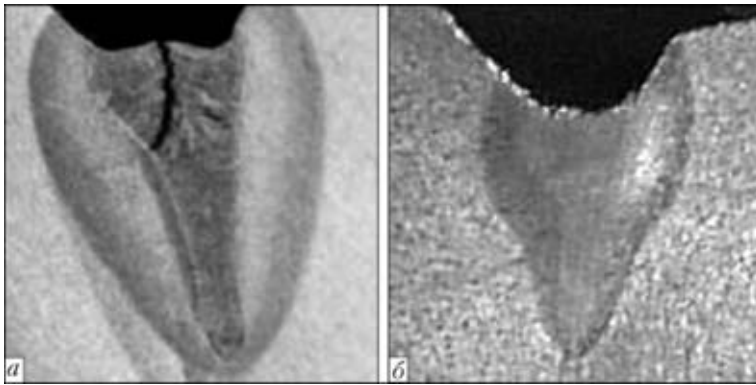


Рис. 8. Макрошлифы швов в подшарошечной области бурового долота, сваренных без применения материала-модификатора (а) и с использованием фольги из нержавеющей стали (б)

оборудования и приспособлений для сборки и сварки и не создают препятствий при автоматическом слежении за стыками во время ЭЛС.

Материал-модификатор вставляется в три подшарошечные стыки и в стыки затылочной части долота, где наиболее вероятно возникновение трещины.

Для изучения влияния модификаторов на свойства сварных соединений проводили металлографические исследования структур на микроскопе «Неорhot-32». Установлено, что при термическом цикле, характерном для ЭЛС, превращение аустенита металла шва и участка перегрева металла ЗТВ происходит в бейнитной и мартенситной областях. При этом выявляется характерное дендритное строение сварного шва с направ-

лением роста кристаллитов от линии сплавления к центру шва. Именно в этих местах наиболее часто возникают кристаллизационные трещины размером 0,5...0,7 мм.

Микроструктура металла шва и участка перегрева металла ЗТВ представляют собой смесь бейнита и низкоотпущенного мартенсита и имеют одинаковую твердость ( $HV\ 418$ ), что немного выше твердости основного металла ( $HV\ 385...396$ ). На участке перегрева происходит незначительный рост зерна (рис. 9, а).

Сравнительный анализ структур сварных швов, выполненных без модификаторов и после их введения в сварочную ванну, показывает, что во втором случае происходит измельчение зерна при кристаллизации металла шва (рис. 9, б). При этом твердость металла шва уменьшается до  $HV\ 280...300$ . Твердость околошовной зоны сохраняется на уровне твердости зоны швов, выполненных без модификатора.

В связи с изменением размера зерна металла шва при титановой вставке ожидалось повышение стойкости сварных швов против образования кристаллизационных трещин. Однако при дальнейшем изучении микроструктур швов с титановыми вставками установлено, что в средней части литой зоны часто возникают кристаллизационные трещины. Общий вид таких трещин представлен на рис. 9, в. Трещины располагаются по границам первичных зерен по линии встречи столбчатых кристаллитов.

Микрорентгеноспектральный анализ соединений с титановой вставкой показал наличие значительного количества включений в виде карбидов титана как по сечению сварного шва, так и на границе сплавления с основным металлом. При этом в эвтектике шва находится 2...3 % титана, в то время как в составе включений — 10...11 %. По-видимому, такое неравномерное распределение включений и является причиной снижения прочностных характеристик шва.

При анализе структур сварных соединений, выполненных после введения вставок из нержавеющей стали 10X18H10T, установлено измельчение зерна в структуре шва, аналогичное швам с титаном, но без трещин. Микрорентгеноспектральный анализ показывает, что распределение

**Механические свойства сварных соединений буровых долот**

Тип соединения	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\alpha_H$ , Дж/см <sup>2</sup>
Сталь 14ХНЗА	960	822	8,1	49,2	74,31
Сварное соединение без модификатора	862	—	—	—	84,45
Сварное соединение со вставкой титана толщиной 0,2 мм	690,3	—	—	—	12,10
Сварное соединение со вставкой 10X18H10T толщиной 0,2 мм	918	—	—	—	51,35

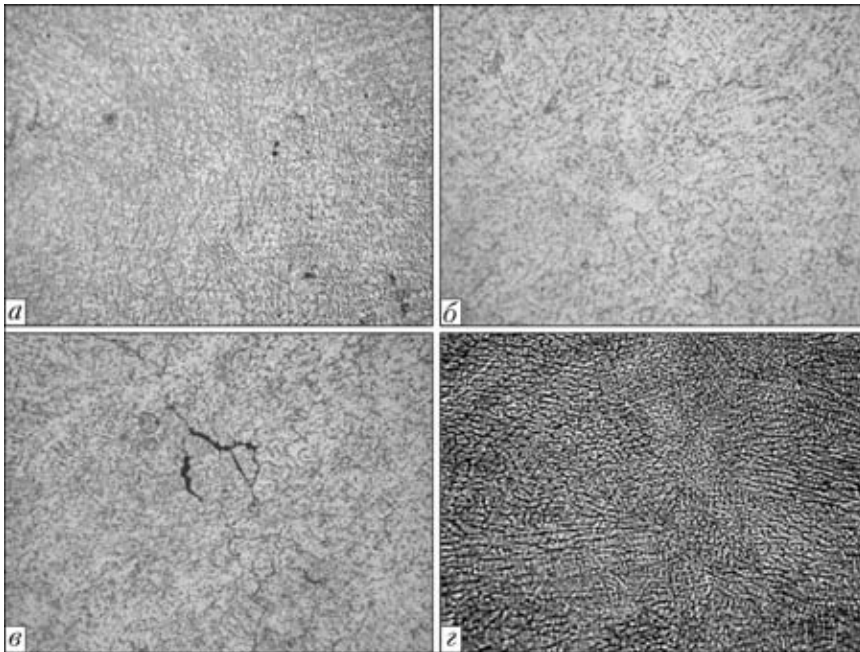


Рис. 9. Микроструктуры (X320) центральной части металла шва, сваренного без модификатора (а), со вставками титана (б) и стали 10X18H10T (с); трещина при модифицировании титаном (д)

модифицирующих элементов в шве намного равномернее по сравнению с распределением при использовании титана (рис. 9, в).

Проведенные механические испытания сварных соединений буровых долот, обобщенные результаты которых приведены в таблице, показывают, что при использовании титана в качестве модификатора показатели прочности и особенно ударной вязкости металла шва резко ухудшаются. Это обусловлено образованием большого количества карбидов титана в металле шва. Все разрывные образцы разрушаются по шву, ударные образцы разрушаются хрупко.

При вставке фольги из стали 10X18H10T разрыв происходит по участку металла ЗТВ разрушение ударных образцов — вязкое.

Механические свойства сварных соединений со вставкой из стали 10X18H10T значительно превышают свойства сварных соединений с титано-

вой вставкой и по прочности приближаются к свойствам основного металла.

В заключение следует отметить, что в работе исследовано влияние формы развертки электронного луча и капиллярного эффекта в зазоре между сегментами буровых долот сложной конфигурации на качество сварного шва при ЭЛС с переменной скоростью движения электронного луча на вертикальной плоскости. Показано, что применение комбинированной развертки электронного луча одновременно вдоль двух осей X и Y (параллельно и перпендикулярно направлению ЭЛС при отношении амплитуд сканирования 2:1 соответственно) в диапазоне частот  $f = 250 \dots 300$  Гц позволяет уменьшить возмущения

поверхности расплава в парогазовом канале, и, как следствие, добиться существенного улучшения качества сварных швов буровых долот. Установлено, что использование материала-модификатора в виде фольги из нержавеющей стали толщиной до 0,2 мм позволяет избежать появления трещин в сварных швах, что улучшает эксплуатационные характеристики свариваемых изделий.

Полученные теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

1. *Электронно-лучевая сварка* / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
2. *Нестеренков В. М.* Особенности капиллярных волн в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке металлов большой толщины // *Автомат. сварка.* — 2003. — № 4. — С. 8–13.
3. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Гидродинамика. — М.: Наука, 1986. — 736 с.

Peculiarities of EB welded drill bits used in oil production industry are considered. It is shown that the best quality of the weld can be achieved by using an elliptical scan of the electron beam at the ratio of axes equal to 2:1 and at the maximal amplitude equal to two radii of concentration of the electron beam. It is recommended to use an insert of metals-modifiers in the form of foil up to 0.2 mm thick to improve quality of the weld in the under-rolling cutter part of the drill bits.

Поступила в редакцию 13.01.2009



## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ ИЗ ПОЛИМЕРОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ СПОСОБОМ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ПОД УГЛОМ

Е. С. НИКОНОВА, инж., Н. Г. КОРАБ, канд. техн. наук, В. Ю. КОНДРАТЕНКО, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрено напряженно-деформированное состояние сварных стыковых соединений, выполненных под разными углами, и рассчитано распределение эквивалентных напряжений по сечению сварного шва. Определены диапазоны углов относительно нижней образующей при стыковой сварке, в границах которых необходимо установить дополнительные прижимающие устройства, чтобы нивелировать существующий перепад напряжений в сварном шве. Найдено новое технологическое решение в виде устройства для сварки труб из термопластов, на которое получен патент Украины.

*Ключевые слова:* полимерные изделия, сварные соединения, стыковая сварка, соединительные детали, прочность сварной конструкции, исследования напряженно-деформированного состояния, устройство для сварки труб из термопластов

В настоящее время для соединения труб из полимерных материалов используют три основных способа сварки: терморезисторную, сварку нагретым инструментом встык и вращающуюся сварку. Сварку нагретым инструментом вращающуюся в основном применяют для соединения труб малого диаметра, например, при монтаже систем водо- и газоснабжения, отопления и т. д. Для соединения труб наружным диаметром более 63 мм, как правило, используют терморезисторную или стыковую сварку. При этом даже поверхностный сравнительный анализ показывает очевидные преимущества использования стыковой сварки: отсутствие необходимости в дополнительных соединительных деталях, простоту выполнения сварки и высокую надежность получаемых сварных соединений. Кроме того, стоимость терморезисторных соединительных деталей сравнительно высока и с увеличением диаметра трубопровода цена на такие детали пропорционально возрастает. Ранее весомым аргументом в пользу терморезисторной сварки была минимизация так называемого человеческого фактора и, как следствие, более высокое качество получаемых сварных швов. Однако в настоящее время с появлением на территории Украины все большего количества современного автоматизированного сварочного оборудования для стыковой сварки, способного точно контролировать все технологические параметры сварочного процесса, положение резко из-

менилось. Стыковая сварка превратилась в способ, обеспечивающий практически стопроцентное качество получаемых сварных соединений и способный на равных конкурировать с терморезисторной сваркой. С учетом экономических факторов можно утверждать, что для труб диаметром более 160 мм альтернативы стыковой сварке сейчас нет [1, 2].

В то же время существует проблема запрета на территории Украины использования сварных соединительных деталей при строительстве газопроводов — вместо них используют более дорогие литые соединительные детали (при строительстве систем водоснабжения, водоотвода и канализации таких ограничений нет).

Ранее считалось, что сварные швы при изготовлении соединительных деталей всегда уменьшают прочность конструкции в целом. При этом даже вводили специальные понижающие коэффициенты, а при расчетах принималось, что прочность сварной конструкции составляет от 30 до 70 % прочности основного материала без сварных швов. В настоящее время при проектировании полимерных трубопроводов существует практика введения коэффициента уменьшения прочности сварного соединения, изготовления сварных соединительных деталей из труб с большей толщиной стенки, чем в трубопроводе. Все это обусловлено в первую очередь непониманием и игнорированием особенностей строения и образования сварных соединений из полимеров [3, 4].

На данный момент практически отсутствуют исследовательские работы и публикации, касающиеся соединительных деталей для полимерных трубопроводов, сваренных стыковой сваркой под



углом. Сварочное оборудование для производства таких деталей преимущественно импортное и имеет ряд недостатков, основным из которых является невозможность технологически нивелировать перепад напряжений на торцах труб, которые образуют стык при сварке под углом [5]. Это может привести к получению некачественного сварного соединения. Отсутствует также нормативная база, касающаяся возможности использования таких деталей при строительстве, которая бы учитывала особенности современных полимерных материалов и современные представления об их структуре. Учитывая отмеченное выше, был поставлен ряд экспериментов и выполнены эмпирические расчеты по исследованию напряженно-деформированного состояния сварных соединений полиэтилена способом стыковой сварки под углом.

Для исследования напряженно-деформированного состояния сварного полимерного соединения выбрали расчетную систему APROX, поскольку комплекс ориентирован на исследования напряженно-деформированного состояния разнообразных систем и конструкций в физически и геометрически нелинейных постановках, которые находятся под действием статической и динамической нагрузки. С его помощью можно исследовать в классической и уточненной постановках такие характерные особенности работы конструкций и систем, как большие перемещения, процесс пластической деформации слоев материала конструкции, зарождение и развитие трещин как по толщине, так и в плане конструкции при силовой, стационарной и нестационарной динамической нагрузке, определение спектра собственных форм и частот колебаний системы.

Расчетная система APROX построена на использовании метода конечных элементов, по которому затруднительно определять погрешность расчетов, поэтому для оценки последней использовали метод тестовых задач. Значения, полученные при решении такой тестовой задачи с помощью системы APROX, отличаются от аналитических, полученных при помощи классических формул сопротивления материалов, меньше чем на 5 %, что свидетельствует об эффективности и точности выбранного численного метода решения данной задачи [6].

В системе APROX был смоделирован процесс стыковой сварки под углом полимерных труб, имеющих сварные швы. Эта модель реализует максимально приближенные технологические условия получения сварных соединительных деталей из полимерных труб (типа тройник, отвод сегментный односекторный и многосекторный) способом стыковой сварки.

Для задания параметров в системе APROX использовали следующие расчетные данные (рис. 1):  $D_1 = 110$  мм — наружный диаметр трубы;

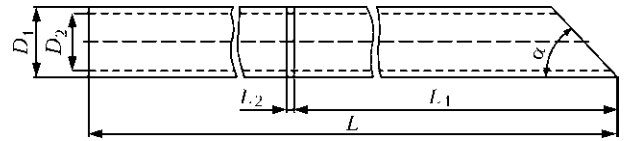


Рис. 1. Схема модельного образца полимерной трубы, сваренного с использованием процесса стыковой сварки

$D_2 = 90$  мм — внутренний диаметр трубы;  $L_1 = 600$  мм — длина сегмента трубы;  $L_2 = 10$  мм — длина сварного шва;  $L = 2000$  мм — общая длина трубы;  $2\alpha = 30, 45, 60, 90^\circ$  — соответственно угол сварки сегментов полимерных труб при производстве соединительных деталей (размеры и углы сварки выбраны по данным типовых размеров основных соединительных деталей, приведенных фирмой «Barbara Kaczmarek» (Польша)). Материал трубы — полиэтилен высокого давления марки ПЕ80; модуль Юнга  $E = 690$  МПа; коэффициент Пуассона  $k = 0,35$ .

К трубе приложена осевая нагрузка  $0,147$  МПа с торца. Срезанная под углом  $\alpha$  часть трубы считалась закрепленной по всем направлениям.

Результаты расчета в системе APROX поставленной задачи представлены в таблице, из которой видно, что расчетный перепад распределения напряжений по сечению составляет от 15 до 55 %. Это свидетельствует прежде всего о том, что в разных точках сварного шва прочность будет разной. При этом следует отметить, что особый интерес представляет закономерность распределения удельного усилия прижатия по поверхности стыка.

На рис. 2 показаны диапазоны углов перепада напряжений относительно нижней образующей при стыковой сварке, которые одновременно являются диапазонами углов относительно нижней образующей, в границах которых необходимо установить дополнительные прижимающие устройства, чтобы нивелировать существующий перепад напряжений:  $65...120^\circ$ ;  $195...225^\circ$ ;  $305...320^\circ$ .

**Результаты расчета напряженно-деформированного состояния сварного полимерного соединения в системе APROX**

Угол сварки сегментов труб $2\alpha$ , град	Эквивалентное напряжение по сечению поверхности сварки $\sigma_{\text{экр}} \cdot 10^3$ , МПа	Диапазон распределения перепада эквивалентных напряжений, град
30	129,8	43...136
	150,5	193...222
	151,7	307...336
45	126,1	242...291
60	0,7282	41...140
90	74,03	65...120
	151,9	283...318
	156,8	199...234

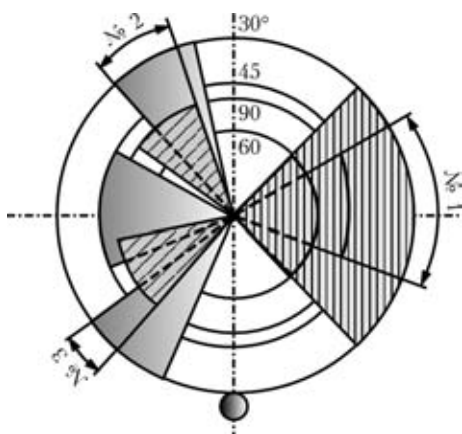


Рис. 2. Диаграмма распределения эквивалентных напряжений по сечению поверхности сварки (диапазоны углов перепада напряжений относительно нижней образующей при стыковой сварке: № 1 — 65...120; № 2 — 195...225; № 3 — 305...320°)

Основываясь на изложенных выше соображениях, разработано новое технологическое решение в виде устройства для сварки труб из термопластов, на которое получен патент Украины на полезную модель [7]. Согласно этому патенту полезная модель относится к области сварки пластмасс, а именно к устройствам для сварки труб из термопластов.

Схема устройства для сварки труб из термопластов приведена на рис. 3.

Для улучшения конструкции необходимо было создание условий равномерного прижатия свариваемых труб путем установки на центратор гидроцилиндров, которые имеют возможность перемещаться в диапазоне углов 65...120, 195...225, 305...320° относительно нижней образующей труб. Поставленная задача решается следующим образом: устройство для сварки труб 6 из термопластов содержит сварочный блок — центратор в виде установленных на направляющие 3 двух плит: подвижной 2 и неподвижной 1, на которых шарнирно закреплены зажимные хомуты 4 со сменными вкладышами (на чертеже не изображены), привод для центровки труб, их перемещения и создания сварочного давления, нагреватель и электронный блок управления, съемные гидроцилиндры 5 установлены на центраторе с возможностью их перемещения в установленном диапазоне углов или их установки на центраторе с первоначально разной длиной. Элементы крепления гидроцилиндров выполнены в виде посадочных отверстий типа «сережка» 7.

Наличие гидроцилиндров, расположенных в указанном диапазоне углов относительно нижней образующей труб, обеспечивает создание условий равномерного прижатия свариваемых труб и, как следствие, приблизительно одинаковую прочность сварного соединения на отдельных участках сварного шва.

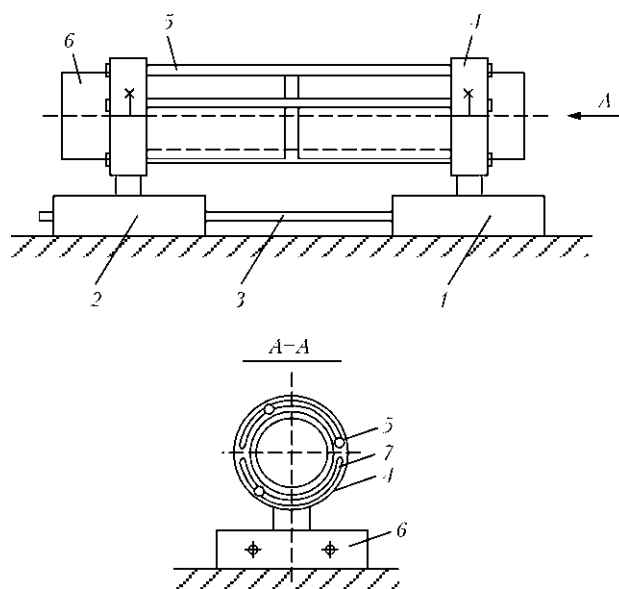


Рис. 3. Схема устройства для сварки труб из термопластов (обозначения см. в тексте)

Использование полезной модели позволяет значительно улучшить качество сварных соединений при стыковой сварке под углом и более широко использовать сварные соединительные детали при строительстве трубопроводов.

## Выводы

1. Литые соединительные детали из полимерных материалов целесообразно заменять сварными, выполненными способом стыковой сварки.

2. Необходим учет напряженно-деформированного состояния сварных стыковых соединений, выполненных под разными углами, диапазона углов относительно нижней образующей при стыковой сварке, в границах которых требуется установка дополнительных прижимающих устройств, чтобы нивелировать существующий перепад напряжений в сварном шве.

3. Разработано новое технологическое решение в виде устройства для сварки труб из термопластов, на которое получен патент Украины на полезную модель.

4. Результаты работы могут найти применение при дальнейшем исследовании прочностных характеристик сварных соединительных деталей и оценке возможностей широкого внедрения таких соединительных деталей в строительство трубопроводов на территории Украины.

1. Esaulenko G. B., Kondratenko V. Y. Morphologie und Eigenschaften von Stumpfschweißungen an polymeren Werkstoffen // Kunststoffschweißen und kleben '92. — Dueßeldorf: DVS-Verlag, 1992. — P. 3-5.
2. Никонова Е. С. Обеспечение эксплуатационной надежности систем трубопроводного транспорта // Сварные швы полимерных материалов как упрочняющий элемент конструкции трубопровода: Материалы IV науч.-практ. семинара, Киев, 11 апр. 2006 г. — Киев: Экотехнология, 2006. — С. 106.



3. *Експериментальні дослідження фізико-механічних властивостей зварних стикових з'єднань полімерних матеріалів та рекомендації щодо оптимізації процесу зварювання* / К. С. Ніконова, В. Ю. Кондратенко, В. В. Гончаренко, І. В. Коваленко // Сварка и родственные процессы в промышленности: Материалы 2-го науч.-техн. семинара, Киев, 17 апр. 2007. — Киев: Экотехнология, 2007. — С. 94.
4. *Рекомендації по расчету и проектированию трубопроводов из термопластов /ЦНИИЭ инженерного оборудования: НПО «Пластик». — М.: Стройиздат, 1985.— 136 с.*
5. *Шестопал А. Н., Минеев Э. А. Справочник по сварке и склеиванию пластмасс* / Под общ. ред. А. Н. Шестопала. — Киев: Техніка, 1986. — 192 с.
6. *САПР. Програмний комплекс АПРОКС в розрахунках машин та апаратів хімічних виробництв* / О. В. Гондляр, О. С. Сахаров, В. І. Сівецький та ін. — К.: ТОВ «Поліграф Консалтинг», 2006. — 136 с.
7. *Пат. 24692 Україна. Устройство для сварки труб из термопластов* / В. В. Гончаренко, И. В. Коваленко, Е. С. Никонова. — Оpubл. 10.07.2007, Бюл. № 10.

The stress-strain state of butt welded joints made at different angles was studied, and distribution of equivalent stresses across the weld section was calculated. The ranges of angles to the lower generating line in butt welding, within which it is necessary to mount additional hold-down devices to level the existing gradient of stresses in the weld, were determined. A new device was designed for welding of thermoplastic pipes. The device is covered by the patent of Ukraine.

Поступила в редакцию 06.11.2008

## УКРАЇНСЬКО-РОСІЙСЬКИЙ, РОСІЙСЬКО-УКРАЇНСЬКИЙ СЛОВНИК ІЗ ЗВАРЮВАННЯ (CD-ROM). — К., Довіра, 2008.

*В рамках проекту «Словники України» Інститутом електросварки ім. Е. О. Патона спільно з Українським мовно-інформаційним фондом НАН України к 90-літтю Національної академії наук України издан «Українсько-російський, російсько-український словник із зварювання» в електронному форматі (CD-ROM).*

*Словарь, имея нормативный характер, содержит более 6,5 тыс. терминов и терминосочетаний, которые отражают основную терминологию по сварочным и родственным технологиям, актуализированную с действующими международными и национальными стандартами по сварке.*

*Словарь предназначен для инженерно-технических работников, студентов и переводчиков технической литературы.*

*Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины вышлет БЕСПЛАТНО «Словарь...» при условии направления заявки с точным указанием Ваших почтовых реквизитов на адрес:*



Киев-150, ул. Боженко, 1, ИЭС им. Е. О. Патона, отдел № 41  
Тел.: 287-62-68, факс: 287-74-57  
E-mail: bernadsky@paton.kiev.ua



## ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОГО ПЛАМЕНИ ПРИ ГАЗОПЛАМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ

**В. Н. КОРЖ**, д-р техн. наук, **Ю. С. ПОПИЛЬ**, канд. техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Обобщены особенности использования водородно-кислородного пламени, полученного в результате сжигания смеси, производимой электролизно-водными генераторами, при газопламенной обработке материалов. Показана возможность регулирования восстановительного потенциала пламени продуктов сгорания по отношению к железу и полной тепловой мощности за счет насыщения смеси углеводородными добавками.

*Ключевые слова:* газопламенное напыление покрытий, водородно-кислородная смесь, струя газа, ламинарное и турбулентное течение, ядро факела, зона догорания, геометрия пламени, распределение температуры, скорость струи

Несмотря на то, что электрические способы сварки плавлением и давлением преобладают в сварочном производстве, газовая сварка, пайка, газотермическая резка и газопламенное напыление покрытий используются также достаточно широко. В связи со все возрастающим дефицитом карбида кальция и углеводородных горючих газов-заменителей ацетилен, пропана, бутана, природного и других газов, возникает проблема поиска альтернативных горючих газов для газопламенной обработки материалов (ГПОМ).

Одним из газов-заменителей ацетилен является водород — экологически чистый и возобновляемый источник энергии. Однако его использование в качестве заменителя ацетилен не получило до настоящего времени широкого распространения в связи с ограниченными данными о технологических возможностях водородно-кислородного пламени (ВКП). Более низкие теплотворная способность и температура пламени водорода по сравнению с ацетилено-кислородным, а также его взрывоопасность и наличие эксплуатационных и транспортных расходов на содержание баллонного хозяйства сдерживали применение этого газа. Появление мобильных электролизно-водных генераторов (ЭВГ), позволяющих получать горючую смесь непосредственно на рабочем месте без расходов на содержание баллонного хозяйства и при существенном снижении транспортных расходов, инициировало проведение исследований возможности использования водорода при ГПОМ.

В настоящей работе обобщены результаты многолетнего труда коллектива сварочного факультета НТУУ «Киевский политехнический ин-

ститут» в области создания новых ресурсосберегающих технологий, в частности, создания и внедрения технологических процессов газопламенной сварки, резки, пайки, нанесения покрытий с заменой ацетилен водородно-кислородной смесью (ВКС), производимой ЭВГ.

Особенностью ВКС является то, что соотношение между объемом кислорода  $V_{O_2}$  и водорода  $V_{H_2}$  в смеси, полученной электролитическим разложением воды  $2H_2O = 2H_2 + O_2$ , постоянное и равно  $\beta = V_{O_2}/V_{H_2} = 0,5$ . При таком соотношении компонентов смеси пламя имеет окислительный потенциал. Для достижения нормального или науглероживающего характера горения пламени предложены устройства [1, 2] в которых происходит разделение ВКС, производимой ЭВГ, на два потока, один из которых остается чистым, а другой проходит через барботер с жидким углеводородным соединением (например, с бензином, спиртом и др.). Оба потока смеси подаются на ниппеля сварочной горелки, характер горения пламени регулируется изменением соотношения этих потоков с помощью соответствующих вентилях горелки.

Исследования состава продуктов горения ВКС проводили на экспериментальной установке Института газа НАН Украины путем отбора проб зондом Грея в ядре факела пламени, на границе ядра и за ядром с учетом фактической температуры газов. В зависимости от состава и расхода исходной горючей смеси возможен рост восстановительного потенциала продуктов горения по сравнению с расплавленным металлом за счет увеличения в них содержания водорода и оксида углерода [3].

Окислительная способность пламени, которая определяется по диаграммам равновесия водорода и оксида углерода с оксидами железа и железом, для нейтрального по отношению к расплавленному в сварочной ванне железу соответствует соотношениям в продуктах горения пламени по во-





дороду (43 об. %  $H_2$  и 57 об. %  $H_2O$ ) и углероду (83 об. %  $CO$  и 17 об. %  $CO_2$ ) [4].

В составе продуктов горения ВКС, производимой ЭВГ, с постоянным соотношением кислорода к водороду в смеси  $\beta = 0,5$ , суммарное содержание водорода  $H_2 + [H]$  в диссоциированных продуктах горения — менее 40 об. %, что подтверждает окислительный характер горения пламени. Добавление к указанным в ВКС паров углеводородных соединений (от общего объема смеси паров бензина около 4...5 %), этилового спирта (более 14...16 %) или ацетона (14...25 %) обеспечивает в диссоциированных продуктах горения суммарное содержание водорода  $H_2 + [H]$  в системе  $H_2 - 45...50$  об. %  $H_2O$  и оксида углерода в  $CO - 84...90$  об. %  $CO_2$ . При таком содержании водорода и оксида углерода в диссоциированных продуктах горения возможно восстановление оксида железа в сварочной ванне. При этом в диссоциированных продуктах горения производимой ЭВГ смеси, обогащенной парами углеводородных соединений, имеется свободный кислород, который появился в результате подсоса воздуха и термической диссоциации продуктов горения. Суммарное содержание свободного кислорода  $O_2 + [O]$  в диссоциированных продуктах горения нормального сварочного пламени ВКС с парами бензина составляет 7...12 об. %, с парами спирта — 12...16 об. %, с парами ацетона — 5...7 об. %. Наличие в продуктах горения свободного кислорода требует дополнительного легирования присадочной проволоки раскислителями.

С помощью добавления в ВКС паров углеводородных соединений при ее постоянном расходе можно регулировать тепловую мощность ВКП (при сжигании  $1\text{ м}^3$  она составляет 6,75 МДж). Добавление в ВКС 5,5 % паров бензина при сжигании того же объема горючей смеси увеличивает тепловую мощность до 17,15 МДж, что почти в 2,7 раза больше по сравнению с пламенем чистой ВКС. В случае добавления в ВКС 16 об. % паров этилового спирта при сжигании того же объема горючей смеси тепловая мощность составляет 14,7 МДж. Таким образом, путем добавления в ВКС паров углеводородных соединений можно регулировать характер горения пламени, а также повышать его тепловую мощность.

При газопламенной обработке металлов, как правило, используют факельный способ сжигания химически однородных газовых смесей благодаря специальным сварочным горелкам и резакам инжекторного и безынжекторного типов. Для факельного горения характерно наличие стационарного пламени более или менее правильной формы, которая зависит от типа горелки, степени смешения горючего с окислителем и характера течения струи.

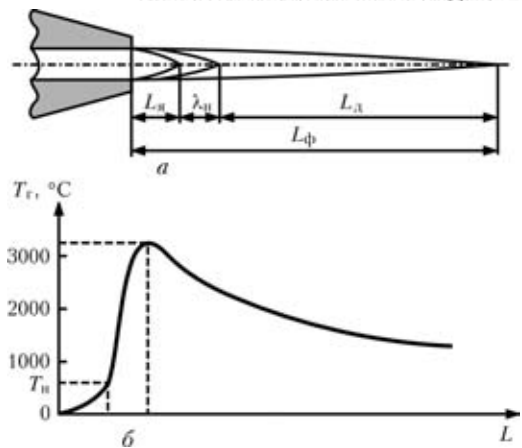


Рис. 1. Схема факела ацетилено-кислородного пламени (а) и распределение температуры по длине факела (б):  $L$  — расстояние по оси факела пламени; остальные обозначения см. в тексте

На рис. 1 приведена схема факела ацетилено-кислородного пламени газосварочной горелки. Область  $L_{я}$ , занимаемая начальной границей пламени, называется зоной воспламенения струи или ядром факела, область  $L_{д}$ , где завершается процесс горения, называется зоной догорания.

Из теории горения известно [5], что в случае ламинарного течения ядро факела очерчено резко и ширина нормального фронта пламени мала. Это область  $\lambda_n$ , расположенная между двумя поверхностями, где начинаются и заканчиваются химические реакции, происходящие в результате наличия кислорода в смеси, и имеет место повышение температуры от ее начального значения  $T_n$  до максимальной адиабатической температуры горения  $T_r$ . Так, при использовании водородно-кислородных смесей  $2H - O_2$  она равна 0,128 мм, метано-кислородных смесей  $CH_4 - 2O_2$  — 0,24 мм, ацетилено-воздушных  $C_2H_2 - \text{воздух}$  — 0,71 мм [6].

В сварочном производстве зону нормального распространения пламени  $\lambda_n$  называют средней зоной пламени. На ее конце температура продуктов горения достигает максимума, а затем начинает уменьшаться.

При турбулентном течении средняя зона пламени  $\lambda_n$  размыта, она отличается значительной толщиной, что усложняет расчет  $L_{я}$ , поскольку ее значения зависят от процесса распространения пламени от периферии к центру, т. е. от скорости распространения фронта турбулентного течения.

Длина зоны догорания  $L_{д}$ , расположенной между средней зоной и концом факела пламени (границей полного сгорания), в основном зависит от кинетических свойств горючей смеси.

Эффективность процесса сгорания в целом определяется общей длиной факела пламени

$$L_{ф} = L_{я} + \lambda_n + L_{д}. \quad (1)$$



В случае ламинарного характера течения  $\lambda_H \approx 0$

$$L_{\phi} = L_{я} + L_{д} \quad (2)$$

При ГПОМ рабочая зона определяется спецификой технологического процесса. При газовой сварке и пайке металлов рабочей зоной пламени является конец средней зоны пламени  $\lambda_H$ , температура горения пламени максимальная. При газокислородной резке рабочей зоной пламени является конец ядра факела пламени и зона догорания. Влияние распределения температуры в зоне догорания особенно ощутимо при резке металлов большой толщины.

При газопламенном напылении порошкового материала рабочей зоной в основном является зона догорания, в которой, как правило, происходит нагрев частиц до температуры их плавления или пластического состояния. При напылении проволоочного стержневого материала и гибкого шнура расплавление происходит в конце ядра факела пламени или в средней зоне пламени.

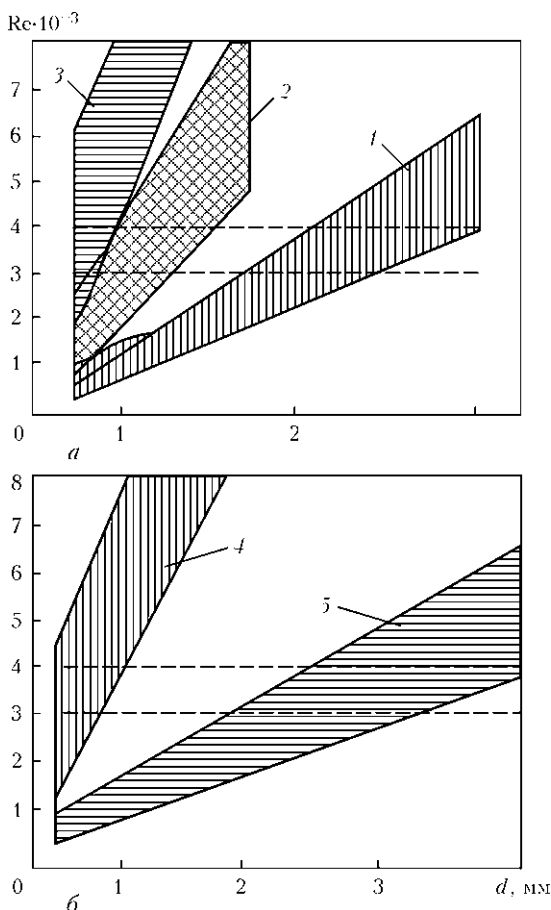


Рис. 2. Газодинамические характеристики струи газа, вытекающей из сопла стандартных наконечников горелок типа Г2-04 и Г-03, при стандартных условиях: а — водород (1), 30 %  $O_2$  + 70 %  $N_2$  (2) и кислород (3); б — водяной пар при давлении 0,1 МПа и температуре соответственно 107 (4) и 577 °С (5); штриховая — область перехода от ламинарного к турбулентному режиму течения струи ВКС (или водяного пара); d — диаметр наконечника горелки

Для оценки возможности использования ВКП, полученного при сжигании ВКС, как источника нагрева для различных технологических процессов ГПОМ исследовали режим истечения струи газов из сопла горелки в ядре факела и продуктов горения в зоне догорания пламени, а также распределение температуры по длине факела пламени.

Для исследования режима течения струи газов из сопла горелки в зоне ядра пламени использовали набор сменных наконечников с диаметрами выходных отверстий сопел канала 0,6...3,5 мм стандартных сварочных горелок Г2-04 и Г3-03 (№ 0–7), а в зоне догорания пламени — стандартный набор наконечников горелки для газопламенного напыления «ЕВРО-ДЖЕТ XS-7» с диаметрами сопел 1,6...2,2 мм (№ 1–3). Эксперименты проводили с использованием ЭВГ А1803 с производительностью газовой смеси до 1,6 м<sup>3</sup>/ч.

Для струи ВКС (рис. 2, а) и струи продуктов горения (водяного пара) (рис. 2, б) при истечении из стандартных наконечников (№ 0–2) сварочных горелок, регламентирующих расход смеси до 0,6 м<sup>3</sup>/ч, характерно ламинарное течение в ядре факела пламени и непосредственно за ядром, а при использовании наконечников № 3, 4, регламентирующих расход смеси до 1,8 м<sup>3</sup>/ч, — слаботурбулентное. По мере удаления от ядра факела пламени температура потока газов уменьшается, коэффициент вязкости снижается, а газовая струя имеет турбулентное течение.

Ламинарный режим истечения продуктов горения струи ВКС в зоне ядра факела пламени сокращает ширину нормального фронта его течения, а следовательно, и площадь поверхности горения.

Достижение повышенной теплонапряженности пламени и концентрированного тепловыделения в рабочей зоне сварки подтверждают эффективность использования ВКП при сварке и пайке металлов по сравнению с другими газами-заменителями ацетилена [7] и при расчетах дает возможность использовать коэффициент замены ацетилена на водород равный 2 [8].

Температуру пламени в ядре и приядерной зоне определяли экспериментально-расчетным методом энтальпии газа, которая зависит от теплового потока, воспринимаемого зондовым датчиком при отборе газа через внутренний капилляр. Ее значения находят путем расчета по уравнению теплового баланса по методике, разработанной Институтом газа НАН Украины. Средняя расчетная температура в ядре факела и приядерной зоне при использовании чистого ВКП составляла около 3117 °С (3390 К), а при сжигании смеси ВКС + 5 об. % паров бензина — около 3108 °С (3381 К) с предельным отклонением от средней расчетной температуры от -5,4 до +6,5 %, при сжигании



смеси ВКС + 16 об. % паров спирта — 3088 °С (3360 К) (отклонение от -2,3 до +3,3 %).

Использование ВКП целесообразно при сварке стальных деталей толщиной до 3 мм. Сварку деталей толщиной до 2 мм выполняют с отбортовкой кромок без присадки или с присадкой без разделки кромок. Стальные детали толщиной 2...3 мм можно сваривать встык с присадкой. При сварке низкоуглеродистых низколегированных сталей рекомендуется использовать ВКП с добавками паров бензина (нормальное пламя). В качестве присадочного материала используют сварочные проволоки марок Св-08Г2С, Св-08ГС, Св-10ГС.

Газовая сварка с ВКП, полученным при сжигании смеси, производимой ЭВГ, успешно используется при сварке латуни толщиной до 4 мм. При этом применяется окислительное пламя — чистая ВКС без углеводородных добавок. Удельный расход горючей смеси составляет 250...300 дм<sup>3</sup>/(ч·мм). В качестве присадочной проволоки используют латунь марки ЛОК-59-1-0,3 или однотипную с основным металлом. Обязательно применение флюсов, в состав которых входит бура  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , борная кислота  $\text{H}_3\text{BO}_3$  или их смеси. Удобно также использовать жидкий флюс БМ-1.

Как показал опыт, при газопламенной пайке меди и медных сплавов возможно применение ВКП, например, при пайке медных трубопроводов рефрижераторных систем диаметром 25 мм с толщиной стенки 2 мм используют медно-цинковые припои с жидким флюсом БМ-1 или флюсы на основе прокаленной буры и борной кислоты.

Использование ВКП в качестве подогревающего пламени целесообразно также при резке стальных деталей толщиной до 40 мм. При этом рекомендуется ВКС, обогащенная парами бензина. Расход горючей смеси для подогревающего пламени при выполнении работ с использованием машинного резака типа РМ с удаленным инжекторным узлом в зависимости от толщины разрезаемого металла составляет от 1,1 до 1,8 м<sup>3</sup>/ч.

Качество покрытия при газопламенном напылении зависит от температуры и скорости напыляемых частиц материала, которые при напылении порошковых материалов в свою очередь зависят от распределения температуры и скорости струи продуктов горения в зоне догорания пламени.

Если режим течения продуктов горения изменяется от ламинарного к турбулентному, то образуются так называемые переходные потоки, в которых на разных участках факела объединяются ламинарная и турбулентная форма движения.

При относительно низкой скорости течения струи горючей смеси длина зоны догорания факела увеличивается пропорционально числу Рейнольдса (Re), что соответствует ламинарному характеру течения, которое сохраняется до  $Re \approx$

$\approx 3000...3500$ . При увеличении скорости течения струи горючей смеси при больших значениях Рейнольдса имеет место отклонение указанной зависимости от линейной. На вершине факела появляются пульсации, которые нарастают по мере увеличения скорости течения струи смеси и вызывают разрушение ламинарного фронта и турбулизацию факела. Дальнейшее повышение скорости течения струи горючей смеси приводит к уменьшению длины зоны догорания факела.

Эффективный нагрев частиц металла до температуры плавления при конвективном теплообмене между продуктами горения пламени и напыляемыми частицами возможен, если температура продуктов горения в факеле выше температуры плавления материала на 250...300 °С [9]. С учетом этого длина активного температурного интервала факела пламени для металлов, плавящихся при температуре 1250 °С (латуни, бронзы, порошков самофлюсующихся сплавов, экзотермически реагирующих порошков и композитов), будет определяться изотермой, соответствующей 1500 °С.

Исследования изменения температуры по длине факела пламени [10] показали, что длина его участков с температурой горения выше 1500 °С больше при турбулентном характере течения продуктов горения, а с температурой ниже 1500 °С она больше при ламинарном характере течения. При введении в ВКС паров углеводородных соединений наблюдается тенденция к увеличению длины активных зон пламени.

На распределение скорости газовой струи по длине факела пламени влияет режим ее течения. При турбулентном характере течения струи скорость на начальных участках, расположенных ближе к соплу, максимальная, при ламинарном характере ее уменьшение происходит более монотонно (рис. 3, а).

Добавление в ВКС 5,5 об. % паров бензина увеличивает скорость газовой струи по сравнению с чистой ВКС (рис. 3, б), а добавление 16 об. % паров спирта практически не влияет на скорость струи (рис. 3, в).

Результаты проведенных исследований использованы при разработке и внедрении технологических процессов газовой сварки медных выводных с обмоточными проводами катушек электромагнитов, стальных тонколистовых корпусных деталей, латунных трубопроводов холодильных установок, пайки капиллярных трубопроводов из нержавеющей сталей, медных радиаторных труб, напылении осей валов электродрелей, восстановлении штампов и других процессах газотермической обработки материалов на предприятиях Киева и Москвы.

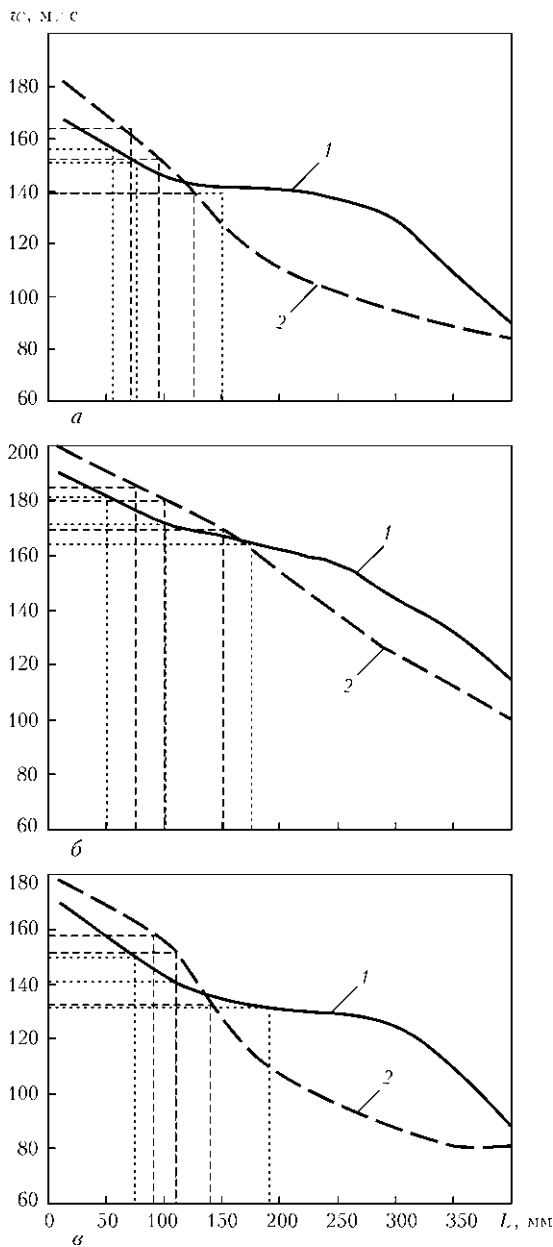


Рис. 3. Распределение скорости течения струи продуктов горения по длине факела пламени при ламинарном (1) и турбулентном (2) режиме: а — ВКС, производимая ЭВГ; б — ВКС + 5,5 об. % паров бензина; в — ВКС + 16 об. % паров спирта

**Выводы**

1. Исследования показали, что режим течения струи продуктов горения ВКП при стабильном горении горючей смеси показали, что он имеет

ламинарный и турбулентный характер течения струи. Изменение характера течения продуктов горения влияет на геометрию пламени, распределение температуры и скорость газовой струи по длине факела пламени. При этом возможно управление окислительно-восстановительными процессами в сварочной ванне путем регулирования состава горючей газовой смеси насыщением парами жидких углеводородных соединений с помощью барботирования.

2. Теплонапряженность ВКП выше других используемых углеводородных горючих за счет ламинарного течения продуктов горения в зоне ядра и приядерной зоне, что позволяет сваривать стальные детали толщиной до 3 мм, при этом коэффициент замены ацетилен на водород равен 2. Тепловую мощность ВКП, полученного при сжигании смеси, производимой ЭВГ, можно увеличить в 2–3 раза путем насыщения смеси парами углеводородных соединений.

1. А. с. 967704 СССР, МКП<sup>3</sup> В 23 К 5/00. Устройство для газопламенной обработки металлов / В. Н. Корж, А. И. Стародумов, И. В. Матвеев и др. — Оpubл. 23.10.82; Бюл. № 39.
2. А. с. 1164017 СССР, МКП<sup>3</sup> В 23 К 5/00. Устройство для газопламенной обработки материалов / В. Н. Корж, И. В. Матвеев, Ю. М. Тузенко и др. — Оpubл. 30.06.85; Бюл. № 24.
3. Корж В. М., Попиль Ю. С. Керування параметрами процесу горіння воднево-кисневого полум'я при газополуменевій обробці матеріалів // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2002. — № 4. — С. 59–64.
4. Шапков А. Н. Основы регулирования состава газосварочного пламени // Автоген. дело. — 1946. — № 7. — С. 1–3.
5. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва. — М.: Изд-во МГУ, 1957. — 442 с.
6. Крыжановский В. Н. Определение ширины нормального фронта пламени стехиометрических и бедных смесей с различным химическим составом // Промышл. теплотехника. — 1984. — № 3. — С. 39–45.
7. Корж В. Н., Тузенко Ю. М., Матвеев И. В. Сварка деталей из низкоуглеродистой стали водородно-кислородным пламенем // Автомат. сварка. — 1984. — № 1. — С. 70–71.
8. Корж В. Н. Расчет расхода водорода, применяемого взамен ацетилен, при газопламенной обработке металлов // Там же. — 1985. — № 10. — С. 76–77.
9. Применение газов-заменителей ацетилен при газопламенной обработке металлов / Под ред. И. А. Антонова. — М.: Машиностроение, 1964. — 150 с.
10. Корж В. Н., Попиль Ю. С. Влияние углеводородных добавок на структуру водородно-кислородного пламени и распределение температуры по длине факела // Автомат. сварка. — 2004. — № 11. — С. 36–40.

Peculiarities of utilisation of hydrogen-oxygen flame in flame treatment of materials are generalised, the flame being formed by combustion of a mixture produced by electrolysis-water generators. The study shows that it is possible to regulate the reduction potential of the combustion product flame with respect to iron, and control the overall thermal power due to saturation of the mixture with hydrocarbon additions.

Поступила в редакцию 17.07.2008

## ВНЕВАКУУМНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Ф.-В. БАХ, А. БЕНЬЯШ, К. ЛАУ, Р. КОНЬЯ (Ин-т материаловедения Ганноверского ун-та им. Лейбница, Германия)

Приведены результаты экспериментов по применению электронно-лучевой сварки в атмосфере для сварки конструкционных и высокопрочных сталей толщиной до 20 мм. Показано, что после плазменной или лазерной резки нет необходимости в механической обработке кромок перед сваркой. Комплекс испытаний показал высокое качество сварных соединений.

*Ключевые слова:* вневакуумная электронно-лучевая сварка, сварочная установка, нержавеющая сталь, высокопрочные стали, глубина проплавления, присадочная проволока, формирование корня шва, скорость сварки, металлографические исследования, механические свойства

Первые публикации по успешному практическому применению электронно-лучевой сварки (ЭЛС) в атмосфере относятся к 1960-м годам [1–3]. Высокая производительность процесса и возможность его интеграции в существующие поточные линии обусловила интерес к нему, в первую очередь, со стороны автомобилестроительной промышленности. С начала 1990-х годов наблюдается новая волна интереса к электронно-лучевой технологии, что объясняется новыми тенденциями в современном автомобилестроении, связанными, в частности, с разработкой облегченных конструкций кузовов с применением алюминиевых сплавов [4, 5]. Следует отметить, что ЭЛС в атмосфере применяется в настоящее время исключительно для соединения тонколистовых материалов в автомобилестроении и является практически единственной отраслью промышленности, где она внедрена достаточно широко. Однако возможности данной технологии далеко не исчерпываются этой единственной отраслью. Внедрение новых материалов и требования к увеличению производительности труда заставляют производителей искать новые перспективные технологические процессы. В последнее время большой интерес к ЭЛС в атмосфере проявляют крано-, судостроительная промышленность и другие области машиностроения. В рамках данной работы оценены перспективы применения ЭЛС в атмосфере для сварки толстолистовых материалов.

**Экспериментальные исследования.** ЭЛС в атмосфере проводили на сварочной установке марки NV-EBW 25-175 TU фирмы «PTR Präzisionstechnik GmbH» (рис. 1). Она имеет много общего с широко распространенными установками для сварки в вакууме и состоит из высоковольт-

тного источника с рабочим напряжением 175 кВ и электронной пушки с максимальным током луча 140 мА. Вывод луча в атмосферу осуществляется с помощью трехступенчатой системы откачки, при этом для уменьшения рассеяния луча в выходную ступень пушки подается гелий. Для перемещения свариваемых деталей имеется координатный стол с числовым программным управлением фирмы «Simens». Для выполнения вспомогательных операций в состав установки входит промышленный робот фирмы «Kuka». Технические характеристики установки следующие:

Рабочее напряжение, кВ .....	175
Максимальный ток луча, мА .....	140
Размеры стола, мм .....	800×1200
Ход стола вдоль координаты X (Y), мм .....	3000 (800)
Вертикальный ход пушки вдоль оси Z, мм .....	1200
Угол наклона пушки, град .....	0...90
Максимальная скорость сварки, м/мин .....	20

Предварительные опыты по определению зависимости глубины проплавления от параметров сварки, проведенные на образцах из различных сплавов, показали широкие возможности применения установки NV-EBW 25-175 TU для сварки толстолистовых материалов. На рис. 2 приведена

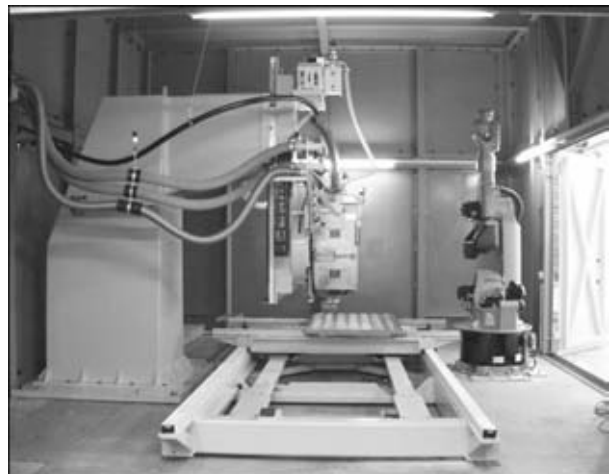


Рис. 1. Установка для ЭЛС в атмосфере в Институте материаловедения Ганноверского университета

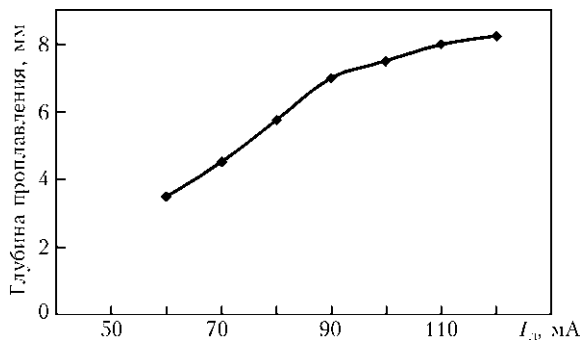


Рис. 2. Зависимость глубины проплавления от тока луча для стали X2CrNi 18 9

типичная зависимость глубины проплавления от тока луча, а на рис. 3 — макрошлиф поперечных сечений глубины проплавления для стали X2CrNi 18 9 при различных токах луча (рабочее расстояние 10 мм, скорость сварки 3 м/мин).

На рис. 4 приведена зависимость глубины проплавления от скорости сварки.

Важным отличием ЭЛС в атмосфере от традиционной вакуумной ЭЛС является существенная зависимость глубины проплавления от рабочего расстояния, что объясняется значительным рассеянием луча в атмосфере (рис. 5).

Проведенные предварительные исследования показали, что установка NV EBW 25-175 TU позволяет сваривать толстолистовой материал с высокой производительностью. Недостатком ЭЛС в атмосфере является резкое падение концентрации энергии в пятне луча с увеличением рабочего расстояния, что накладывает определенные ограничения на выбор геометрии свариваемых деталей.

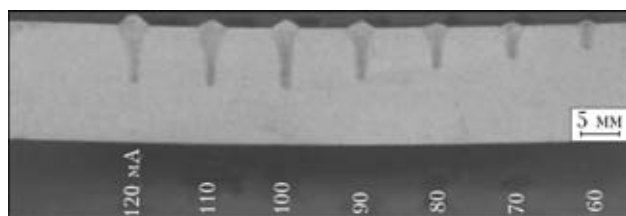


Рис. 3. Макрошлиф поперечных сечений глубины проплавления для стали X2CrNi 18 9 при различных значениях тока луча

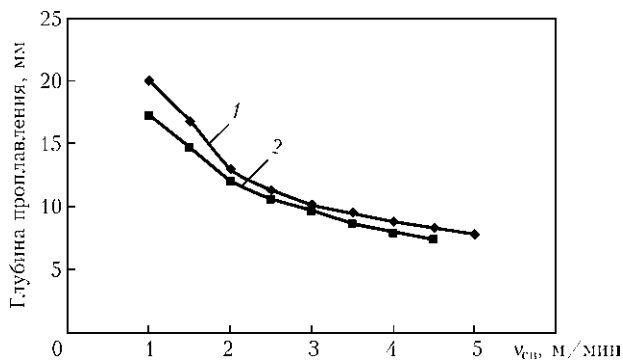


Рис. 4. Зависимость глубины проплавления от скорости сварки на стали X2CrNi 18 9 (рабочее расстояние 10 мм): 1 —  $I_{\text{л}} = 140$  мА; 2 — 120

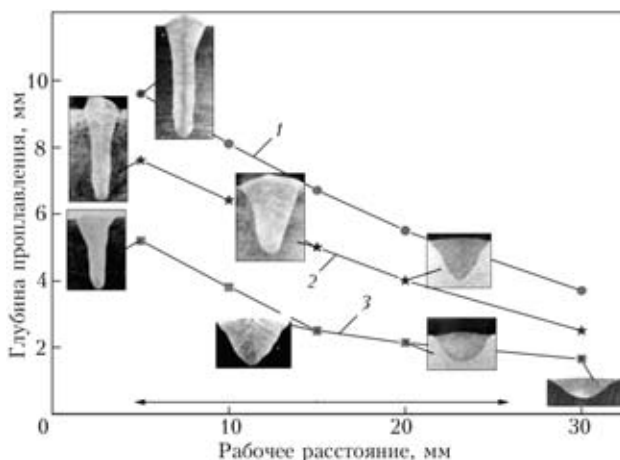


Рис. 5. Зависимость глубины проплавления от рабочего расстояния на стали X2CrNi 18 9 при скорости сварки 5 м/мин: 1 —  $I_{\text{л}} = 140$  мА; 2 — 100; 3 — 60

Наиболее просто реализовать преимущества ЭЛС в атмосфере при выполнении горизонтальных швов большой протяженности, например, сварке панелей в судостроении, сварке продольных швов при производстве труб и т. п.

*Сварка высокопрочных сталей в краностроении.* Одной из возможных областей применения ЭЛС в атмосфере является краностроение. Требования к увеличению грузоподъемности с одновременным снижением массы подъемных кранов потребовали применения высокопрочных сталей с пределом прочности до 1300 МПа. По заказу фирмы «GEC Ehingens» проведены эксперименты по ЭЛС в атмосфере высокопрочных сталей, применяемых при изготовлении телескопических стрел мощных (до 500 т) автокранов. Эти стали бейнитно-мартенситного класса поставляются в термообработанном состоянии, во избежание резкого снижения их механических свойств при отпуске сварку таких материалов следует проводить на достаточно высоких скоростях. Эксперименты проводили на пластинах из сталей S960QL, S1100QL, S1300QL фирмы SSAB, механические свойства которых приведены в табл. 1.

Образцы размером 500×200×6 мм сваривали встык без дополнительной подготовки кромок после лазерной резки. Часть образцов сваривали с применением присадочной проволоки Draht Union X90 (GMn4Ni2CrMo) (EN 12534) диаметром 1,2 мм. Скорость сварки составляла 2,5...3 м/мин, ток луча 100...130 мА, рабочее расстояние 15 мм, скорость

Т а б л и ц а 1. Механические свойства сталей для краностроения

Материал	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\epsilon$ , %
S960QL	980...1150	960	12
S1100QL	1200...1500	1100	10
S1300QL	1400...1700	1300	8

Таблица 2. Результаты механических испытаний сварных соединений толщиной 6 мм на растяжение

Материал	$v_{св}$ , м/мин	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	Присадка	Характер разрушения	Способ сварки
S960QL	3	1190	1037	Без присадки	Основной металл	ЭЛС
S1100QL	3	1310	1250	»	ЗТВ	»
S1100QL	2,5	1485	1420	X 90	»	»
S1300QL	3	1315	1300	Без присадки	»	»
S1300QL	2,5	1440	1385	X 90	»	»
S1100QL	0,6	1265	1207	X 90	»	Плазма + МИГ
S1300QL	0,8	1235	1160	X 90	»	Плазма + МИГ

подачи проволоки 8 м/мин. Пробы, изготовленные из сваренных образцов, подвергали испытаниям на растяжение. Результаты механических испытаний приведены в табл. 2, где для сравнения приведены также механические свойства соединений, выполненных гибридной сваркой плазма+МИГ при скорости сварки 0,6...0,8 м/мин [4]. Для стали S960QL на оси шва наблюдается увеличение микротвердости на  $HV_{0,2}$  — 50 в поперечном сечении сварного шва по сравнению с основным металлом. Для сталей S1100QL и S1300QL наблюдался провал микротвердости в металле ЗТВ на  $HV_{0,2}$  — 50. При гибридной сварке провал микротвердости металла в ЗТВ возрастал до  $HV_{0,2}$  — 100. Полученные данные хорошо согласуются с результатами механических испытаний. Проведенные опыты показали, что замена гибридной сварки на ЭЛС в атмосфере, помимо значительного увеличения скорости сварки, позволяет также улучшить механические свойства соединений.

*Сварка судостроительной стали D36.* Перспективной областью использования ЭЛС в атмосфере является судостроение, где характерно применение толстолистовых материалов и протяженных прямолинейных швов. В сотрудничестве с верфью HDW-Gaarden GmbH и с производителем оборудования для судостроительных заводов фирмой «ISU-GmbH» были проведены исследования по оценке возможности замены традиционной для судостроения технологии сварки под флюсом на ЭЛС в атмосфере. При этом ставилась задача по-

лучения односторонних швов с качественным обратным формированием без дополнительной подготовки кромок после термической резки. В этом случае значительное рассеяние электронного луча, обычно причисляемое к недостаткам ЭЛС в атмосфере, оказывается весьма полезным свойством и позволяет надежно перекрывать свариваемые кромки. Опыты проводили на образцах из судостроительной стали D36 ферритно-перлитного класса размером 500×150 мм толщиной от 4 до 20 мм. Подготовка кромок после плазменной резки заключалась в удалении тонкого слоя окалины с помощью металлической щетки.

Материал толщиной 4 мм сваривали без присадочной проволоки. Технологические испытания на загиб (рис. 6) и статическое растяжение в соответствии со стандартом DIN EN 10002 показали хорошее качество соединения.

Материал толщиной 10, 15 и 20 мм сваривали с применением присадочной проволоки. Типичная конфигурация стыка перед сваркой приведена на рис. 7.

Благодаря большому диаметру луча, зазор в верхней части стыка составляет 3,4 мм для материала толщиной 20 мм и не является препятствием для сварки, в отличие от острофокусированных лазерных или вакуумных электронных пучков. Для компенсации зазоров в стыке при сварке материала толщиной 10, 15, и 20 мм при-

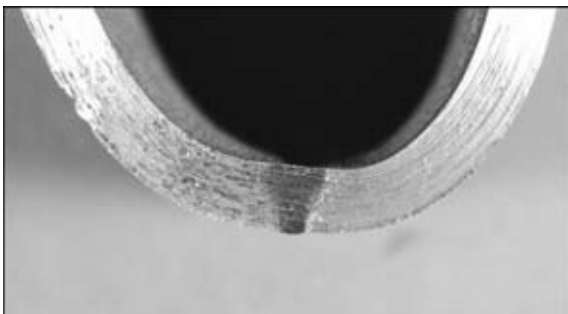


Рис. 6. Вид сварного образца из материала толщиной 4 мм после испытаний на загиб

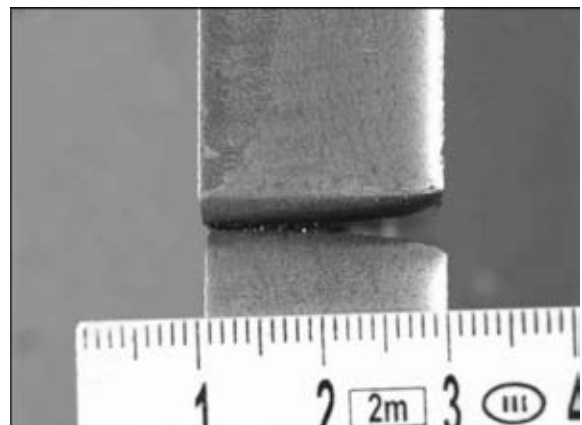


Рис. 7. Конфигурация стыка пластин толщиной 20 мм перед сваркой



Таблица 3. Режимы сварки образцов из стали D36

№ образца	Толщина образца, мм	Ток луча, мА	Скорость сварки, м/мин	Рабочее расстояние, мм	Скорость подачи, м/мин	Номер прохода	Вид присадки
66	4	110	4,5	10	—	1	—
59	10	140	2,2	10	—	1	—
59	10	50	1,4	15	10	2	Autrod 12.58
36	15	140	1,5	10	—	1	—
36	15	65	1	10	7	2	G3Si
25	20	135	1	10	2,2	1	G3Si

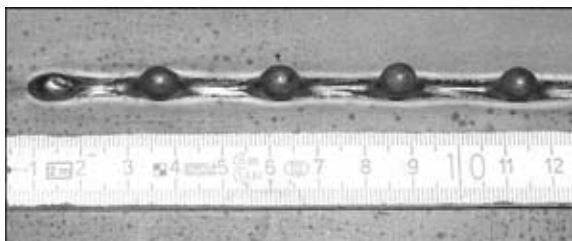


Рис. 8. Дефекты корня шва при сварке материала толщиной 20 мм без подкладки

меняли присадочную проволоку. При этом сталь толщиной 10 мм сваривали за один проход с одновременной подачей в зону сварки проволоки марки Autrod 12.58 (EN 440, G2Si) диаметром 1 мм. Материал толщиной 10 и 15 мм сваривали за два прохода. Сварка основного сечения стыка и формирование обратного валика происходили при первом проходе без подачи присадочной проволоки. Во время второго прохода происходило заполнение недостающего сечения стыка и формирование поверхности шва с помощью присадочной проволоки G3Si (EN 440) диаметром 1,6 мм. Режимы сварки приведены в табл. 3.

Сварка материала толщиной 10 мм не представляла особых затруднений, в то время как при сварке материалов больших толщин (15 и 20 мм) основной проблемой являлось обеспечение на-

дежного формирования корня шва. Как показали эксперименты, свободное формирование корня шва для материала толщиной 15 мм возможно при тщательном подборе и строгом соблюдении параметров сварки. Для материала толщиной 20 мм свободное формирование корня шва приводит к появлению дефекта в виде периодических провисаний жидкого металла (рис. 8).

Для устранения этого дефекта применяли сварку на подкладке. При этом первый проход выполняли ЭЛС на подкладке из флюса ОР 122 фирмы «OERLIKON», а второй — ЭЛС с подачей присадочной проволоки или дуговой сваркой под флюсом. Внешний вид обратного валика при различных вариантах сварки приведен на рис. 9.

Металлографические исследования показали отсутствие дефектов в виде пор и трещин. На рис. 10 приведены макрошлифы образца толщиной 15 мм, сваренного ЭЛС в два прохода с применением присадочной проволоки G3Si. В поперечном сечении шва наблюдались максимальные значения микротвердости  $HV_{0,2}$  — 374 на оси шва с плавным понижением по линии поперечного сечения шва до микротвердости основного металла  $HV_{0,2}$  — 232, провалов микротвердости в металле ЗТВ не наблюдалось.

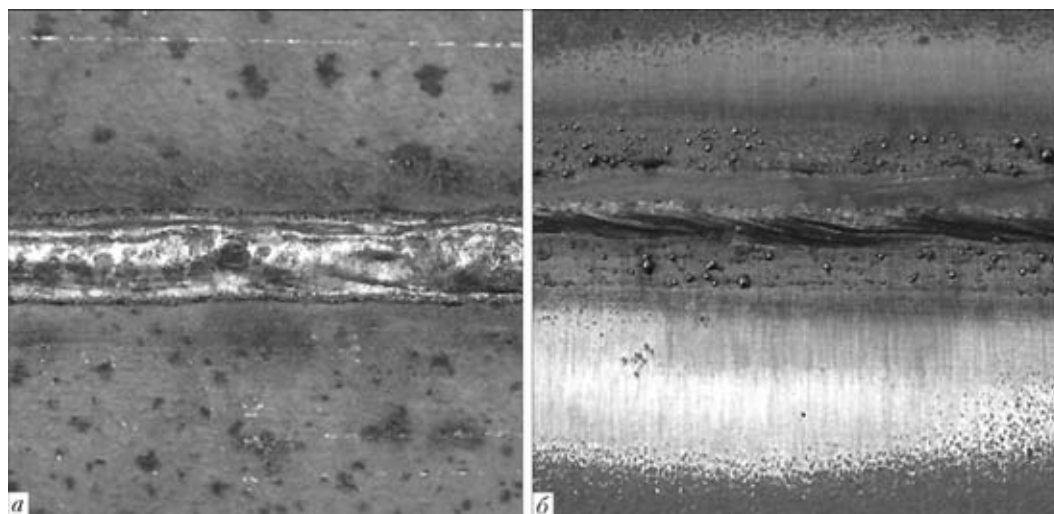


Рис. 9. Внешний вид корневой части шва на подкладке из флюса ОР 122 толщиной 20 мм (а) и при свободном формировании толщиной 15 мм (б)



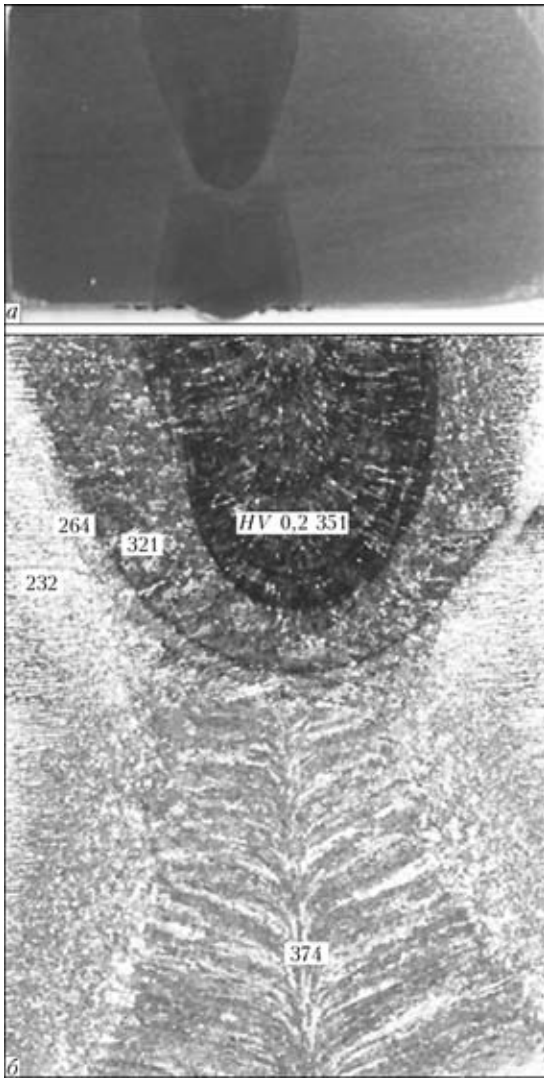


Рис. 10. Макрошлифы (а,  $\times 1,5$ ) и (б,  $\times 16$ ) поперечного сечения образца толщиной 15 мм, выполненного ЭЛС в два прохода с присадкой G3Si

Приведены макрошлифы поперечного сечения шва на материале толщиной 20 мм после первого прохода, выполненного ЭЛС, и второго прохода, выполненного дуговой сваркой под флюсом (рис. 11). Оба прохода выполняли без какой-либо подготовки кромок. Испытания на статическое растяжение в соответствии со стандартом DIN EN 10002 показали хорошее качество соединения. Во время механических испытаний на статическое растяжение все образцы разрушались по основному металлу (рис. 12). Механические свойства сварных соединений приведены в табл. 4.

Помимо испытаний на статическое растяжение, проводили испытания на ударную вязкость в соответствии с требованиями Германского Ллойда и стандарта DIN EN 10045. Работа удара для стандартной пробы Шарпи при  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  составляла 83 Дж для металла шва и 64 Дж в металле ЗТВ, что значительно выше значения 47 Дж, требуемого стандартом.

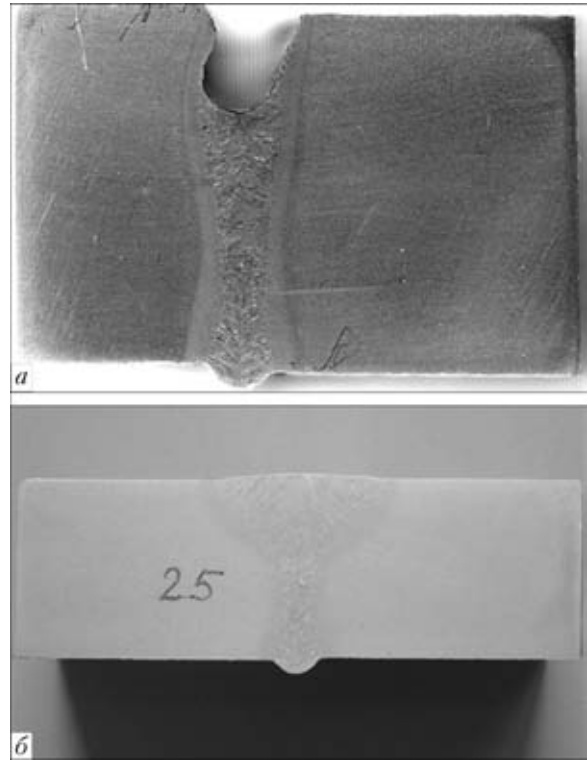


Рис. 11. Макрошлифы поперечного сечения шва образца толщиной 20 мм после первого прохода, выполненного на подкладке из флюса ОР 122 (а), и второго прохода, выполненного сваркой под флюсом ОР 122 (б)



Рис. 12. Внешний вид сварного образца толщиной 15 мм после испытаний на растяжение

Таблица 4. Механические свойства\* сварных образцов из стали D36

Толщина свариваемого металла, мм	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\epsilon$ , %
4	513	357	14
10	552	379	11
15	581	386	11

\* Механические свойства основного металла следующие:  $\sigma_b = 490...630$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 355$  МПа;  $\epsilon = 21$  %. Образцы разрушались по ОМ.

Проведенные исследования показали высокую эффективность применения ЭЛС в атмосфере для сварки толстолистовых материалов.

**Выводы**

1. Сварочная установка марки NV-EBW 25-175 TU 2 позволяет проводить сварку сталей толщиной до 20 мм.

2. Большой диаметр луча при ЭЛС в атмосфере обеспечивает надежную сварку при наличии значительных сборочных зазоров.

3. Термический цикл сварки не приводит к заметному ухудшению свойств высокопрочных сталей бейнитно-мартенситного класса.

4. Замена гибридной сварки на ЭЛС в атмосфере, помимо значительного увеличения скорости сварки, позволяет улучшить также механические свойства швов высокопрочных сталей для крапостроения.

5. Сварка судостроительной стали толщиной 4...20 мм не требует дополнительной подготовки

кромки после термической резки и обеспечивает механические свойства соединений, удовлетворяющие нормам DIN EN 10045 и Германского Ллойда.

1. Bennet M. G. Out-off-vacuum electron-beam welding // Welding and Metal Fabr. — 1970. — № 3. — P. 105–113.
2. O'Neil F. P. High speed electron beam welding of tube // Can. Weld. and Fabr. — 1967. — № 11. — P. 26–28.
3. Duhamel R. F. Non-vacuum electron beam welding technique development and progress // Welding J. — 1965. — № 6. — P. 465–474.
4. Schubert G., Holdgruben H., Gomes-Buco J. Nonvacuum electron beam welding of aluminium structural beams: Intern. Body Eng. conf. — Detroit, Michigan, 1996. — P. 58–61.
5. Nonvacuum electron beam welding a beam process for welding zinc coated high strength steels and steel-aluminium hybrid structures / Fr.-W. Bach, A. Beniyash, K. Flade, R. Versemann // Proc. of 4th conf. LANE, Erlangen, Germany, Meisenbach-Verl., Bamberg, 2004. — Vol. I. — P. 247–258.

Experimental results are given on application of atmospheric EBW for welding structural and high-strength steels up to 20 mm thick. It is shown that no machining of edges prior to welding is required after plasma and laser cutting. The high quality of welded joints was proved by comprehensive tests.

Поступила в редакцию 18.11.2008

**Вышла в свет новая книга!**

**Троицкий В. А.** Визуальный и измерительный контроль деталей машин, металлоконструкций, сварных соединений. — Киев: Феникс, 2009. — 275 с.

*Рассмотрены основные требования и правила выполнения визуально-измерительного контроля сварных соединений и металлоконструкций, описаны основные технические средства, применяемые для этих целей.*

*Настоящее пособие будет полезно дефектоскопистам, выполняющим визуально-измерительный контроль, а также абитуриентам, готовящимся получить право на ведение этого вида неразрушающего контроля.*

Можно также приобрести следующие информационные материалы по неразрушающему контролю:

✓ Краткое пособие по контролю качества сварных соединений, 316 с., 2006 г. (40,0 грн.)

✓ Магнитопорошковый контроль сварных соединений и деталей машин, 306 с., 2002 г. (80,0 грн.)

✓ Ультразвуковой контроль. Дефектоскопы. Нормативные документы. Стандарты по УЗК, 221 с., 2006 г. (80,0 грн.)

✓ Пособие по радиографии сварных соединений, 312 с., 2008 г. (80,0 грн.)

✓ Визуальный и измерительный контроль деталей машин, металлоконструкций, 275 с., 2009 г. (80,0 грн.)

✓ Учебно-методические плакаты по неразрушающему контролю.

**УО НКД, ул. Боженко, 11, Киев-150, ГСП, 03680  
или по факсу: (044) 289-21-66.**



## ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ СБОРКИ НА КАЧЕСТВО УГЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ КОРОТКОЙ ДУГОЙ

П. КА, ДЖ. МАРТИКАЙНИНЕН (Технолог. ун-т, г. Лапперанта, Финляндия),  
П. ДЖЕРСТРОМ, ДЖ. УУСИТАЛО (Компания «Кэмпи», г. Лаhti, Финляндия)

Описано влияние параметров процесса сварки модифицированной короткой дугой плавящегося электрода в сравнении с обычной сваркой МАГ при выполнении углового шва между двумя листами вертикально сверху вниз. Определено, что процесс сварки МАГ модифицированной короткой дугой характеризуется приблизительно на 25 % меньшим тепловложением, чем обычный процесс сварки МАГ. Отмечено также, что скорость сварки модифицированной короткой дугой на 10 % выше, чем при обычной сварке МАГ.

*Ключевые слова:* сварка МАГ, модифицированная дуга, обычная сварка МАГ, зазор в корне, листовые материалы, угол (наклона) горелки, вылет электрода, качество соединений

Сварка МАГ широко используется в промышленности благодаря таким преимуществам, как глубокое проплавление, гладкий валик, малое разбрызгивание и высокая скорость сварки, которые могут быть реализованы с помощью специального оборудования, обеспечивающего характеристики шва, соответствующие определенным требованиям [1, 2]. Тем не менее, дефекты в шве могут быть обнаружены в результате неправильного положения горелки, несоответствующего зазора в корне и установки листов [3].

Применяемые в настоящее время такие способы дуговой сварки, как металлическим покрытием электродом, ТИГ и обычной МАГ недостаточно эффективны при сварке листов [2]. В настоящей работе показаны потенциальные преимущества нового процесса сварки МАГ модифицированной короткой дугой по сравнению с обычной сваркой МАГ при сварке листов. Рассмотрен принцип процесса, а также результаты экспериментов, которые дают общее представление о разработке и реализации нового способа МАГ сварки модифицированной короткой дугой и обычной сварки этого типа для соединения листов в угловом соединении при различных зазорах, полученных при сборке.

Экспериментальные исследования включали сварку листов заготовок размером 300×50×1,5 мм в угловом соединении за один проход при различных схемах манипулирования с воздушным зазором при использовании нового способа МАГ сварки модифицированной короткой дугой и обычной МАГ сварки. Применен инверторный источник на токи до 500 А, устройство для подачи проволоки и устройство охлаждения. Процесс

сварки был автоматическим, но его также можно было использовать в сочетании с перемещениями.

В исследованиях использовали два основных материала — конструкционные и нержавеющие стали. Свариваемость для конструкционной стали оценивали по значению углеродного эквивалента ( $C_{\text{экв}}$ ) и критерия склонности к трещинообразованию (UCS) для холодных и горячих трещин. Установлено, что конструкционные стали (табл. 1) не содержат холодных ( $C_{\text{экв}} = 0,07$ ) и горячих трещин (UCS = 9,8). Для нержавеющей стали наиболее приемлемым способом определения влияния различных элементов на базовую структуру хромоникелевых нержавеющих сталей является использование диаграммы Шеффлера, показывающей ограничения по химическому составу для структур аустенита, феррита и мартенсита при комнатной температуре. При этом отмечено, что швы на нержавеющей стали не содержат горячих трещин. Кроме того, сварку выполняли при температуре окружающей среды и без подачи какого-либо дополнительного материала в разделку [4].

Качество шва определяли по внешнему виду валика при различных зазорах в корне шва. С целью обеспечения товарного внешнего вида шва параметры процесса изменяли много раз, выбирая самые оптимальные. Проводили визуальные наблюдения за ЗТВ для различных процессов, а также расчет тепловложения. С целью наблюдения за влиянием параметров процесса на профиль проплавления при различных зазорах, полученных при сборке, сварные образцы разрезали, шлифовали, полировали и протравливали.

Проведенные исследования основаны на переносе металла каплями с прерыванием дуги. Процесс сварки характеризуется периодом горения дуги, за ним следует период короткого замыкания, при котором происходит перенос металла. Эта фаза может быть точно отрегулирована в зависимости от качества и диаметра используемой про-



Таблица 1. Химический состав свариваемых сталей, мас. %, и показатели свариваемости

Сталь	C	Si	Mn	P	S	Al
Конструкционная	0,04	0,010	0,17	0,007	0,011	0,039
Нержавеющая	0,05	0,42	1,58	0,031	0,003	—

Окончание табл. 1

Сталь	Cr	Ni	N	C <sub>экв</sub>	UCS	Cr <sub>экв</sub> /Ni <sub>экв</sub>
Конструкционная	—	—	—	0,07	9,8	—
Нержавеющая	18,2	8,1	0,059	—	—	20,4/9,63

волоки и защитного газа. Определенное сочетание параметров приводит к уменьшению разбрызгивания и более стабильной дуге даже при сварке нержавеющей сталей.

**Методика проведения экспериментов.** *Сварочное оборудование.* Применяли сварочное оборудование, обеспечивающее большое количество программ сварки, возможность использования различных присадочных проволок и комбинаций защитных газов. Оно включает источник постоянного тока, который может использоваться как для обычного процесса МАГ, так и для процесса сварки МАГ модифицированной короткой дугой. На рис. 1 [5] показаны типичные осциллограммы тока процесса сварки МАГ модифицированной короткой дугой и обычной сварки МАГ короткой дугой.

При обычных процессах сварки МАГ короткой дугой отделение капли происходит при большом значении тока, которое зависит от управления напряжением. После этого ток медленно снижается до окончания периода горения дуги и начинается следующий период короткого замыкания. В модифицированной короткой дуге перенос металла происходит при низком значении тока, что приводит к мягкому переходу к сварочной ванне. После перехода капли в сварочную ванну начинается второй этап повышения тока, который приводит к началу этапа горения дуги. После двух этапов нарастания тока модифицированной короткой дуги ток снижается до необходимого базового уровня. Использование установленного уровня базового тока обеспечивает то, что следующая капля присадочного металла передается во время сле-

дующего короткого замыкания. Точно управляемая дуга при процессе сварки МАГ модифицированной короткой дугой позволяет снизить разбрызгивание на этапе отделения капли и снижает тепловложение на этапе горения дуги настолько, что оно становится сравнимым с обычным процессом сварки короткой дугой.

При процессе МАГ сварки модифицированной короткой дугой ток и напряжение синхронизируются источником питания. Модифицированный процесс как процесс сварки МАГ попадает в категорию 131, 135, 136 или 137 по классификации стандарта EN ISO 4063. Весь цикл сварки длится приблизительно 5 мс, поэтому у источника питания недостаточно времени для рассеяния энергии, и, таким образом, используется достаточное количество энергии для расплавления металла и создания непрерывного шва. Поскольку эта энергия подводится так быстро для расплавления металла, то очевидно, что скорость сварки при сварке модифицированной короткой дугой может быть повышена.

Процесс МАГ модифицированной короткой дугой позволяет регулировать скорость подачи проволоки, уровень второго этапа нарастания тока (формирующий импульс (ФИ) и базовый ток). ФИ обеспечивает управление энергией, подаваемой в дугу, и в этой точке отделение капель не происходит, в то же время при обычном процессе импульсной сварки каждый импульс приводит к отделению капли. При ФИ сила дуги больше, чем при процессах с короткой дугой, поскольку она подталкивает капли к расплавленной ванне. После

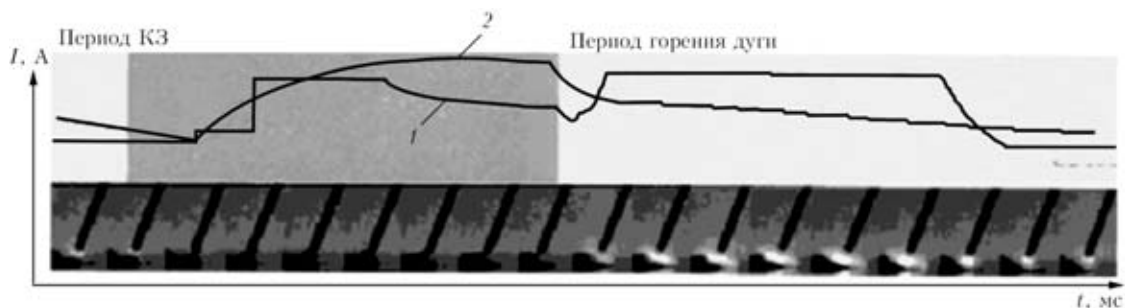


Рис. 1. Типичная осциллограмма тока процесса сварки МАГ модифицированной короткой дугой (1) и обычной сварки МАГ короткой дугой (2) при различных режимах горения дуги

ФИ энергия дуги значительно снижается по сравнению с уровнем для короткой дуги в этот момент, и это облегчает более быстрое протекание модифицированного процесса в течение следующего периода короткого замыкания. В целом ФИ необходим, поскольку отделение капли происходит при низких значениях тока.

**Основные и сварочные материалы.** В табл. 1, 2 приведен химический состав основного металла нержавеющей и конструкционной стали и их механические свойства, полученные при растяжении при комнатной температуре. В экспериментах использовали электроды EN 440: G 3 Si1 (OK Autrod 12.50) и EN 12072: G 19 12 3 L Si (OK Autrod 16.32) соответственно для конструкционных и нержавеющей сталей диаметром 1 мм, химический состав которых соответствовал химическому составу основного металла. Газ выбирали в зависимости от свариваемого металла. Защитные газы, использовавшиеся в ходе исследований, соответствовали требованиям стандарта EN 439 для сварки сталей. Защитный газ состава  $Ar + 8\% CO_2 + 0,03\% NO$  использовали для сварки конструкционного металла и  $Ar + 2\% CO_2 + 0,03\% NO$  — для сварки нержавеющей сталей. Расход защитного газа на всех этапах экспериментальных исследований составлял 15 л/ч.

**Параметры сварки.** В исследованиях рассматривали основные и вторичные регулируемые переменные. Основными регулируемыми переменными были скорость сварки, напряжение дуги, сварочный ток и ФИ. Вторичные регулируемые переменные сложнее точно измерить и контролировать. Они являются заданными величинами, обычно включаются в технологию сварки и определяют расстояние от торца до изделия (вылет), положение электрода и угол наклона электрода или мундштука.

Когда все переменные хорошо сбалансированы, сварщик может контролировать процесс переноса расплавленного металла и получать высококачественный металл шва.

#### Результаты экспериментов и их обсуждение.

Экспериментальные исследования проводили со стальными пластинами, которые обезжировали и зачищали щеткой из нержавеющей стали, что гарантирует минимальную и однородную толщину слоя оксида.

Для выполнения клеммного соединения в оснастке (рис. 2), включая задание параметров сварки, была необходима выработка методики. В начале один параметр изменяли, а другие сохраняли постоянными до тех пор, пока не было получено оптимальное влияние его в одной группе. Эту процедуру повторяли для различных параметров, пока не было получено высококачественное соединение. Качество соединения определяли путем ос-

Таблица 2. Механические свойства свариваемых сталей

Сталь	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	НВ	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Конструкционная	177	305	—	80	41
Нержавеющая	304	341	НВ 30 — 173	67	61

мотра валика на наличие любых видимых дефектов, например, непровара. Зазор между плавящимся электродом и изделием поддерживали на уровне приблизительно 1 мм в течение всего эксперимента. Параметры шва определяли воздушным зазором и геометрией соединения.

**Случай 1. Нулевой зазор в корне.** При использовании обычного способа МАГ установлено, что вылет электрода (отрезок электрода, который выступает из горелки) равен 6...7 мм, горелка перпендикулярна изделию и направлена по линии соединения (рис. 3, а). Угол наклона горелки очень важен при сварке углового шва в угловых соединениях. При сварке углового шва сварочную горелку необходимо держать таким образом, чтобы она разрежала пополам угол между пластинами и была направлена перпендикулярно линии шва.

При изменении параметров стало очевидно, что с помощью процесса сварки МАГ при скорости сварки 16 мм/с, скорости подачи 3,2 м/мин, напряжении 15,7 В, вылете электрода 6 мм, индуктивности, равной нулю, и интенсивности сварочного тока 102 А можно получить шов очень хорошего качества (рис. 3, в). Когда параметры были неизменными, а положение электрода менялось так, чтобы он был направлен на край кромки одной из пластин (рис. 3, б), качество шва было хорошее. Кроме того, следует отметить, что параметры, использованные для нулевого зазора в корне, можно использовать и для воздушных зазоров от 0,1 до 0,3 мм, что также позволяет получать швы хорошего качества. Если эти параметры не выбираются определенным образом, в шве появляются несплошности, включая непол-



Рис. 2. Сборка металлических пластин перед процессом сварки: 1 — опора для листов; 2 — листы; 3 — угловое соединение; 4 — прижим

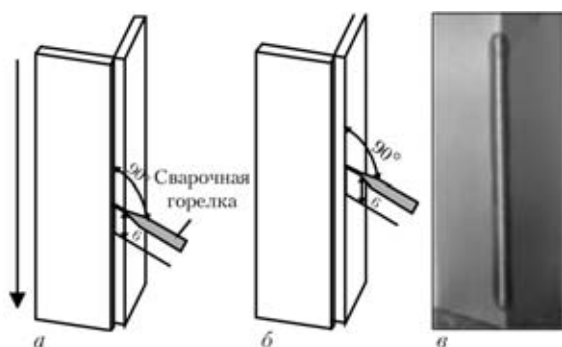


Рис. 3. Выполнение обычной МАГ сваркой углового соединения при нулевом корневом зазоре (а, б) и внешний вид соединения (в): а — горелка направлена по линии соединения; б — то же по кромке одной из пластин

ное проплавление, подрезы, прожоги и неправильную форму валика.

При увеличении скорости сварки необходимо также повышать скорость подачи проволоки так, чтобы в шве образовалась достаточно большая сварочная ванна. При задании низкого индуктивного сопротивления сварка была относительно холодной, что способствовало примерзанию электрода к сварочной ванне [4].

Новый способ сварки МАГ модифицированной короткой дугой при нулевом зазоре в корне показал, что вылет электрода должен быть 13 мм, угол горелки  $97^\circ$  при наклоне вперед и должен быть перпендикулярным оси шва (рис. 4, а).

При изменении параметров обнаружено, что шов хорошего качества можно получить на конструкционной стали (рис. 4, в) при скорости сварки 15 мм/с, скорости подачи проволоки 3,5 м/мин, напряжении 15 В, длине дуги 15 мм, токе сварки 95 А и ФИ, равном нулю. На нержавеющей стали хорошее качество соединения получено при скорости сварки 19 мм/с, скорости подачи 3,5 м/мин, напряжении 16 В, сварочном токе 101 А, длине дуги 20 мм, а ФИ можно поддерживать на уровне 0 или 20. Обычно при повышении тока напряжение дуги немного повышается.

В то же время сохранение значений переменных и изменение положения электрода (направление на кромку одной из пластин (рис. 4, б)) не повлияло на качество шва. Параметры, которые использованы для нулевых зазоров в корне, также пригодны для корневых зазоров, равных 0,1...0,3 мм.

Одним из важных параметров для получения стабильной дуги в новом модифицированном процессе сварки является вылет электрода. Установлено, что длина в пределах 12...14 мм на вылете электрода является оптимальной. Меньший вылет электрода приведет к горению дуги под изделием. В новом модифицированном процессе так же, как и при обычном процессе сварки МАГ, горелка подает сварочную проволоку для зажигания основной дуги на изделии. Для обеспечения ста-

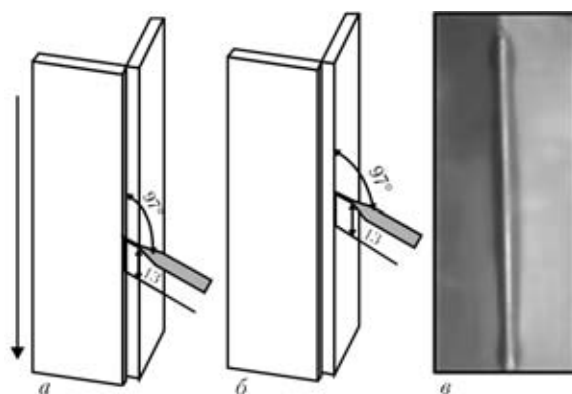


Рис. 4. Выполнение модифицированной МАГ сваркой углового соединения при нулевом зазоре в корне (а, б) и внешний вид соединения (в)

бильного зажигания дуги плавящийся электрод должен находиться достаточно близко от изделия — на расстоянии менее 1 мм. Важным параметром при сварке новым процессом МАГ с модифицированной короткой дугой, определяющим поведение и стабильность дуги, является также угол между горелкой и изделием. Установлено, что наиболее приемлемым является угол  $95...105^\circ$  в направлении вертикально вниз. Исследования, выполненные для определения влияния ФИ, показали, что при ФИ, равном нулю, шов выглядит намного лучше, чем при использовании отрицательного ФИ с нулевым зазором в корне. При отрицательной длине дуги и нулевом ФИ наблюдается незначительное влияние на качество шва. Когда длина дуги положительная, имеет место негативное изменение качества шва.

**Случай 2. Увеличение корневых зазоров.** Исследования, проведенные с помощью обычной сварки МАГ, показывают, что вылет должен быть равен 6 мм, угол наклона горелки перпендикулярен основному металлу, и она должна быть направлена по линии соединения или кромке одной из пластин (рис. 5, а, б).

В этом случае можно получить шов хорошего качества с увеличивающимся зазором в корне обычной сваркой МАГ, как показано на рис. 5, в, при скорости подачи 3,2 м/мин, скорости сварки

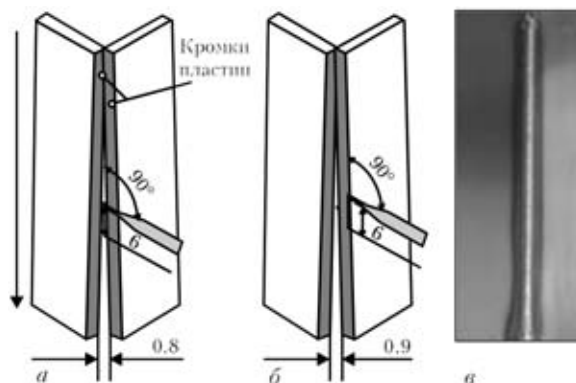


Рис. 5. Выполнение обычной МАГ сварки по увеличивающемуся зазору в корне (а, б) и внешний вид соединения (в)

13 мм/с, напряжении 15,7 В, нулевом индуктивном сопротивлении в цепи и силе тока 103 А. При изменении положения электрода так, чтобы он был направлен на кромку одной из пластин (рис. 5, б) хорошее качество швов обеспечивалось при корневом зазоре 0,8 мм, а также можно было заполнить зазоры в корне, равные 0,9 мм, но с отрицательным влиянием на качество шва.

Изменение направления шва на вертикальное, но снизу вверх при тех же параметрах вызывало отрицательное влияние на качество шва.

Индуктивность оказывала незначительное влияние или вообще не влияла на сварочную ванну при сварке тонких пластин с небольшим зазором в корне, а отрицательная индуктивность обеспечивала некоторое положительное влияние на качество формирования шва по сравнению с положительной индуктивностью при увеличении корневого зазора [1].

При применении нового способа сварки МАГ модифицированной короткой дугой вылет электрода и угол наклона горелки поддерживали равными соответственно 13 мм и 97°. Горелка была направлена либо по линии соединения, либо по кромке одной из пластин (рис. 6, а, б соответственно).

Когда плавящийся электрод направлен на линию соединения (рис. 6, а), то получали шов хорошего качества при корневом зазоре до 8 мм, но когда вылет электрода был направлен на кромку одного из листов (рис. 6, б), получение качественного шва, как на рис. 6, в с корневым зазором до 1,25 мм, было почти гарантировано при использовании следующих параметров: скорость сварки 13 мм/с, скорость подачи проволоки 3,7 м/мин, напряжение 16,5 В, длина дуги 15 мм, ток 104 А, и ФИ, равном 20. При ФИ, равном 20, дуга расходилась при горении, и это способствовало увеличению сварочной ванны, что позволило заполнить зазор в соединении.

Когда угол наклона горелки устанавливали в пределах 92...95° в направлении вертикально вниз от линии соединения изделия, а сварку проводили углом вперед или углом назад, то качество сварного соединения снижалось по сравнению с тем, когда угол наклона горелки увеличивался от 97 до 100°.

Хорошее качество шва достигалось при корневом зазоре от 0,7 до 0,8 мм при скорости сварки 13 мм/с и скорости подачи 3,5 мм/мин, когда электрод был направлен на линию сплавления основного металла соединения (рис. 6, а). При сохранении всех параметров неизменными и изменении положения электрода таким образом, чтобы он был направлен на

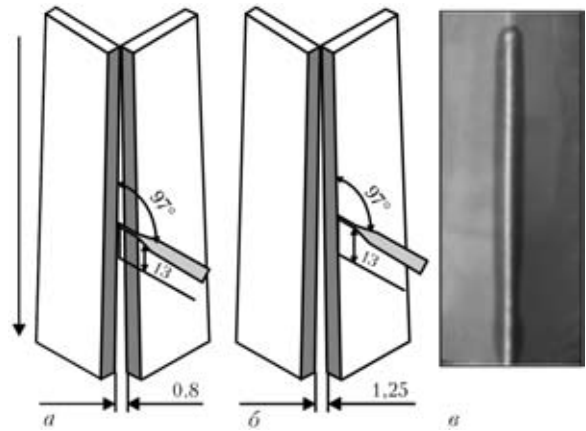


Рис. 6. Выполнение модифицированной МАГ сварки при увеличивающемся зазоре в корне (а, б) и внешний вид соединения (в)

кромку одной из металлических пластин, результаты в отношении качества шва были такими же, как и в том случае, когда электрод был направлен на линию соединения с корневым зазором от 0,7 до 0,8 мм.

**Случай 3. Корневой зазор в средней части.** При обычном способе сварки МАГ в этом случае вылет электрода также поддерживался равным 6 мм, горелка была перпендикулярна изделию и направлена либо на линию соединения, либо на кромку одного из изделий (рис. 7, а, в соответственно).

Когда расходимый электрод направлен на линию соединения, как показано на рис. 7, а, использовали следующие параметры: зазор в корне 0,8 мм, скорость сварки 13 мм/с, напряжение 15,7 В, ток 98 А и скорость подачи 3,3 м/мин, что при обычном процессе сварки МАГ привело к хорошему качеству шва (рис. 7, б). Когда расходимый электрод направлен на кромку одного из изделий (рис. 7, в), хорошее качество шва можно обеспечить (рис. 7, г) при корневом зазоре 1 мм, скорости сварки 13 мм/с, напряжении 15 В, токе 92 А и скорости подачи 3,0 м/мин.

При увеличении скорости сварки до 18 или 20 мм/с хорошее качество шва можно получить при напряжении 19,7 или 20 В при корневом за-

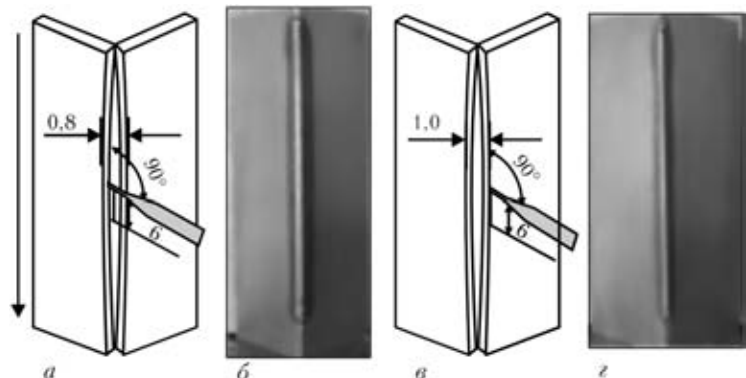


Рис. 7. Выполнение обычной МАГ сварки при корневом зазоре в середине пластин (а, в) и внешний вид соединений (б, г)

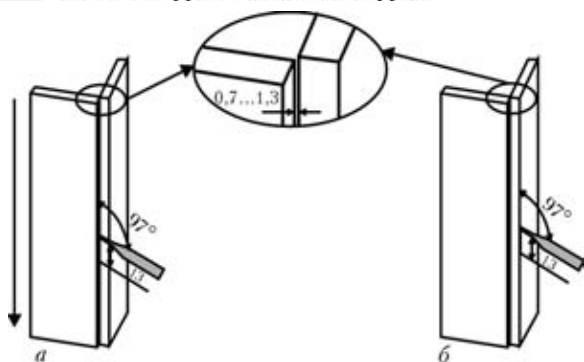


Рис. 8. Выполнение модифицированной МАГ сварки при корневом зазоре в середине пластин (а, б)

зоре соответственно 0,6 и 0,5 мм. Для получения хорошего внешнего вида шва индуктивность необходимо установить на нуль после повышения скорости сварки.

Проведен также эксперимент с новым процессом сварки МАГ модифицированной короткой дугой при перпендикулярном размещении листов (рис. 8). Угол наклона горелки поддерживали равным  $97^\circ$  в направлении вертикально вниз, вылет электрода — 13 мм, электрод направлен точно на линию соединения или кромку одной из пластин, как на рис. 8, а, б.

Когда расходуемый электрод направлен точно на кромку верхней пластины, а пластины находятся приблизительно на расстоянии  $0,7...1,1$  мм друг от друга (рис. 8, б), качество соединения является хорошим по сравнению с тем, когда расходуемый электрод направлен точно на линию соединения (рис. 8, а) с теми же параметрами: скорость сварки 15 мм/с, скорость подачи 3,7 м/мин, напряжение 15,6 В, длина дуги 15 мм, ток 101 А, а ФИ 20 при зазоре в корне 0,8 мм для конструкционной стали. При использовании того же оборудования для соединения нержавеющей стали установлено, что корневой зазор, равный 1,35 мм, можно сварить, как показано на схеме на рис. 8, а при скорости сварки 17 мм/с, скорости подачи 3,8 м/мин и напряжении 15,7 В. Длина дуги и ФИ поддерживались равными 20, а ток 104 А. Это обусловлено способностью сварочной машины непрерывно анализировать изменения в дуге и сравнивать их с предварительно заданным значением.

Когда параметры процесса сохранялись постоянными, а расходуемый электрод направлен на линию соединения, как показано на рис. 8, а, можно сварить только корневой зазор, равный 1,0 мм на нержавеющей стали. Корневой зазор, равный 1,25 мм, можно было сварить по схеме, показанной на рис. 8 при сварке конструкционной стали, когда угол наклона горелки увеличивается приблизительно до  $100^\circ$ , а электрод направлен на кромку верхней пластины.

При использовании нового процесса МАГ сварки модифицированной короткой дугой можно достичь очень высокой скорости сварки по сравнению с обычной сваркой МАГ благодаря тому, что этот процесс позволяет контролировать и корректировать время отделения капель металла валика шва от проволоки в сварочной ванне [5].

Схема манипулирования корневым зазором играет важную роль при заварке большого корневого прохода в угловом соединении, поскольку положение электрода относительно детали и пластин, установленных, как показано на рис. 8, позволяет заваривать большие зазоры в корне.

**Оценка рабочих характеристик сварного соединения.** Проведен визуальный осмотр и оценка внешнего вида сварного соединения для выявления таких дефектов сварки, как несплавление, свищи и непровары. Образцы для оптической металлографии были вырезаны поперек направления шва с последующей механической полировкой стандартными методами и травлением в 4 % нитале [6].

Макрошлифы, представленные в табл. 3, демонстрируют изменения в сечении шва при различных вариантах воздушных зазоров и для различных типов стали толщиной 1,5 мм. Форма макрошлифов показала, что параметры процесса для обеспечения хорошего качества соединений выбраны правильные. Форма валика также зависит от размещения изделий и положения горелки. Глубина и ширина расплавленной ванны очень важны для получения шва высокого качества.

**Оценка погонной энергии и тепловложения при сварке листового металла.** При сварке МАГ на электрод подается достаточное количество мощности (энергии, передаваемой в единицу времени). Тепловложение является важной характеристикой, поскольку влияет на скорость охлаждения сварочного соединения и соответственно на механические свойства и структуру шва и металла ЗТВ. Другой фактор связан с легированием сварочной ванны, особенно, если химический состав сварочной проволоки отличается от состава основного металла [5].

В ходе исследований скорость подачи проволоки и скорость сварки поддерживали постоянными на заданном отрезке изделия. Тепловложение  $Q$  определяли по формуле [4]

$$Q = \frac{60EI}{1000v},$$

где  $E$  — напряжение;  $I$  — сварочный ток;  $v$  — скорость сварки.

При обычном процессе МАГ использовали следующие параметры:  $v = 13$  мм/с = 780 мм/мин;  $E = 15,6$  В;  $I = 113,5$  А. Подставляя значения в формулу тепловложения, получаем  $Q = 0,109$  кДж/мм.



Т а б л и ц а 3. Макрошлифы поперечного сечения шва при различных процессах сварки МАГ пластин толщиной 1,5 мм

	Изменение зазора	Нулевой зазор (сварка по линии соединения пластин)	Нулевой зазор (сварка по кромке листа)	Корневой зазор 0,8 мм в середине листа	Корневой зазор 1 мм в середине листа
МАГ сварка	Макрошлиф				
	Изменение зазора	Нулевой зазор (сварка по линии соединения)	Нулевой зазор (сварка по линии соединения нержавеющей стали)	Увеличивающийся зазор до 1,25 мм на конструкционной стали	Увеличивающийся зазор до 1,35 мм на нержавеющей стали
Модифицированная МАГ сварка	Макрошлиф				

При использовании нового способа сварки МАГ модифицированной короткой дугой результат был следующим: при  $v = 13 \text{ мм/с} = 780 \text{ мм/мин}$ ;  $E = 14,9 \text{ В}$ ;  $I = 90 \text{ А}$ , получаем  $Q = 0,082 \text{ кДж/мм}$ .

Не все тепло, выделенное в дуге, попадает в основной металл. Часть энергии теряется на излучение, а часть используется для плавления электрода. Потери составляют от 20 до 75 % [4].

Таким образом, новый процесс МАГ сварки модифицированной короткой дугой позволяет сваривать конструкционные и нержавеющие стали в угловом соединении в положении вертикально вниз;

схема изменения корневого зазора и положение вылета электрода существенно влияют на качество соединения при корневых зазорах больше 0,5 мм;

новый способ характеризуется умеренным тепловложением (0,082 кДж/мм), которое приблизительно на 25 % ниже, чем при обычной сварке МАГ;

при модифицированном способе МАГ можно выполнять сварку по большим корневым зазорам и при более высокой скорости сварки, причем вылет электрода составляет от 12 до 14 мм, угол наклона горелки — в пределах 95...105° по вертикали при сварке углом вперед;

при направлении электрода на кромку одной из металлических пластин можно заваривать

большие корневые зазоры с хорошим качеством по сравнению с тем, когда электрод устанавливается по линии соединения основного металла;

низкая скорость подачи проволоки при новом способе приводит к ее обратному оплавлению, а высокая — к угасанию дуги при коротком замыкании;

экспериментально установлена возможность выбора параметров процесса, обеспечивающего высокое качество металла швов;

новая модифицированная технология сварки короткой дугой является альтернативой для всех автоматизированных или роботизированных процессов сварки МАГ при соединении тонких листов.

1. Kah P. C., Martikainen J. Welding of sheet metal using modified short arc MIG/MAG welding process (FastROOT) // Proc. of 3rd Intern. conf. on total welding management in industrial application, Lappeenranta, Finland, 2007.
2. Uusitalo J. Modified short arc process — A new way of welding root passes // Ibid.
3. Murugan Vel V., Gunaraj V. Effect of process parameters on angular distortion of gas metal arc welded structural steel plates // Welding J. — 2005. — № 11. — P. 165–171.
4. Howard B. C. Modern welding technology // American Welding Society. — 2002. — P. 123, 134, 135, 142, 151, 193.
5. Uusitalo J. The WiseRoot welding process for root passes welding // Symp. on Joining of Materials, SOJOM 2008. — P. 109–117.
6. EN 10112-1. Welding recommendation for welding of metallic materials. — 2001.

The influence of parameters of vertical downward consumable electrode welding by a modified short arc compared to regular MAG welding when joining two sheets by a fillet weld, is described. It is established that the process of MAG welding by a modified short arc is characterized by an approximately 25 % lower heat input than the regular MAG welding. It was also noted that the speed of welding by a modified short arc is 10 % higher than that at regular MAG welding.

Поступила в редакцию 10.02.2009



## ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРОВ ПОСЛЕ 20–25 ЛЕТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

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

Приведены результаты экспериментальных исследований остаточного ресурса работоспособности заводских вертикальных стыковых сварных соединений стали 16Г2АФ стенки рулонированных резервуаров после 20...25 лет эксплуатации. Изменений механических свойств со временем, включая хладостойкость, не выявлено. Установлено, что исследуемые сварные соединения имеют остаточный ресурс работоспособности, достаточный для их дальнейшей эксплуатации в течение не менее 20-ти последующих лет.

*Ключевые слова:* резервуары для хранения нефти, сталь 16Г2АФ, заводские сварные стыковые соединения, остаточный ресурс

В ОАО «Укртранснефть» с 1984 г. в эксплуатации находятся четыре резервуара с плавающей крышей для хранения нефти вместимостью по 50 тыс. м<sup>3</sup>. Резервуары построены с применением рулонных заготовок, сваренных на заводе встык двусторонней автоматической сваркой под слоем флюса из отдельных листов 1,5×6,0 м. Нижние пояса стенки толщиной 17...10 мм выполнены из высокопрочной стали 16Г2АФ (С440). Резервуары эксплуатируются в условиях малоциклового нагружения. Отработав нормативный срок службы, равный 20 годам [1], они в большинстве случаев требуют проведения капитальных ремонтов. В соответствии с действующими нормами Украины [1] необходимо, чтобы резервуары после капитального ремонта имели гарантированный ресурс работоспособности не менее 20 лет при максимальном, технически возможном уровне налива нефти.

С учетом фактического технического состояния резервуаров в процессе капитального ремонта в большинстве случаев замене подлежат днище, центральная часть днища плавающей крыши, весь первый пояс и вертикальные монтажные стыки стенки. После ремонта срок эксплуатации резервуаров в основном определяется остаточным ресурсом вертикальных стыковых сварных соединений стенки.

Оценка ресурса эксплуатации резервуаров после капитального ремонта должна рассматриваться с позиций обеспечения работоспособности в условиях циклического и статического нагружения. Можно принять, что заводские стыковые соединения стенки за прошедшие 20 лет эксплуатации резервуаров прошли  $20 \cdot 300 = 6 \cdot 10^3$  циклов слива-налива нефти, где 300 — количество циклов

за 1 год [2]. Естественно, в этом случае возникает вопрос об остаточном ресурсе работоспособности заводских сварных соединений в течение последующего гарантированного срока эксплуатации резервуаров.

В качестве исходных сварных соединений приняты соединения, вырезанные из первого пояса резервуара в процессе его ремонта. Текущие (конечные) сварные соединения получены в лабораторных условиях путем искусственного нагружения исходных соединений на машинах-пульсаторах до количества циклов  $N = 1,2 \cdot 10^4$  при амплитуде напряжений  $\sigma = (0,1...0,67)\sigma_T$ . Полученные образцы в определенной мере отражают работу стенки резервуаров после их эксплуатации в течение последующих 20 лет в системе магистральных нефтепроводов [2].

Расчет на выносливость стыкового сварного соединения для стали класса прочности С440, выполненный в соответствии с указаниями [3] при количестве циклов  $N = 10^5$  показал, что максимальное допустимое напряжение для данного сварного соединения  $\sigma = 546$  МПа при нормативном значении  $\sigma_T = 440$  МПа.

В качестве дополнительной оценки полученных данных относительно прогноза долговечности исходного сварного соединения проведено испытание четырех образцов из этого сварного соединения с указанной выше амплитудой напряжений. Испытания показали, что на базе  $N = 10^5$  циклов нагружения образование визуально наблюдаемых трещин не выявлено. Следовательно, с позиций циклического нагружения ресурс эксплуатации резервуаров после капитального ремонта в течение последующих 20 лет обеспечивается.

Перечень подлежащих к выполнению испытаний и исследований для оценки возможного снижения механических свойств сварных соеди-

Таблица 1. Перечень выполненных испытаний и исследований исходных и текущих сварных соединений стали 16Г2АФ

Наименование исследований и испытаний	Исходные сварные соединения			Текущие сварные соединения		
	ОМ	Шов	ЗТВ	ОМ	Шов	ЗТВ
Входной радиографический контроль	+	+	+	+	+	+
Определение химического состава	+	-	-	-	-	-
Определение механических характеристик	$\sigma_T, \sigma_B, \delta_5, \psi$	$\sigma_B$	$\sigma_B$	$\sigma_T, \sigma_B, \delta_5, \psi$	$\sigma_B$	$\sigma_B$
Металлографические исследования: исследование микроструктуры; замеры твердости HV	+	+	+	-	+	+
Определение ударной вязкости KCU и KCV (T = +20 °C; 0 °C; -20 °C; -40 °C)	+	+	+	+	+	+

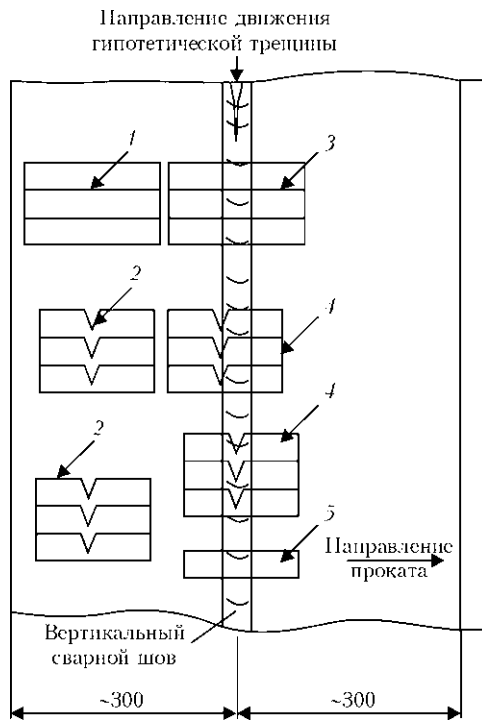


Рис. 1. Схема вырезки образцов из сварного стыка: 1, 3 — образцы для прочностных испытаний соответственно основного металла и сварного соединения; 2, 4 — образцы для определения ударной вязкости основного металла, а также металла шва и ЗТВ с круглым (KCU) и острым (KCV) надрезами; 5 — образцы для металлографических исследований

нений приведен в табл. 1, схема вырезки образцов — на рис. 1.

До начала исследований выполнен радиографический контроль качества сварных соединений на четырех пластинах, принятых в качестве исходного и текущего сварных соединений. Недопустимые дефекты с учетом норм [4] не обнаружены. Механические свойства листового проката из высокопрочной стали 16Г2АФ, поставленного на завод в 1982 г. для изготовления рулонных заготовок, должны были соответствовать нормам [3, 5].

Как видно из табл. 2, химический состав стали 16Г2АФ соответствует ГОСТ 19282–73 [5] и одинаковый для исходных и текущих образцов.

В табл. 3 приведены результаты испытаний исходного и текущего листового проката.

Результаты испытаний на растяжение стыковых сварных соединений без снятия усиления следующие: для исходного соединения  $\sigma_B = 640,5...672,3$ ; текущего —  $630,1...650,0$  МПа. Местом разрушения является основной металл. Проведенные испытания показали, что прочностные свойства листового проката удовлетворяют требованиям ГОСТ 19282–73 ( $\sigma_B \geq 590$  МПа) [5].

Результаты испытаний исходного и текущего сварных соединений (основной металл, металл

Таблица 2. Химический состав исходного и текущего листового проката стали 16Г2АФ, мас. %

Вид листового проката	C	Si	Mn	Ni	V	S
Исходный образец	0,16	0,39	1,41	0,22	0,11	0,024
Текущий образец	0,18	0,47	1,55	0,21	0,10	0,031
ГОСТ 19282–73	0,14...0,20	0,3...0,6	1,3...1,7	≤ 0,3	0,08...0,14	≤ 0,035

Таблица 3. Механические свойства исходного и текущего листового проката

Вид листового проката	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
Исходный образец	490,8...507,7	640,0...663,0	29,0...30,6	65,1...69,1
Текущий образец	421,3...513,2	663,4...680,4	27,6...28,2	68,6...70,8
ГОСТ 19282–73	≥ 440	≥ 590	≥ 20	—



шва и ЗТВ) на ударную вязкость представлены на рис. 2. Отметим, что в нормативе [3], который действовал во время проектирования резервуаров и изготовления рулонных заготовок (1982–1984 гг.), а также в действующем в настоящее время нормативе [6], для листового проката стали 16Г2АФ толщиной 10...32 мм требуется значение ударной вязкости ( $KCU$ ) не менее 40 Дж/см<sup>2</sup> при  $T = -40$  °С. Учитывая, что хладостойкость листового проката нормы России [7] оценивают более жестко, применяя критерий ударной вязкости  $KCV$ , для исследуемых сварных соединений выполнены дополнительно испытания образцов и с V-образным надрезом.

Анализ результатов испытания образцов на ударную вязкость ( $KCU$ ) не выявил ее изменение в текущем сварном соединении по сравнению с исходным. Отмечено наличие достаточно большого разброса значений, что характерно для стали 16Г2АФ. Установлено, что основной металл, шов и металл ЗТВ в исходном и текущем состоянии удовлетворяют требованиям ударной вязкости ( $KCU$ ) норм [3], по которым они запроектированы.

Испытания на ударную вязкость образцов с острым надрезом ( $KCV$ ) также не выявили изменение свойств исходного и текущего сварных соединений. Однако для обоих сварных соединений значения  $KCV$  для шва и ЗТВ не удовлетворяли требованиям норматива [7]. Отметим, что с учетом характеристик свариваемости и хладостойкости действующими нормативами [1, 7] сталь 16Г2АФ не рекомендуется к применению для нефтяных резервуаров и может быть успешно заменена сталями нового поколения 10Г2ФБ [7] или 06Г2Б (С440) [8].

В дополнение к полученным результатам относительно механических свойств сварных соединений стали 16Г2АФ выполнены металлографические исследования исходных и текущих сварных соединений. Основной металл представляет собой ферритно-перлитную смесь с ярко выраженной структурой проката. Балл зерна металла соответствует № 8, твердость феррита  $HV 0,05 = 210...221$ , перлита —  $HV 0,05 = 244$ . Основной металл и ЗТВ

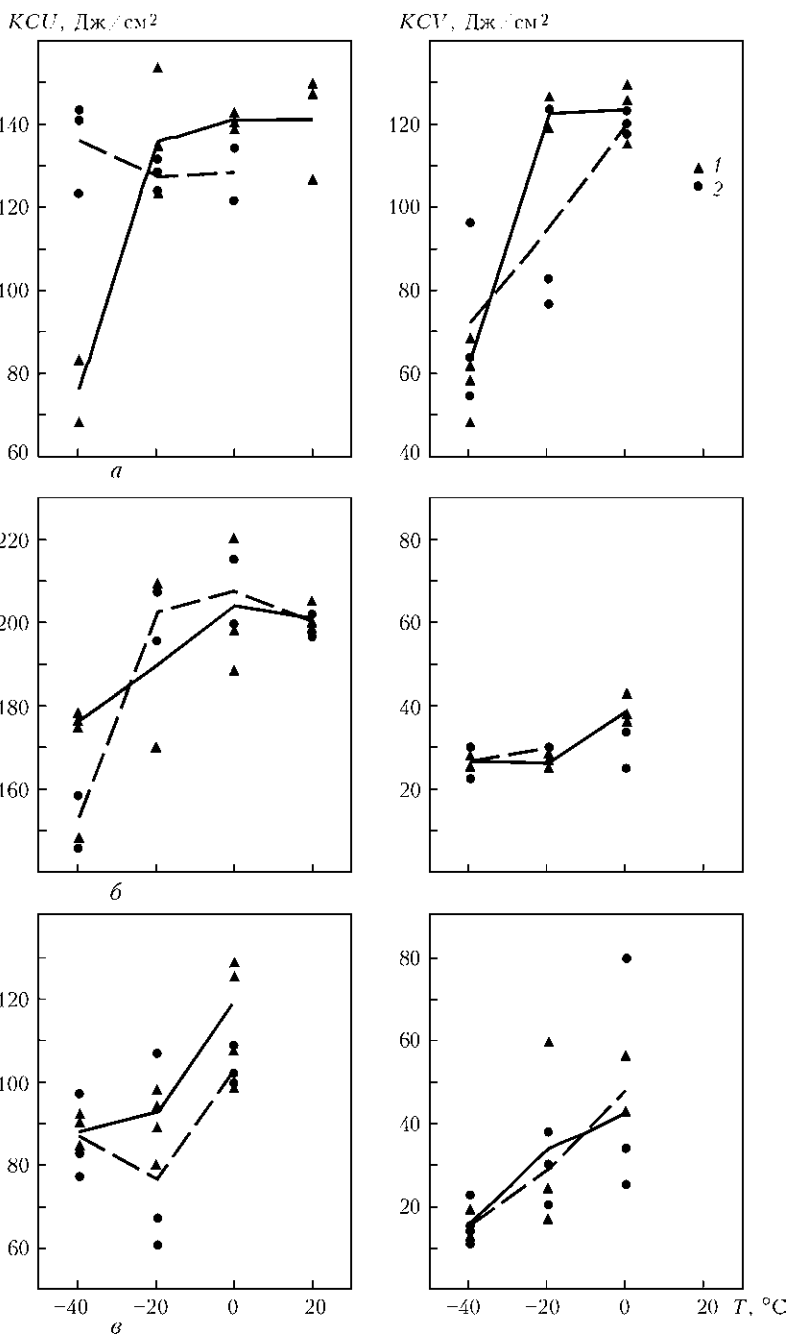


Рис. 2. Результаты испытаний образцов исходного (1) и текущего (2) сварного соединения из стали 16Г2АФ на ударную вязкость с круглым ( $KCU$ ) и острым ( $KCV$ ) надрезами: а — основной металл; б — металл шва; в — ЗТВ

сварного соединения отличаются наличием значительного количества сульфидных строчечных включений как вдали от шва, так и в непосредственной близости от линии сплавления.

Во время металлографических исследований выполнена и косвенная оценка трещиностойкости сварных соединений с учетом наличия в швах микровключений шлака и несплавлений в околошовной зоне (рис. 3, 4). Из результатов исследований видно, что после искусственного малоциклового нагружения, равнозначного 20 годам эксплуатации резервуаров, на концах трещиноподобных микровключений зарождения новых и

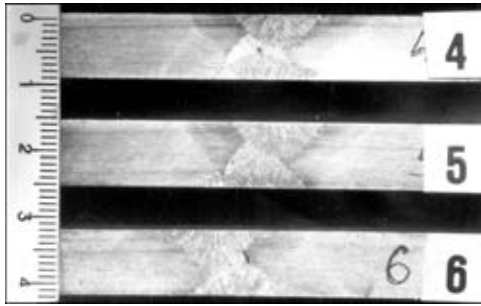


Рис. 3. Макрошлифы сварных стыковых заводских соединений стали 16Г2АФ с несплавлениями и включениями шлака

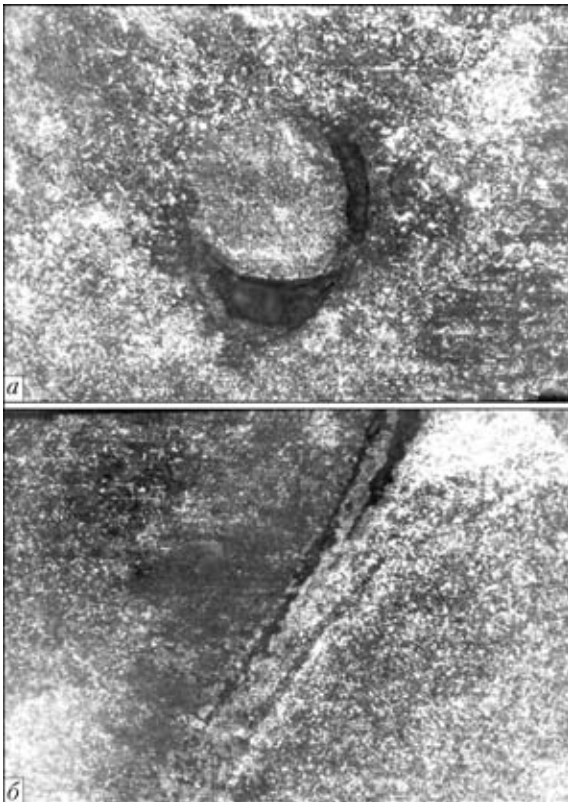


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 100$ ) металла шва (а) и околошовной зоны текущего (б) сварного соединения (после  $N = 1,2 \cdot 10^4$  циклов) стали 16Г2АФ

развития существующих микротрещин не выявлено. Однако наличие в сварных соединениях трещиноподобных микровключений и непроваров дает основание предполагать, что в швах могут быть и подобные макровключения, развитие которых может наблюдаться со временем. Для обес-

печения гарантированной работоспособности таких сварных соединений предлагается при каждом полном обследовании резервуаров выполнять ультразвуковой или радиографический контроль качества заводских вертикальных швов с наложением только вертикальных рентгеновских пленок на пяти нижних поясах стенки.

Необходимость выполнения предлагаемого объема контроля подтверждается выводами по обследованию ряда резервуаров вместимостью 20 и 50 тыс. м<sup>3</sup>. Анализ результатов показывает, что при каждом очередном контроле заводских швов выявляются недопустимые дефекты, подлежащие исправлению.

### Выводы

1. Заводские вертикальные соединения стенки резервуаров, построенных с применением рулонных заготовок из стали 16Г2АФ, после 20–25 лет эксплуатации в режиме малоциклового нагружения сохранили высокую работоспособность и их остаточный ресурс обеспечивает дальнейшую безопасную эксплуатацию резервуаров в течение не менее 20 лет, что отвечает требованиям норм Украины для новых резервуаров.

2. Во время периодического полного обследования резервуаров необходимо выполнять ультразвуковой и радиографический контроль вертикальных заводских швов не менее, чем на пяти нижних поясах стенки.

1. ВБН В.2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів. — Чинний з 01.10.1994.
2. РД 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04. Нормы проектирования стальных резервуаров для хранения нефти объемом 1000–5000 куб. м. — Введ. 21.06.04.
3. СНиП II-23-81. Стальные конструкции. — Введ. 01.01.1982.
4. СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции. — Введ. 01.06.1988.
5. ГОСТ 19282-73. Сталь низколегированная толстолистовая и широкополосная универсальная. — Введ. 01.01.75.
6. ГОСТ 19281-89. Прокат из стали повышенной прочности. — Введ. 01.01.89.
7. ПБ 03-605-03. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. — Введ. 09.07.2003.
8. ТУ У 27. 1-05416923-085:2006. Прокат листовой свариваемый из качественной стали классов прочности 355-590 для машиностроения. — Введ. 02.04.2007.

The paper presents the results of experimental investigations of the residual service life of shop vertical butt welded joints of 16G2AF steel on a coiled tank wall after 20-25 years of operation. No changes of mechanical properties with time were found, including their cold resistance. It is established that the studied welded joints have the residual service life sufficient for their further operation for not less than 20 more years.

Поступила в редакцию 16.03.2009



# НОВАЯ ПОРОШКОВАЯ ПРОВОЛОКА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ ЭФФЕКТ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**Л. С. МАЛИНОВ**, д-р техн. наук, **В. Л. МАЛИНОВ**, канд. техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь),  
**Л. Н. ОРЛОВ**, канд. техн. наук, **А. А. ГОЛЯКЕВИЧ**, инж. (ООО «ТМ ВЕЛТЕК», г. Киев)

Приведены сведения о новой порошковой проволоке, не содержащей дорогих легирующих элементов. Применение проволоки обеспечивает получение в наплавленном металле структуры метастабильного аустенита и реализации деформационного мартенситного превращения в процессе эксплуатации. В результате достигается существенное повышение долговечности наплавленных деталей. Новая проволока может найти широкое применение при изготовлении быстроизнашивающихся изделий различного назначения.

*Ключевые слова*: дуговая наплавка, порошковая проволока, наплавленный металл, метастабильный аустенит, деформационное мартенситное превращение, самозакалка при нагружении

В настоящее время проблема ресурсосбережения приобретает все большую актуальность. Одним из направлений ее решения является повышение долговечности деталей, восстанавливаемых автоматической электродуговой наплавкой, в частности, тяжело нагруженных колес кранов металлургических цехов. Значительное повышение ресурса восстанавливаемых деталей достигается с помощью наплавочных материалов. Благодаря им обеспечивается получение в наплавленном металле структуры сильноупрочняющегося метастабильного аустенита, который превращается в мартенсит под влиянием деформации при нагружении в процессе эксплуатации, что классифицируется как эффект самозакалки при нагружении [1]. Первые наплавочные материалы, обеспечивающие получение в наплавленном металле метастабильного аустенита, разработаны М. И. Разиковым с коллективом сотрудников в начале 1960-х годов [2] на основе кавитационностойкой стали 30X10Г10, созданной И. Н. Богачевым и Р. И. Минцем [3]. Эти наплавочные материалы применяли главным образом для повышения долговечности деталей гидроагрегатов, а позднее для наплавки различных быстроизнашивающихся деталей, работающих в условиях сухого трения, в частности, крановых колес. Особенностью наплавки такими материалами является то, что при несоблюдении ряда условий может произойти охрупчивание наплавленного слоя из-за образования аустенитно-мартенситной структуры, которая характеризуется высокой твердостью. С целью ис-

ключения этого наплавку следует выполнять при относительно малых значениях тока, напряжения на дуге, но с повышенной скоростью, образованием узких валиков, их прерывистостью, что значительно усложняет технологию. Кроме того, наплавленный металл плохо обрабатывается резанием [4] вследствие интенсивного образования мартенсита под воздействием инструмента (мартенсит деформации). В условиях трения при высоком давлении износостойкость высоколегированного наплавленного металла системы Fe-Cr-Mn в значительной степени определяется способностью к упрочнению самого аустенита, которая зависит от содержания в нем углерода и интенсивности образования мартенсита деформации [5]. Важно отметить, что за счет выбора рационального состава наплавочного материала и режима термообработки после наплавки, можно оптимизировать развитие мартенситного превращения при нагружении, поскольку в этом случае удастся достичь наиболее высокого уровня износостойкости наплавленных деталей.

Разработана новая порошковая проволока ВЕЛТЕК-Н285С (Fe-Cr-Mn), которая в значительной степени лишена указанных недостатков. Соотношение углерода, хрома и марганца выбрано таким, что непосредственно после наплавки достигается повышенная стабильность аустенита наплавленного металла по отношению к  $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращению по сравнению с известными наплавочными материалами данного типа. По этой причине существенно упрощается технология наплавки и улучшается обрабатываемость резанием, что способствует более широкому применению разработанной порошковой проволоки. Необходимая интенсивность протекания деформа-

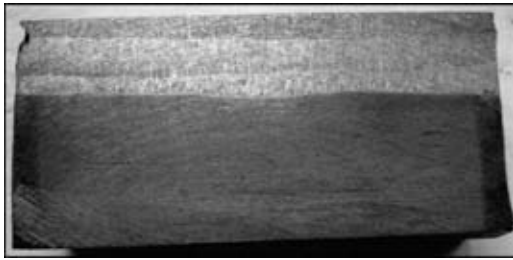


Рис. 1. Макроструктура (×16) наплавленного металла, полученного при использовании новой порошковой проволоки

ционного мартенситного превращения при эксплуатации достигается в результате термообработки, которая осуществляется после наплавки для снятия внутренних напряжений.

Оптимальный режим наплавки проволокой диаметром 3,6 мм следующий:  $I = 350...400$  А;  $U = 35...40$  В;  $v_n = 40...45$  м/ч. Использовали флюсы АН-26 и РЕКОРД SK EN-760. При этом обеспечивается хорошее формирование слоев наплавленного металла и соединение их между собой, а также с основным металлом. Непровары, шлаковые включения и трещины отсутствуют (рис. 1). Отделимость шлаковой корки хорошая. При наплавке разработанной порошковой проволокой слои наплавленного металла имеют аустенитную структуру с дисперсными карбидами, которые располагаются внутри зерен (рис. 2). Микротрещины в наплавленном металле не образуются. Вблизи линии сплавления с основным металлом (сталь 65Г) обнаружена структура аустенита с тро-

оститной сеткой. Основной металл вблизи линии сплавления имеет трооститную структуру.

Измерения твердости по сечению показали, что вблизи поверхности наплавленного металла она составляет  $HB\ 217...220$ , в средней части —  $HB\ 230...240$ , а у переходной зоны увеличивается до  $HB\ 280...300$ , что является следствием перераспределения углерода, хрома и марганца в зоне сплавления с основным металлом.

Как следует из результатов испытаний, износостойкость металла, наплавленного разработанной порошковой проволокой, при трении скольжения по схеме колодка-ролик и абразивном воздействии практически не отличается от таковой при наплавке проволокой Нп-30Х10Г10Т (ГОСТ 10543-98) и значительно превышает ее при использовании проволоки ПП-Нп-18Х1Г1М (ГОСТ 26101-84), Св-12Х13 и Св-06Х18Н9Т (ГОСТ 224-70) (таблица). Применение разработанной порошковой проволоки системы Fe-Cr-Mn обеспечивает получение структуры метастабильного, значительно упрочняющегося при наклепе аустенита. Степень его упрочнения такая же, как и при использовании проволоки Нп-30Х10Г10Т, но максимальная твердость достигается за время в 1,5...2,0 раза большее, что обусловлено меньшей интенсивностью деформационного мартенситного превращения при применении новой проволоки. Следствием этого является более длительное протекание процесса релаксации напряжений наряду с упрочнением, что затрудняет образование

**Относительная износостойкость металла, наплавленного проволоками, применяемыми в промышленности, и разработанной порошковой проволокой**

Наплавочный материал	Режим термообработки	Относительная абразивная износостойкость	Относительная износостойкость в условиях трения скольжения
ПП-Нп-18Х1Г1М	Наплавка + отжиг при 550 °С (1 ч)	1,0	1,0
Св-12Х13	То же	1,2	1,3
Св-06Х18Н9Т	»	0,6	0,7
Разработанная порошковая проволока	Наплавка + отжиг при 600 °С (1 ч)	2,3	3,2

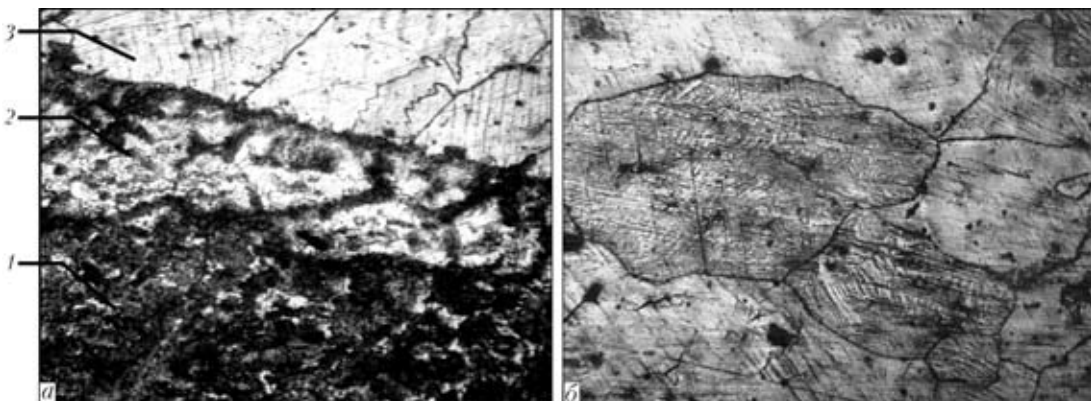


Рис. 2. Микроструктуры (×550) металла, наплавленного разработанной порошковой проволокой: а — основной металл и переходной слой (1 — основной металл — троостит; 2 — переходной слой — аустенит с трооститной сеткой; 3 — наплавленный аустенитный слой); б — аустенитная структура поверхностного слоя

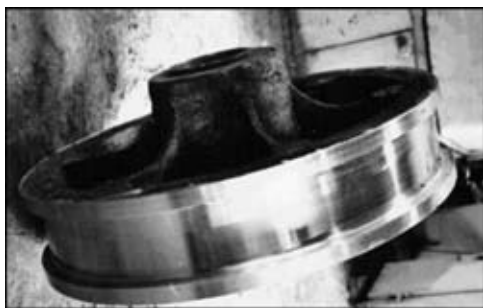


Рис. 3. Внешний вид наплавленного и обработанного колеса

и развитие трещин [6]. После отжига при температуре 600 °С, применяемого после наплавки для снятия внутренних напряжений, в аустените обнаруживается множество дисперсных карбидов, которые также способствуют повышению износостойкости. Согласно данным рентгеновского анализа, содержание мартенсита деформации на изнашиваемой поверхности после отжига наплавленного металла в 1,5...2,0 раза больше, чем без него (30...35 мас. %), что свидетельствует о его частичной дестабилизации.

Длительные промышленные испытания крановых колес, наплавленных разработанной порошковой проволокой, обеспечивающей эффект самозакалки при эксплуатации, подтвердили результаты лабораторных исследований и показали увеличение долговечности этих деталей более чем в 3 раза по сравнению с колесами, восстановленными применяемой в промышленности проволокой ПП-Нп-18Х1Г1М. Достигнутый результат был аналогичен полученному при использовании проволоки Нп-30Х10Г10Т, однако новый материал обеспечивает также несомненные технологические преимущества при наплавке. Измерение твердости рабочей поверхности колес, наплавленных новой порошковой проволокой, показало, что в процессе эксплуатации она возросла с  $HV\ 217...220$  до  $450...470$ . Это свидетельствует о реализации эффекта самозакалки в наплавленном металле в процессе работы колес, и обеспечивающей им повышение долговечности. При увеличении износостойкости крановых колес не происходит повышенного износа рельсов.

Проведение механической обработки восстановленных новой порошковой проволокой крановых колес с использованием инструмента, оснащенного твердыми сплавами, технических трудностей не вызывает. На рис. 3 представлен внешний вид наплавленного и обработанного колеса. Следует заметить, что наплавленный новой

проволокой металл обрабатывается труднее, чем при использовании проволоки ПП-Нп-18Х1Г1М. По степени обрабатываемости он близок к металлу, наплавленному проволокой Св-06Х18Н9Т.

Таким образом, разработанная порошковая проволока, обеспечивающая получение в наплавленном металле структуры метастабильного аустенита, упрочненного дисперсными карбидами, отличается хорошей технологичностью при наплавке. Использование новой порошковой проволоки благодаря эффекту самозакалки при эксплуатации позволяет существенно повысить долговечность восстанавливаемых деталей.

Разработанный наплавочный материал может иметь широкий спектр применения. Его можно использовать не только для восстановления крановых колес, но и колес железнодорожного подвижного состава предприятий, вагонеток, применяемых в карьерах, различного рода роликов, цапф сталеразливочных ковшей, быстроизнашивающихся изделий, работающих в слабоагрессивных средах, например, плунжеров гидропрессов, клапанов запорной арматуры и многих других изделий, восстанавливаемых в настоящее время низкоуглеродистыми наплавочными материалами различной степени легирования. Экономическая эффективность в данном случае определяется затратами (материальными, энергетическими, трудовыми, простоями оборудования), которые значительно превышают стоимость применяемой проволоки.

1. Багачев И. Н., Минц Р. И. Кавитационное разрушение железоуглеродистых сплавов. — М.; Свердловск: Машгиз, 1959. — 111 с.
2. Разиков М. И., Ильин В. П. Сварка и наплавка кавитационной стали марки 30Х10Г10. — М.: НИИМАШ, 1964. — 35 с.
3. Багачев И. Н., Минц Р. И. Повышение кавитационно-эрозионной стойкости деталей машин. — М.: Машиностроение, 1964. — 142 с.
4. Опыт совместных работ ОАО «Запорожсталь» и ОП «Реммаш» в разработке и внедрении новых наплавочных материалов / В. В. Тарасенко, Г. В. Хоменко, В. И. Титаренко, А. В. Титаренко // Сб. работ 2-й науч.-практ. конф. «Модернизация и переоснащение предприятий. Эффективные технологии ремонта и восстановления деталей» (в рамках Международного промышленного форума «Україндустрия-2006»), г. Днепропетровск, 11 окт. 2006 г. — Днепропетровск, 2006. — С. 39–43.
5. Малинов Л. С., Малинов В. Л. Марганецсодержащие наплавочные материалы // Автомат. сварка. — 2001. — № 8. — С. 34–37.
6. Малинов Л. С., Малинов В. Л. Экономнолегированные сплавы с мартенситными превращениями и упрочняющие технологии. — Харьков: ИНЦ ХФТИ, 2007. — 352 с.

The paper gives information on a new flux-cored wire, not containing expensive alloying elements in its composition. Wire application ensures production of a metastable austenite structure in the deposited metal and realization of deformation martensite transformation during operation. This results in an essential increase of the surfaced part fatigue life. New wire can become widely accepted in manufacture of quick-worn parts for the most diverse applications.

Поступила в редакцию 13.01.2009



## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ НОУ-ХАУ

**Puls-Mix = СМТ + импульсная дуга.** *Полезные свойства процесса СМТ проявляются в относительно ограниченном диапазоне мощности. Puls-Mix — это комбинация метода СМТ со сваркой импульсной дугой, при которой теоретически можно чередовать любое количество тактов каждого отдельного метода. При этом важно то, что сохраняется принцип способа СМТ и его система регулирования. Он предполагает непосредственный механический контакт реверсивной проволоки с поверхностью изделия, при этом длина дуги равна нулю. Далее проволока подается в пределах указанного расстояния или времени назад, потом снова вперед. Точка поворота соответствует длине дуги. Этот способ значительно улучшает результаты по сравнению с обычным методом изменения напряжения дуги, поскольку такие пограничные условия, как загрязненная поверхность, больше не влияют на результат. Схема управления позволяет добавлять между отдельными тактами СМТ согласованные по мощности, более высокие импульсы метода сварки импульсной дугой. Таким образом, Puls-Mix может достичь максимальной мощности метода сварки импульсной дугой. Существенны две физические величины — длина дуги и подача тепла, а также результирующий эффект стабильности процесса. В случае процесса СМТ достигается минимальная подача тепла по сравнению с методом сварки короткой дугой при одинаковой мощности плавления. Сочетание с методом сварки импульсной дугой снимает прежнее ограничение по мощности. Puls-Mix предоставляет сварщику возможность выбора любого уровня мощности в диапазоне процесса СМТ и импульсной дуги. Пользователь может плавно настраивать степень подачи тепла в общем диапазоне мощности СМТ и импульсной дуги. Благодаря этому он может целенаправленно менять, например, зону влияния перемешивания материала, сечение и форму шва.*

Качество соединений является очень важным с точки зрения безопасной и надежной эксплуатации различного оборудования и транспортных средств. Заказчики часто получают от поставщиков соединенные компоненты или узлы, прошедшие отбор на соответствие с учетом критериев оценки качества. Владелец сварочной мастерской Бернд Русс из местечка Могендорф (земля Рейнланд-Пфальц) занимается разработкой инновационных решений для особо сложных видов соединений металлов еще до того, как возникает конкретная проблема. Поэтому в качестве решения задач, которые ставят перед ним заказчики, Русс предлагает заранее продуманный и испытанный вариант. Приведенные ниже четыре примера показывают, как этот эксперт по сварочному производству благодаря новым идеям и инновациям находит оптимальные решения для своих заказчиков.

В сварочной мастерской HABS, в которой работают 34 сотрудника, заготовки превращают в готовые детали. Стратегия предприятия неизменно базируется на высоких технологиях в сфере электродуговой сварки и пайки. Концепцию предприятия можно охарактеризовать как «актуальность плюс», или «более чем современно», поскольку Русс следит за разработками в области термической обработки соединений, и все самые последние достижения конструкторских бюро на-

ходят практическое применение в его компании. В 2005 г. почти сразу же после появления на рынке технологии СМТ этот специалист по сварным соединениям был в числе первых представителей среднего бизнеса, которые начали ее применять. Он принял смелое инвестиционное решение, так как заранее предвидел конкретные возможности применения революционной технологии соединения, при которой практически не образуются брызги. Минимальное коробление материала и отличное перекрытие зазоров являются дополнительными преимуществами «холодного» процесса СМТ. И эти свойства позволяют мастерской HABS решать практические задачи. Сегодня 38-летний Бернд Русс почти на три года опережает своих конкурентов в части ноу-хау в области применения процесса СМТ. К нему обращаются представители ведущих предприятий отрасли машино- и автомобилестроения, когда им нужно решить сложные задачи, связанные с получением качественных соединений.

Основываясь на собственном опыте, Русс и сотрудники применяют процесс Puls-Mix — чередование метода СМТ с импульсной дугой (рис. 1). Отличительными особенностями этого варианта прежде всего являются оптимизированные характеристики проплавления и в то же время максимально высокая стабильность дуги и процесса в целом, а также типичное для метода СМТ

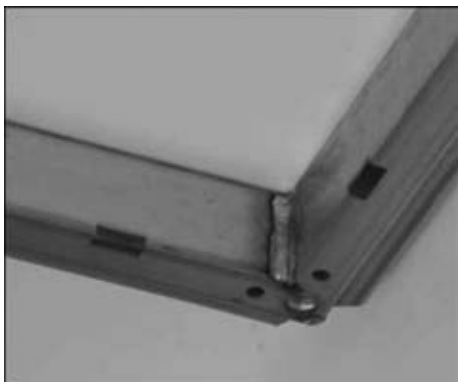


Рис. 1. Соединенные методом Puls-Mix угловые швы позволяют не производить обычно необходимое последующее выравнивание рамы

незначительное тепловое воздействие. При этом можно выбрать необходимое количество циклов СМТ и частоту импульсов в соответствии с условиями конкретного применения. Пользователь сначала может работать на нижнем пределе мощности процесса СМТ. Этот уровень мощности достаточный для формирования шва на тонколистовом металле толщиной от 0,3 мм. Далее доступен весь диапазон мощности СМТ. После этого пользователь может без перехода выбрать любую мощность диапазона импульсной дуги — и это отличительная особенность данного инновационного решения. Компания «Fronius» называет комбинацию СМТ с импульсной дугой методом Puls-Mix. Используя силу тока до 350 А, Puls-Mix намного превосходит рабочий диапазон короткой дуги, который ограничивается лишь 200 А. Пользователь получает такие присущие процессу СМТ преимущества, как стабильность дуги и практически полное отсутствие брызг. Метод Puls-Mix позволяет регулировать длину и стабильность дуги, подачу тепла и объем присадочного материала. Благодаря этому можно целенаправленно изменять геометрию шва и степень проплавления.

**Приварка патрубка выхлопной системы грузового автомобиля.** В выхлопной системе грузового автомобиля возле двигателя находится участок трубы с резьбовым соединением для лямбда-зонда. Русс получает от заказчика предварительно изготовленные детали с лазерным швом и прорезным отверстием. Основной материал — высокохромистая сталь марки 1.4509, обеспечивающая необходимую стойкость при сильных перепадах температуры (от  $-60^{\circ}\text{C}$  ниже нуля до  $500^{\circ}\text{C}$ ). Сталь проявляет высокую склонность к образованию трещин. Одним из условий технологии является то, что лист металла толщиной 1,5 мм ни в коем случае не должен проплавляться насквозь, но в то же время глубина проплавления должна быть достаточной. Из-за риска возникновения трещин вследствие вибрации в транспортном средстве защитный газ не должен содержать кислорода. С помощью метода Puls-Mix, приса-

дочного материала 40.15 и защитного газа, содержащего 20 % гелия, 78 % аргона и 2 %  $\text{CO}_2$  (Helistar 281 компании Praxair), удается решать эту задачу. Катет углового шва длиной 8,8 см составляет 1,5 мм, ширина зазора — 1 мм, вылет электрода — 5 мм.

**Соединение алюминиевых деталей системы кондиционирования воздуха.** Определенные компоненты автомобильной системы кондиционирования воздуха подвержены высоким термическим нагрузкам. В течение срока эксплуатации они должны выдерживать свыше 1,5 млн динамических циклов изменения нагрузки. Это касается патрубка и держателя детали, состоящей из двух разных алюминиевых материалов (AlSi5 — труба, AlMgSi05 — держатель). Соединение должно выдерживать максимальную нагрузку, но при этом, однако, не должно иметь глубокого корня в области сварного шва, поскольку вследствие крайне высокой охлаждающей нагрузки, действующей на деталь, любое сужение внутреннего диаметра недопустимо. Практически невозможна поддержка сварочной ванны так же, как и завершающая обработка — выпрямление или снятие стружки. Обычная сварка вольфрамовым электродом в инертном газе (WIG) могла бы подойти, но этот процесс слишком долгий и дорогостоящий. Вместо него Русс использует инновационный процесс Puls-Mix (рис. 2). «После этого сварное соединение выдерживает комплексную программу испытаний, включая испытания в солевом тумане».



Рис. 2. Вместо трудоемкой сварки методом WIG для соединения патрубка, компонента выхлопной системы автомобиля, используется инновационный, допускающий автоматизацию процесс Puls-Mix

**Распределитель топлива.** Типичным примером применения метода Puls-Mix является соединение листов разной толщины на распределительном устройстве топливопровода (рис. 3). Участок трубы из высококачественной стали 1.4316 имеет толщину стенки 0,8 мм, а формованная деталь из листовой автоматной стали — 2 мм. Путем круговой сварки разные части соединяются в один компонент. Завершающая обработка V-образного пробочного шва длиной 5 см и смежных с ним зон исключена. В этом конкретном случае метод

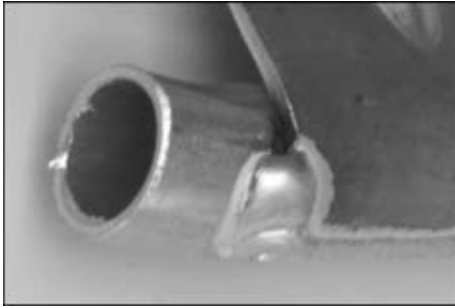


Рис. 3. CMT и Puls-Mix используются для соединения листов различной толщины или из разного металла

CMT опять же является наиболее подходящим для создания соединения без образования брызг. К тому же он позволяет идеально перекрыть прорезь шириной 4 мм. Вылет электрода составляет 8 мм. Осложняющим обстоятельством является то, что материал патрубка, автоматная сталь, склонен к порообразованию в металле шва. Для решения этой проблемы Русс также использует бескислородную газовую смесь Helistat. Присадочный материал состоит из 1.U316, а его диаметр равен 1 мм. Соединенные таким способом детали выдерживают испытание на разрыв, т. е. проходят контроль качества.

**Распределительные шкафы для ИТ-оборудования: пайка вместо сварки.** «Сейсмопрочность» уровня 4 — такое требование предъявляется к качеству создаваемых соединений. Процесс изготовления полностью автоматизирован. Технология соединения основана на применении сис-

темы TransPuls Synergic 3200 CMT. Специалисты выполняют швы длиной 50 мм на профилированной раме из листовой стали толщиной 2 мм, поверхность которой обработана алюминием для пассивирования. «Величина зазора, которая составляет 1,5 мм, близка к предельной, — описывает особенности задачи Русс. — В данном случае мы используем характерное преимущество CMT — высокую перекрывающую способность. В пользу метода электродуговой пайки говорит тот факт, что мы не повреждаем покрытие поверхности — таким образом мы полностью устраняем необходимость в предварительной и последующей обработке места соединения и, кроме того, добиваемся высокого качества».

Более низкая температура пайки предотвращает повреждение поверхности. Однако по сравнению с дуговой сваркой соединение при пайке не такое плотное. Чтобы повысить «сейсмопрочность» соединения, Русс и его сотрудники используют метод Puls-Mix. Материалом для припоя служит проволочный электрод марки CuAl8 с диаметром 1 мм. «Благодаря точной настройке соотношения циклов CMT и циклов импульсной дуги мы поддерживаем достаточно высокую температуру для перехода материала в шов, причем шов остается относительно холодным. Таким образом создается достаточно прочное соединение», — заверяет Бернд Русс. Результаты испытаний и не в последнюю очередь удовлетворенность клиента подтверждают это.



## СИСТЕМА СЛЕЖЕНИЯ ЗА РАСПОЛОЖЕНИЕМ ШВА В УСТАНОВКАХ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ АНТИКОРРОЗИОННОГО ПОКРЫТИЯ

Е. В. ШАПОВАЛОВ, канд. техн. наук, В. А. КОЛЯДА, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана система слежения, предназначенная для обнаружения валика усиления сварного шва на вращающейся трубе и управления дозированием полимера при нанесении антикоррозионного полимерного покрытия на внешнюю поверхность сварных труб. Внедрение системы позволит существенно улучшить однородность толщины антикоррозионного покрытия труб.

*Ключевые слова:* антикоррозионное покрытие, сварные прямошовные трубы, обнаружение шва, телевизионный сенсор, дозировка полимера, коммуникационный контроллер

В настоящее время стальные трубы являются основным элементом промышленных трубопроводов, чему способствует их массовое производство, относительная дешевизна, высокая прочность и технологичность. Качественная антикоррозионная защита сварных труб позволяет существенно улучшить эксплуатационные характеристики трубопроводов. В условиях массового производства для нанесения защитного полимерного покрытия на внешнюю поверхность прямошовных сварных труб большого диаметра используют специализированные установки [1]. Нанесение покрытия выполняется автоматически при вращении и одновременном поступательном перемещении трубы с небольшой скоростью, тогда как линейная скорость движения поверхности трубы при ее вращении может быть значительной (до 0,5 м/с).

Обычно вращение трубы осуществляют с помощью роликов, которые непосредственно контактируют с покрытой поверхностью трубы. При этом в области валика усиления сварного шва происходит деформация полимерного покрытия, что является причиной его неравномерной толщины. Для решения данной проблемы используют следующий подход: при прохождении валика усиления под экструдером нанесения защитного покрытия увеличивают дозировку полимера, вследствие чего антикоррозионное покрытие сварных труб имеет однородную толщину. На практике значение линейной скорости движения поверхности трубы непостоянное и зависит от погрешностей при изготовлении сварных труб, а также от других внешних факторов, что не позволяет управлять дозировкой полимера в соответствии с заданной программой. Поэтому в основном используют замкнутые системы управления дози-

ровкой полимера с датчиком шва в контуре обратной связи.

На установках для нанесения антикоррозионного покрытия на внешнюю поверхность сварных труб замкнутое управление дозировкой полимера чаще всего осуществляется с помощью тактильных датчиков или точечных лазерных дальномеров. И те и другие определяют расстояние от датчика до отдельной точки объекта. При любом смещении поверхности трубы относительно таких датчиков происходит изменение амплитуды их выходных сигналов. При этом сигнал, соответствующий валику усиления сварного шва, может быть соизмеримым с возмущениями, возникающими вследствие вибрации трубы или наличия механических дефектов на ее поверхности. На практике это становится причиной частых «пропусков» шва или ложного срабатывания системы управления дозированием полимера.

Для повышения надежности обнаружения шва на вращающейся трубе в ИЭС им. Е. О. Патона разработана специализированная система слежения, которая основывается на техническом зрении. Ее главные компоненты — телевизионный сенсор (ТС) и коммуникационный контроллер (КК) (рис. 1). ТС устанавливается перед экструдером нанесения полимера по ходу вращения трубы. КК интегрируется в общий пульт управления установкой. Подключение системы к экструдеру осуществляется через два твердотельных реле, входящих в состав КК. Функционирование ТС основано на принципе лазерной триангуляции и более подробно рассмотрено в работе [2]. Лазерный луч, развернутый в плоскость, формирует на поверхности трубы световой след, который регистрируется видеокамерой. Его форма повторяет рельеф поверхности трубы. Для обработки и анализа изображений, принимаемых видеокамерой, используется микроконтроллер, вмонтированный непосредственно в ТС. В результате анализа при-



нимается решение о наличии/отсутствии шва под ТС. При его наличии определяют также координаты центра валика усиления шва в собственной системе координат ТС и сохраняют временные метки. При переходе центра валика через начало координат ТС на основании найденных координат и временных меток формируется выходной сигнал «Валик» с собственной меткой, который по интерфейсу RS-485 передается КК. После получения этого сигнала КК через заданный интервал времени задержка  $T_3$  относительно его временной метки формирует управляющий сигнал «Наброс» с длительностью импульса  $T_{и}$ . По этому сигналу твердотельные реле КК переключаются и дозировка полимера увеличивается.

В связи с высокой (до 240 °С) температурой трубы и сильным запылением рабочей зоны порошковым праймером предусмотрено принудительное воздушное охлаждение корпуса ТС и обдув его окон-иллюминаторов. Для установки значений временных констант  $T_3$  и  $T_{и}$  используют соответствующие регулировочные ручки и жидкокристаллический индикатор, расположенные на лицевой панели КК (рис. 2). Жидкокристаллический индикатор имеет два режима отображения — основной и дополнительный. Переключение этих режимов осуществляют с помощью кнопки «Меню». В основном режиме отображается текущее состояние системы слежения и установленные значения временных констант  $T_3$  и  $T_{и}$ , в дополнительном — на жидкокристаллическом индикаторе выводятся краткие рекомендации по устранению неисправностей. Выполняется мониторинг состояния системы и вывод следующих текстовых сообщений:

«Норма» — система в рабочем режиме, объект слежения (труба) в поле зрения ТС;

«Объект не найден» — система в режиме ожидания, объект слежения (труба) в поле зрения ТС отсутствует;

«Сенсор не отвечает» — критическая ошибка вследствие нарушения связи между ТС и КК;

«Перегрев сенсора» — система в рабочем режиме, температура внутри корпуса ТС близка к критической;

«Граница рабочей зоны» — система в рабочем режиме, расстояние между ТС и поверхностью трубы соответствует положительной или отрицательной границе рабочей зоны ТС по вертикали, т. е. объект слежения может выйти из рабочей зоны ТС в процессе работы.

Для визуального сопровождения сигналов «Валик» и «Наброс» используют соответствующие светодиодные индикаторы. Параметризацию и настройку системы осуществляют с внешнего компьютера через интерфейс RS-232. С целью защиты от короткого замыкания в цепи подключе-

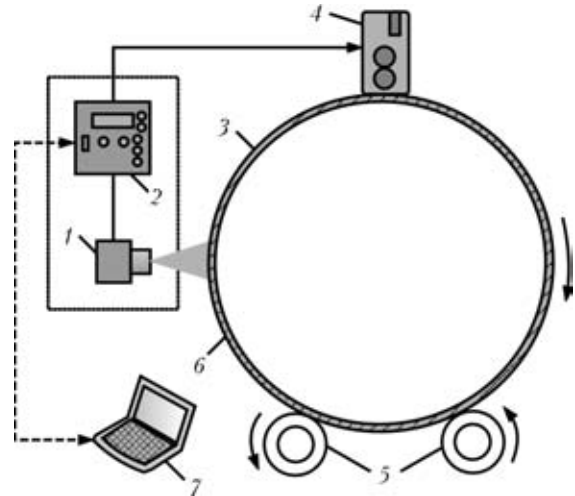


Рис. 1. Схема интеграции системы слежения за швом в установке для нанесения антикоррозионного покрытия: 1 — ТС; 2 — КК; 3 — вращающаяся труба; 4 — экструдер нанесения полимера; 5 — ролики для вращения трубы; 6 — валик усиления сварного шва; 7 — внешний компьютер для параметризации системы слежения

ния реле КК к экструдеру нанесения полимера предусмотрены предохранители.

Для повышения надежности системы алгоритмическое обеспечение КК дополнено функцией контроля периода сигнала «Валик», которая сравнивает период формирования ТС этого сигнала со средним периодом, вычисленным для нескольких последних сигналов. Если сигнал «Валик» не поступает от ТС за расчетное время, то его формируют принудительно; если же время поступления указанного сигнала не соответствует вычисленному среднему периоду, то такой сигнал игнорируют.

Система слежения за швом работает в масштабе реального времени. ТС и КК снабжены сторожевыми таймерами, которые обеспечивают их



Рис. 2. Лицевая панель коммуникационного контроллера



быстрый перезапуск в случае возникновения нештатных ситуаций. Все компоненты указанной системы имеют гальваническую развязку.

Система слежения за швом практически нечувствительна к вибрации трубы, механическим дефектам на ее поверхности и внешним источникам света. Основные технические характеристики этой системы представлены ниже:

Частота кадров ТС, Гц .....	60
Точность обнаружения центра валика усиления сварного шва, мм .....	$\pm 1$
Чувствительность ТС (минимально допустимая высота валика усиления сварного шва), мм .....	0,5
Номинальное расстояние от ТС до поверхности трубы, мм .....	200
Рабочая зона ТС, мм:	
по вертикали .....	$\pm 30$
по горизонтали .....	$\pm 30$
Время переключения реле КК, мс .....	1
Ток нагрузки на реле КК максимальный, А .....	2
Напряжение нагрузки на реле КК максимальное, В .....	28
Рабочий диапазон температуры, °С .....	от -10 до +85

Разработанная система слежения за швом внедрена в производство на предприятии ОАО «Харьковский трубный завод» (Украина) на двух установках для нанесения антикоррозионного полимерного покрытия на внешнюю поверхность труб большого диаметра. На рис. 3 показан ТС, сканирующий поверхность вращающейся трубы в процессе нанесения антикоррозионного поли-

A tracking system is developed, which is designed for detection of weld reinforcement bead on a rotating pipe and controlling the polymer feed at deposition of an anticorrosion polymer coating on the outer surface of welded pipes. System introduction will allow an essential improvement of the uniformity of thickness of anticorrosion coating of pipes.



Рис. 3. Телевизионный сенсор, сканирующий поверхность вращающейся трубы

мерного покрытия. Система слежения позволила существенно повысить надежность обнаружения валика усиления сварного шва и точность отработки временных констант, что значительно улучшило качество антикоррозионного покрытия труб. Такие системы могут использоваться также в тех областях автоматизации производства, где требуется регистрация быстро движущихся объектов.

1. Ryabov V. M., Usova L. A. Factory-applied anticorrosive insulation for large-diameter pipes // Metallurgist. — 1987. — 31, № 10. — P. 320–321.
2. Кисилевский Ф. Н., Коляда В. А. Система лазерного слежения за валиком усиления сварного шва // Автомат. сварка. — 2006. — № 1. — С. 60–62.

Поступила в редакцию 19.02.2009

УДК 621.791(088.8)

## ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА\*

**Способ диффузионной сварки.** Изобретение может быть использовано для сварки титановых сплавов в авиа- и ракетостроении, машиностроении, приборостроении и других отраслях промышленности. Соединяемые поверхности сжимают давлением, составляющим 0,7...0,95 предела текучести соединяемого сплава при комнатной температуре. Затем нагревают до температуры на 20...100°C выше температуры полиморфного превращения сплава и деформируют зону соединения со степенью деформации 10...70% с одновременным охлаждением зоны соединения до температуры на 10...350 °C ниже температуры полиморфного превращения сплава. Проводят изотермическую выдержку при этой температуре в течение 10...180 с и давлением, составляющем 0,4...0,95 предела текучести сплава при температуре изотер-

мической выдержки. Техническим результатом изобретения является повышение усталостных характеристик соединения при сохранении их прочностных характеристик при статических нагрузках, снижение трудоемкости и увеличение производительности процесса сварки. Патент РФ 2348496. М. Л. Первов, В. А. Кочетков, Д. П. Смирнов (ГОУ ВПО Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П. А. Соловьева).

**Способ защиты от коррозии зоны сварного соединения металлических труб с внутренней полимерной оболочкой.** Изобретение относится к области трубопроводного транспорта и найдет применение при строительстве и ремонте трубопроводов с внутренним противокоррозионным покрытием. В конец каждой из соединяемых труб между трубой и оболочкой запрессовывают металлическую втулку длиной, превышающей зону термического влияния сварки, с двумя

\* Приведены сведения о заявках и патентах РФ, представленных на сайте <http://www.fips.ru/russite/default.htm>.



внутренними расширяющимися к концам втулки коническими поверхностями и раструбом на наружном конце, наружный диаметр которого равен или превышает внутренний диаметр трубы, а конец оболочки вытягивают. Закрепление и герметизацию конца оболочки производят путем запрессовки в конец оболочки в зону расширяющейся к наружному концу внутренней поверхности втулки, заземляющего кольца, имеющего наружную коническую поверхность, соответствующую расширяющейся к наружному концу конической поверхности втулки. Расширяет арсенал технических средств. Патент РФ 2347970. Н. Г. Ибрагимов, Ф. И. Даутов, Р. М. Шаммасов и др. (ОАО «Татнефть» им. В. Д. Шашина).

**Газосварочная горелка.** Изобретение относится к газосварочной горелке и может быть использовано в различных отраслях машиностроения при ручной сварке, пайке и термообработке черных и цветных металлов, а также для других видов газопламенной обработки. Наконечник горелки состоит из мундштука, трубки и размещенного между рукояткой и трубкой смесителя, имеющего входной канал инжектирующего кислорода, входные каналы инжектируемого горючего газа и камеру смешения, размещенную на выходе упомянутых каналов. Площадь сечения входного канала инжектирующего кислорода, сумма площадей сечений входных каналов инжектируемого горючего газа и площадь сечения камеры смешения смесителя выдержаны в соотношении  $1:(0,7-3,5):(5-9,5)$ . Угол между каждым входным каналом инжектируемого горючего газа и входным каналом инжектирующего кислорода смесителя составляет  $60...90^\circ$ . Камера смешения выполнена с цилиндрической входной частью с диаметром  $d$ , переходящей в конусную часть с расширением по направлению истечения горючей смеси. Длина конусной части  $H > (10 - 15)d$ , а угол при вершине конуса  $\alpha = 6...12^\circ$ . Толщина стенки смесителя в верхней части по направлению подачи горючей смеси в зоне расположения входа цилиндрической части камеры смешения  $S > 2,5d$ . Технический результат состоит в расширении возможностей регулирования параметров, что приводит к повышению устойчивости горения и созданию оптимального состава горючей смеси, что в свою очередь позволит получить высокое качество газопламенной обработки различных деталей. Патент РФ 2347652. А. К. Никитин, А. Г. Корниенко, Л. В. Бакулин, О. Ф. Ерин («Судоремонтный завод «НЕРПА»).

**Состав сварочной проволоки.** Изобретение может быть использовано для изготовления сплавов на кобальтовой основе и присадочных металлов, а именно проволоки из этих сплавов для сварки, наплавки и ремонта сваркой деталей из высоколегированных жаропрочных никелевых и кобальтовых сплавов. Состав сварочной проволоки включает компоненты в следующем соотношении, мас. %: углерод 0,10...0,30; хром 15,0...20,0; вольфрам 1,4...2,0; молибден 14,0...20,0; никель 2,0...4,0; железо 2,0...4,0; марганец 0,5...1,0; титан 0,5...1,5; алюминий 0,5...1,5; по меньшей мере, один компонент из группы редкоземельных металлов 0,01...0,03; рений 0,01...0,05; кобальт — остальное до 100 %. Суммарное содержание титана и алюминия составляет 1,0...2,0 %. Изобретение обеспечивает повышение прочностных характеристик сплава сварочной проволоки, а также повышение качества сварного соединения за счет исключения появления в нем трещин. Патент РФ 2346797. В. А. Поклад, М. А. Крюков, М. Т. Борисов, С. Н. Козлов (ФГУП «ММПЗ «САЛЮТ»).

**Способ сварки плавлением меди и ее сплавов со сталями.** Изобретение может быть использовано при изготовлении и монтаже различных узлов и конструкций, включающих детали и изделия из меди или ее сплавов и стали. Сварочную дугу возбуждают на детали из медного сплава на расстоянии

3...7 мм от ее края, прилегающего к детали из стали. Получают сварочную ванну за счет расплавления основного металла медного сплава и присадочного металла из меди. Перемещают дугу по детали из медного сплава до стальной детали и по стальной детали на величину сварного шва с поддержанием непрерывного горения дуги из условия обеспечения нагрева стали только за счет ее контакта со сварочной ванной. Совершают указанным образом возвратно-поступательное перемещение сварочной ванны и дуги до полного формирования сварного шва между деталями. В процессе контакта сварочной ванны со сталью дугу между неподвижным электродом и сварочной ванной удерживают на расстоянии 2...3 мм от ее головной части. Техническим результатом изобретения является повышение ударной вязкости сварных соединений при сохранении их прочностных свойств за счет минимального перехода железа из стали в металл шва. Патент РФ 2346793. В. В. Рыбин, А. В. Баранов, Е. В. Андронов и др. (ФГУП «ЦНИИ КМ «ПРОМТЕЙ»).

**Установка для подводной полуавтоматической сварки.** Изобретение относится к сварочной технике, в частности к установке для подводной полуавтоматической сварки, и может быть использовано при проведении подводных сварочных работ на глубине до 60 м при ремонте гидротехнических сооружений, морских стационарных платформ, корпусов судов, сварке или заварке дефектов подводных магистральных нефтегазопроводов. Установка включает соединенные с блоком управления источник сварочного тока и средство подачи защитного газа, соединенное с газовыми магистралями. Блок подачи сварочной проволоки соединен со сварочной горелкой. Рабочая камера для размещения в ней водолаза-сварщика выполнена с возможностью установки в зоне сварки. Блок вентиляции рабочей камеры соединен с камерой газовыми шлангами и содержит дымовой фильтр с компрессором и систему контроля содержания кислорода. Рабочая камера выполнена в виде открытого водолазного колокола с возможностью его герметизации со стороны изделия. Блок управления выполнен с возможностью обеспечения работы установки в импульсном и непрерывном режиме, регулирования скорости подачи проволоки, подачи напряжения на кнопку управления горелкой. Технический результат заключается в улучшении условий формирования сварного шва за счет обеспечения минимальной задымленности зоны производимых работ и доступности зоны сварки для сварщика. Патент РФ 2346792. А. Н. Захаров, В. В. Пасхин, А. Н. Хабибуллин, В. Г. Филиппенко (ООО «Подводсервис»).

**Синергетическая система сварки.** Изобретение относится к области сварки, в частности к системе сварки короткой дугой между перемещающимся проволочным электродом и заготовкой, способу управления импульсом тока и электроду с сердечником для флюса, и может найти применение в машиностроении. Система включает: источник питания с устройством управления для создания импульса тока, подводящего энергию к электроду для расплавления торца электрода, и режима переноса расплавленного металла, и с отслеживанием окончания указанного импульса расплавления; датчик времени для измерения фактического времени между окончанием импульса и короткого замыкания; устройство для регулирования требуемого времени от импульса до короткого замыкания; схему для создания корректирующего сигнала основанного на различии между фактическим временем и требуемым; схему, чувствительную к корректирующему сигналу, для управления заданным параметром импульса тока. Электрод с сердечником является самозащитным электродом с сердечником из флюса и содержит различные электродные композиции, которые особенно благоприятны при их использовании в сочетании с задаваемой системой формой импульса. В результате получают сварные швы с низкими уровнями



загрязнителей, которые характеризуются высокими прочностными свойствами и являются долговечными. Патент РФ 2345873. Б. К. Нараянан, Р. К. Майерс, П. Т. Солтис (Линколн Глобал, Инк).

**Устройство для формирования импульсов сварочного тока.** Изобретение относится к электродуговой сварке плавящимся и неплавящимся электродом, в частности к устройствам формирования импульсов тока, обеспечивающих горение дуги в динамическом режиме, и может быть использовано в различных отраслях машиностроения. Устройство содержит трехфазный выпрямитель с жесткой внешней характеристикой и регулируемым напряжением холостого хода. К его выходным клеммам подключена батарея конденсаторов. Формирующий элемент в виде искусственной формирующей линии (ИФЛ) состоит из  $n$  ячеек, каждая из которых состоит из последовательно включенных конденсатора и дросселя. Дроссель последней ячейки выполнен в виде быстронасыщающегося дросселя. ИФЛ включена в диагональ тиристорного однофазного моста, образованного зарядно-перезарядными тиристорами, а другая диагональ моста включена последовательно в сварочную цепь. При поочередном отпирании пар тиристорov, находящихся в противоположных плечах тиристорного моста, импульсы тока перезаряда, по форме близкие к прямоугольной, протекают через дугу промежутков. Изобретение позволяет генерировать импульсы сварочного тока с параметрами, обеспечивающими устойчивое горение дуги в динамическом режиме, надежность работы устройства и повышает энергетические показатели за счет исключения этапа предварительного заряда конденсаторов формирующей линии. Патент РФ 2343051. А. Ф. Князьков, В. Л. Князьков, О. С. Бирюкова, В. А. Устинов (Томский политехнический университет).

**Инверторный источник питания для электродуговой сварки.** Изобретение относится к технологическому оборудованию, используемому для ручной дуговой сварки покрытыми электродами, в частности к малогабаритным источникам питания инверторного типа. Первичная обмотка выходного понижающего трансформатора (ПТ) включена по одноконтурной схеме. Две параллельные ветви состоят из двух последовательно соединенных тиристорov, между точками соединения анодов и катодов которых включен коммутирующий конденсатор. Вторичная обмотка ПТ обоими концами подключена к входу неуправляемого выпрямителя, а средней точкой — к одной из клемм нагрузки. Выход неуправляемого выпрямителя соединен с одним концом дросселя фильтра, который другим концом соединен со второй клеммой нагрузки. Один конец первичной обмотки ПТ подключен к общей точке соединения анодов тиристорov параллельных ветвей, а другой — к плюсу источника питания. Минус источника питания подключен к общей точке соединения катодов тиристорov параллельных ветвей. Во вторичном контуре нагрузка и дроссель фильтра зашунтированы в обратном направлении диодом. Инверторный источник питания обеспечивает надежную работу. Патент РФ 2339491. А. Ф. Князьков, С. А. Князьков, К. И. Деменцев (Томский политехнический университет).

**Способ соединения труб разного диаметра.** Изобретение относится к области строительства, а именно к узлам соединения труб разного диаметра. К торцу трубы меньшего диаметра на сварке прикрепляют заглушку, диаметр которой меньше внутреннего диаметра трубы большего диаметра. На расстоянии от торца трубы меньшего диаметра прикрепляют заглушку. Далее конец трубы меньшего диаметра устанавли-

вают в трубу большего диаметра и соединяют на сварке заглушку к торцу трубы. После окончания сборки и сварки в кольцевую полость между трубами в пределах зоны их нахлеста через отверстие в заглушке подают бетон, например расширяющийся бетон. Изобретение направлено на снижение трудоемкости сварочных работ и повышение прочности узла, особенно при применении тонкостенных труб. Патент РФ 2337268. И. Л. Кузнецов, Л. С. Сабитов, А. В. Исаев (Казанский государственный архитектурно-строительный университет ФГОУ ВПО КГАСУ).

**Способ сварки плавлением.** Изобретение может быть применено для сварки изделий с замкнутым внутренним объемом, в том числе при герметизации изделий активных зон ядерных реакторов как в обычных, так и в дистанционных условиях. Сварку ведут в несколько проходов в защитном газе. После первого прохода повышают давление газа и выполняют, по меньшей мере, один последующий проход. Переплавливают металл сварного шва предшествующего прохода в объеме, соответствующем глубине расположения образовавшегося дефекта, но не более чем на 98 %. В качестве защитного газа используют преимущественно инертные газы, углекислый газ. Технический результат изобретения заключается в повышении качества и работоспособности сварных соединений изделий с замкнутым внутренним объемом путем улучшения их сплошности. Патент РФ 2336982. Е. М. Табакин, В. И. Байкалов, Г. В. Мирошниченко и др. («ФГУП ГНЦРФ НИИ атомных реакторов»).

**Способ электродуговой сварки спирально-шовных труб.** Изобретение относится к трубному производству, а именно к производству сварных спиральношовных труб большого диаметра для магистральных газонефтепроводов. Из полосы путем непрерывной формовки получают трубную заготовку. Выполняют электродуговую сварку под слоем флюса наружного и внутреннего спиральных рабочих швов. Глубина проплавления внутреннего шва составляет 60...80 % толщины стенки трубы. Высота валика усиления внутреннего шва  $H$  не превышает полученного из выражения  $H = 0,8dK$ , мм, где  $d$  — толщина стенки трубы в мм;  $K$  — коэффициент, находящийся в пределах 0,45...0,20 в обратной пропорциональной зависимости от толщины стенки трубы. Улучшается формирование внутреннего шва за счет оптимизации величины проплавления внутреннего шва и высоты валика усиления, обеспечивающее плавный переход последнего в основной металл. Патент РФ 2334576. И. И. Лубе, И. З. Машинсон, В. В. Челышев (ОАО «Волжский трубный завод»).

**Способ восстановления деталей электрошлаковой наплавкой.** Изобретение относится к восстановлению деталей с большим износом электрошлаковым способом, например бил молотковых мельниц, коронок рыхлителей и др. Закрепляют деталь и кокиль. Расплавливают расходный электрод в расплаве шлаковой ванны. В качестве расходного электрода используют предварительно изготовленный пакет из нескольких прутков арматуры, форму которого задают в соответствии с размерами и формой плавильного пространства кокиля. При изготовлении электрода сначала выравнивают пакет по торцу, а затем, по крайней мере, один из прутков в середине пакета выдвигают на 10...20 мм, после чего пакет фиксируют сваркой. Способ обеспечивает повышение стабильности стартовой операции при электрошлаковой наплавке за счет увеличения плотности тока и снижение трудоемкости изготовления электродов с заданным сечением. Патент РФ 2350449. В. В. Вашковец, М. В. Тепляшин (Тихоокеанский государственный университет).





## ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛА «WELDING AND CUTTING», 2008, № 5

*Ое. Е. Guengoer (Турция), С. Gerritsen (Голландия).  
ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ  
И МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ  
АЛЮМИНИЕВО-СТАЛЬНЫХ ПАЯНОСВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ*

Ввиду отсутствия четкого термина соединения, в котором только одна из деталей расплавляется и припаявается к другой (которая остается твердой), в этой публикации называется паяносварным, а процесс — сваркопайкой. По характеру рассматриваемых в работе соединений можно считать, что термин паяносварной шов очень хорошо подходит для описанных швов.

Соединение стали с алюминием широко используется в автомобильной промышленности из-за необходимости снижения массы с целью сокращения потребления топлива и, таким образом, выделения  $\text{CO}_2$ . Другие примеры применения можно найти, например, в судостроении, аэрокосмической промышленности, пассажирском железнодорожном транспорте и производстве бытовых электроприборов. Хотя механическое соединение алюминия со сталью (например с использованием винтов, болтов или заклепок) является очевидным решением, сварка плавлением алюминия со сталью является сложной проблемой из-за существенных различий в их физических и химических свойствах таких, как электрическое сопротивление и коэффициент термического расширения (КТР). Однако наиболее проблематичным для процессов сварки плавлением является образование хрупких интерметаллидных фаз (ИМФ) таких, как  $\text{FeAl}_3$  и  $\text{FeAl}_5$ , оказывающих отрицательное влияние на механические свойства соединений. Толщина интерметаллидного слоя, как известно, играет решающую роль для рабочих характеристик соединения и напрямую связана со скоростью охлаждения/тепловложения. В литературе часто сообщается, что приемлемая прочность соединений может быть обеспечена при толщине промежуточного слоя меньше 10 мкм по толщине. Для сведения ИМФ до минимума, а также для ограничения толщины прослойки время, в течение которого алюминий является расплавленным, и, период, в течение которого соединение находится при повышенной температуре, должны быть минимальными.

Если говорить о различиях в электрическом сопротивлении, точечная сварка сопротивлением является наиболее подходящим вариантом. Из-за больших различий в электрических свойствах диапазоны сварочных параметров для стали и алюминия не слишком сильно совпадают, что усложняет получение качественного шва. При решении этой проблемы часто предлагается использовать биметаллические переходные полосы, или как альтернативу вставки припоя. Однако

это делает процесс сварки намного сложнее, поскольку вставки должны находиться точно между сварочными электродами. Этому процессу присущи также недостатки как с точки зрения металлоемкости, так и стоимости. Более того, из литературы известен пример, показывающий, что сварные соединения, полученные сваркой сопротивлением с переходными полосками, обеспечивают статическую и динамическую прочность, не превышающую эти величины для заклепочных соединений с самопрошивкой. В ходе других исследований в соединениях наблюдались усадочные дефекты в швах, а испытания на отслоение показали неприемлемую хрупкость соединений.

Еще одним вопросом является различие в термических свойствах. Во-первых, теплопроводность алюминия в пять раз выше этого значения для стали. Это большое различие вызывает неравномерное рассеяние тепла и обычно приводит к образованию асимметрических валиков при сварке. Большое различие в температуре плавления (для чистого  $\text{Al } T_{\text{пл}} = 660^\circ\text{C}$ , а для чистого железа  $T_{\text{пл}} = 1535^\circ\text{C}$ ) также способствует образованию неровного валика. Кроме того, большое различие в КТР этих двух материалов приводит к большим усадочным напряжениям, что может вызвать чрезмерное коробление, а это в свою очередь может привести к низким показателям статических и динамических механических свойств или даже к прямому разрушению металла шва после охлаждения.

В настоящий момент есть несколько новых вариантов сварки МИГ/МАГ, что позволяет выполнять сварку с более низким тепловложением, в основном путем использования источника питания с цифровым управлением. Одним из таких процессов является процесс с холодным переносом металла, разработанный компанией «Фрониус». Для этого варианта нововведение заключается не только в том, что за счет очень точного управления током короткого замыкания можно снизить тепловложение, но и в том, что путем периодического отведения присадочной проволоки можно реализовать оптимальный переход капель и сварку без разбрызгивания. В настоящее время сваркопайка является наиболее перспективным методом для соединения стали с алюминием способами сварки плавлением. При этом способе алюминий расплавляется и обеспечивается смачивание им твердой стали, и, таким образом, он сплавляется с ней. Тем не менее, хрупкие интерметаллиды также могут образовываться путем



диффузии в твердой фазе, а также когда расплавленный алюминий контактирует со сталью. Таким образом, этот метод не позволяет полностью избежать образования интерметаллидов. Однако толщину слоя интерметаллидов можно свести к минимуму за счет более низкого тепловложения. Следовательно, процесс с переносом холодного металла уже был изучен для сваркопайки алюминия со сталью, причем низкое тепловложение ограничивает образование хрупких интерметаллидов системы железо–алюминий.

Исследования, проведенные в компании «Фрониус», показали, что химический состав присадочной проволоки и основного материала играет важную роль в отношении характера образующейся прослойки, поскольку взаимодействие легирующих элементов (марганца, кремния и цинка) влияет на образование ИМФ. Следовательно, в рассматриваемых в работе исследованиях химический состав присадочной проволоки, а также и металлического покрытия на стали взяты в качестве параметров, влияющих на толщину слоя интерметаллидов и характеристики соединения. Для этой цели выполнены нахлесточные паяносварные швы алюминия и стали с использованием сталей с различным покрытием и различных присадочных проволок. Для сравнения выполняли также заклепочные и адгезивные соединения. Испытания включали исследования сечения, испытания на растяжение, солевым туманом и на циклическую коррозию. Проводили также детальные исследования слоев интерметаллида.

В ходе проведенных исследований изучали влияние различных присадочных проволок и различных металлических покрытий на сталь при пайкосварке алюминия со сталью с низким тепловложением. Эти исследования продемонстрировали потенциальные возможности вариантов процесса МИГ/МАГ с низким тепловложением, особенно с холодным переносом металла для сваркопайки этих сочетаний. Эти результаты показали, что паяносварные швы можно успешно получать со слоями ИМФ толщиной менее 10 мкм, что традиционно рекомендуется для обеспечения максимальных характеристик соединения. Самая большая толщина прослойки наблюдалась в соединениях стали с покрытием «Алузи», полученным с помощью присадочной проволоки  $AlSi_3Mn$  (до 6 мкм). Максимальная прочность была реализована для того

же сочетания основного материала присадки, однако, в этом случае наблюдалось разрушение в ЗТВ алюминия приблизительно при 85 % предела прочности на растяжение основного материала алюминия. Этот уровень прочности сопоставим с тем, которого можно ожидать при сварке алюминиевых сплавов.

Применение подобных режимов сварки при использовании различных присадочных проволок привело к различной толщине слоя ИМФ, длине смачивания, а также характеристикам соединения. Не установлено четкой зависимости между характеристиками соединениями и толщиной слоя ИМФ, которая во всех случаях было ниже 10 мкм. Это может означать, что влияние толщины слоя ИМФ является ограниченным или незначительным, пока она ниже 10 мкм. Эксперименты на различных сталях с покрытием с использованием различных присадочных проволок позволили установить некоторые ключевые параметры, которые необходимо учитывать при выборе присадочной проволоки для получения оптимальных характеристик паяносварного шва:

по сравнению с присадкой на основе алюминия низкая точка плавления и относительная мягкость присадочной проволоки на основе цинка усложнили подачу проволоки и управление геометрией шва (наблюдалась тенденция образования узкого, но очень выпуклого валика шва). Тем не менее, этот тип присадочного материала продемонстрировал преимущества минимальной толщины слоя ИМФ, высоких характеристик соединения, а также лучшую коррозионную стойкость;

присадка  $AlSi_3Mn1$  видимо, предпочтительнее присадки  $AlSi_5$  исходя из получаемых характеристик соединения;

среди различных комбинаций присадочных проволок и сталей с различным покрытием, испытанных в данной работе, самая низкая коррозионная стойкость наблюдалась в соединениях, полученных на оцинкованной стали с присадкой на основе алюминия.

Хотя для паяносварных швов на алюминии получены приемлемые результаты в отношении прочности, образование хрупких ИМФ при термических процессах может снизить формуемость этих соединений. Этот аспект не был изучен в ходе исследований.

## НОВЫЕ КНИГИ

### С. Фельбер. Трубопроводное производство (на английском языке). — Вена: OEGS (Австрийское сварочное общество), 2009. — 792 с.

Во вступлении речь идет о разработке и использовании трубных и дуплексных сталей при строительстве трубопроводов для транспортировки природного газа и сырой нефти в Австрии, Европе, Америке, Австралии; об авариях и их причинах, профилактике, ловушках трещин, коррозии и защите от коррозии; способах определения и оценки дефектов.

Представлены материалы для трубопроводов, которые включают трубные стали (класс прочности X70, X80, X100 и X120) и дуплексные стали (1.4462) с химическим составом, стандартами и обозначениями, физическими свойствами, фазовыми диаграммами, особенностями превращения, выделения фаз, показателями коррозионной стойкости, механическими свойствами, особенностями изготовления.

Даны сведения о свариваемости и термической обработке трубных и дуплексных сталей с учетом эквивалентного содержания углерода  $C_{ЭКВ}$  и твердости, эквивалентном содержании хрома и никеля ( $Cr_{ЭКВ}$  и  $Ni_{ЭКВ}$ ), зоне крупного зерна в ЗТВ, содержании феррита в металле шва и ЗТВ, трещинах, вызванных водородом, горячих трещинах. Приведены особенности о ручной дуговой сварке металлов, дуговой сварке металлов в среде защитных газов, сварке вольфрамовым электродом в среде инертных газов, гипербарической сварке, новых разработках (сварке трением с перемешиванием, электронно-лучевой сварке, электронно-лучевой сварке при уменьшенном вакууме, лазерной сварке, лазерной гибридной сварке).



Описаны результаты механических испытаний на растяжение, оценки твердости, ударной вязкости трубных и дуплексных сталей и их сравнение со справочными данными. Приведены также результаты механических испытаний на разрушение (испытания CTOD, испытания на задержание трещин) трубных и дуплексных сталей и их сравнения со справочными данными, безопасность излома при механических нагрузках и прогнозы усталостной долговечности, безопасность излома при механических нагрузках и оценки ресурса трубопровода с природным газом.

Описаны физические методы оценки материалов (металлография на просвет, испытания на микротвердость, количественный анализ микроструктуры, электронный сканирующий микроскоп (SEM), микроанализ электронным зондом), итоги результатов и сравнение со справочной информацией.

Приведены сведения об особенностях проектирования, строительства, эксплуатации трубопроводов (наземных и морских) в гражданском строительстве, строительстве трубопроводов, используемых технологиях сварки и транспортировки, полевых испытаниях со сталями класса X80, испытаниях сварных соединений и покрытий и др. Рассмотрены экономические аспекты, безопасность, защита и экологические аспекты.

Даны сведения о качестве исследований в области строительства трубопроводов.

Рассчитана на специалистов, занимающихся проектированием, производством и эксплуатацией трубопроводного транспорта.

**Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка:** В 2-х частях. Ч. 1 (273 с.) и Ч. 2 (350 с.). — Матер. Международ. симп., провод. в рамках 12-й Международной выставки «Порошковая металлургия - 2009», междунар. спец. салона «Защита от коррозии. Покрытия - 2009», Минск, 25–27 марта 2009 г., Институт порошковой металлургии ГНПО ПМ НАН Беларуси, 2009 г.

В обе части сборника включены доклады Международного симпозиума «Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка» (25–27 марта 2009 г.). Тематика семинара включала следующие разделы: инженерия поверхности (18 докл.); защитные покрытия (19 докл.); новые технологии получения и свойства порошковых композиционных материалов (25 докл.); применение порошковых композиционных материалов в технике (21 докл.); передовые сварочные технологии, материалы и оборудование. Совершенствование нормативной базы (11 докл.).

География участников включала ученых, специалистов, преподавателей и аспирантов и охватывала такие города, как Москва, Минск, С.-Петербург, Киев, Новочеркасск, Луцк, Ригу, Гжель, Гомель, Томск, Таллинн, Полоцк.



## ВЫСТАВКА «МЕТАЛЛЫ СИБИРИ: МЕТАЛЛУРГИЯ. МАШИНОСТРОЕНИЕ. МЕТАЛЛООБРАБОТКА. СВАРКА» в НОВОСИБИРСКЕ

С 24 по 27 марта в г. Новосибирске в МВЦ «ITE Сибирская Ярмарка» прошла одна из крупнейших в Западной Сибири специализированных промышленных выставок «Металлы Сибири: Металлургия. Машиностроение. Металлообработка. Сварка». Несмотря на экономический кризис и спад производства, свою продукцию и товары представили производители и поставщики металлообрабатывающего и сварочного оборудования, инструмента, металлопроката, станков, приборов из разных городов России, а также из Германии, Италии, Финляндии, Швейцарии. В общей сложности участие в выставке приняли более 100 производственных предприятий и дилеров промышленного оборудования.

Экспозиция выставки была представлена цветным и черным металлопрокатом, оборудованием и технологиями для сварки, оборудованием и технологиями для металлообработки, робототехникой, промышленным программным обеспечением.

Фирмы «Промтекс», «Сибмонтажкомплект», «Шторм-ИТС», «Уралтермосвар» демонстрировали современное сварочное оборудование. Компания «Шторм-ИТС» представила серию немецкого сварочного оборудования, некоторые образцы не имеют аналогов на современном рынке. Особый интерес вызвал аппарат для точечной сварки, представленный компанией «Промтэкс», который позволяет практически мгновенно приваривать тонкие металлические детали, не повреждая и не деформируя их. Фирма «Евротехпром» выставила на стенде сварочного робота, обеспечивающего высокую точность позиционирования сварочной головки при сварке. Техника, станки и инструменты для металлообработки, а также инжиниринговые услуги составили самый обширный раздел экспозиции. Свою продукцию и оборудование демонстрировали компании «Абамет», «Альфа Трэнд», Савеловский машиностроительный завод, «Делкам-Новосибирск», «Совплим-Холдинг», ООО «Станки РТМ», ООО «Хандтманн Руссланд» и др. Насыщенная деловая программа выставки была посвящена ключевым проблемам машиностроительной отрасли России. В ходе проведенных научно-практических конференций «Инновационные разработки российских станкостроителей для технического перевооружения предприятий Сибирского региона», «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе», «Информационные технологии в промышленности» было уделено особое внимание вопросам поддержки

промышленных предприятий в период кризиса, возможности привлечения инвестиций для наукоемких проектов, взаимодействия научно-исследовательских организаций и производственных предприятий и внедрение современных технологий в производство.

В рамках выставки прошла ежегодная VIII Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе», которая стала площадкой для обмена опытом между представителями разных научных школ Сибирского региона. Организаторами этого мероприятия стали ОАО НПТ и ЭИ «ОРГСТАНКИНПРОМ» (г. Новосибирск), ООО НПК «МАШСЕРВИСПРИБОР» (г. Новосибирск), журнал «Обработка металлов» (г. Новосибирск), которые общими усилиями поддерживают высокий статус конференции. Активное участие в конференции приняли специалисты из Новосибирского государственного университета, Кузбасского технического университета, Томского политехнического университета, Юргинского технологического института (филиала) Томского политехнического университета, Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова, представители предприятий. В этом году работали две секции — «Технология. Материалы» и «Оборудование. Инструмент». Во время заседаний были представлены доклады, в которых затрагивались проблемы совершенствования технологий механической и физико-технической обработки металлов, конструирования металлообрабатывающего оборудования и инструмента, повышения эффективности различных видов инструментов, оптимизации расходов промышленных предприятий.

С интересом наблюдали на выставке, проходивший конкурс сварочного мастерства. В нем приняли участие сварщики новосибирских предприятий, а также студенты профильных училищ и колледжей.

Участие в подобных выставках с обширной деловой программой способствует развитию взаимодействия вузов с производственными предприятиями, повышению конкурентоспособности отечественной продукции, а также привлечению инвесторов к реализации инновационных научных проектов в разных областях машиностроения.

А. А. Моховиков, Д. А. Чинахов,  
кандидаты техн. наук

## ПАМЯТИ В. В. СМИРНОВА



8 июня 2009 г. на 80-м году после продолжительной тяжелой болезни ушел из жизни Владимир Валерьянович Смирнов — известный ученый и организатор в области сварочного оборудования и технологии, вице-президент Российского научно-технического сварочного общества, доктор технических наук,

лауреат Государственной премии СССР, заслуженный машиностроитель РФ. Его трудовой стаж насчитывает более 65 лет. Начав работать во время войны, 13-летним подростком, он прошел тяжелый, но яркий путь от рабочего до генерального директора Института сварки России, хорошо известного многим предприятиям Советского Союза и зарубежным фирмам еще как ВНИИЭСО (Всесоюзный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт электросварочного оборудования).

После окончания в 1959 г. Северо-Западного заочного политехнического института В. В. Смирнов был направлен в очную аспирантуру ЦНИИ материалов и в 1966 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию, посвященную решению проблем автоматизации процессов дуговой сварки.

В 1968 г. В. В. Смирнов был назначен заместителем директора ВНИИЭСО по научной работе и оставался на этом посту в течение 13 лет. В этот период в институте разработаны и внедрены в серийное производство новейшие образцы сварочной техники — машины для сварки трением, контактной сварки на постоянном токе, холодной сварки металлов, лазерной сварки и резки, плазменной обработки металлов и другое сварочное оборудование.

В 1970-е годы В. В. Смирнов принимал непосредственное участие в организации строительства Псковского завода тяжелого электросварочного оборудования и филиала ВНИИЭСО при нем.

В 1981 г. он назначен директором ВНИИЭСО и главным конструктором по разработке робототехнологических комплексов для сварки и плазменной обработки, а также сварочного электрооборудования общего и специального назначения и внедрению его на предприятиях различных отраслей народного хозяйства страны. В 1983 г. становится научным руководителем темы «Повышение техниче-

ского уровня сварочного производства на предприятиях Минэлектротехпрома СССР», выполняя при этом функции главного сварщика министерства.

В 1988 г. В. В. Смирнов защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. С 1989 по 1992 гг. возглавлял НПО «ВНИИЭСО», в которое входили головной институт и два завода электросварочного оборудования. В период с 1996 по 2002 гг. в институте под его руководством разработаны и внедрены в производство источники питания для дуговой сварки на принципиально новой основе, новая технология и оборудование для восстановительной двухдуговой наплавки колес железнодорожных и трамвайных вагонов, нашедшие широкое применение на предприятиях МПС, технология ускоренного отогрева грунта и магистральных водопроводных труб для городского хозяйства и кабельной сети ОАО «Ленэнерго».

В. В. Смирнов являлся организатором в Санкт-Петербурге Учебного центра по подготовке сварщиков по европейским нормам для различных отраслей промышленности России и других стран СНГ, Альянса сварщиков Санкт-Петербурга и региона. Он также являлся непосредственным организатором выставок «Сварка», превратившихся под его руководством в плодотворный научно-технический и коммерческий форум.

В. В. Смирнов активно занимался общественной работой. Он был академиком-секретарем Международной и Российской инженерных академий, президентом Альянса сварщиков Санкт-Петербурга, вице-президентом Российского научно-технического сварочного общества. Он автор книг по истории сварочной подотрасли, о ветеранах, труд которых позволял гордиться достижениями страны.

В. В. Смирновым опубликовано около 200 печатных работ, включая авторские свидетельства и патенты на изобретения.

Профессиональная деятельность В. В. Смирнова отмечена правительственными наградами — орденами «Знак Почета», «Дружбы народов», медалями СССР и знаком «Житель блокадного города».

Уход Владимира Валерьяновича Смирнова тяжелая потеря для науки и техники. Светлую память о нем надолго сохраняют в своих сердцах все, кто знал и работал с ним.

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

## ПОДПИСКА — 2009 на журнал «Автоматическая сварка»

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
	240 грн.	480 грн.	2100 руб.	4200 руб.	78 дол. США	156 дол. США

\*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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

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

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

### ПОДПИСНОЙ КУПОН

Адрес для доставки журнала \_\_\_\_\_

Срок подписки с \_\_\_\_\_ **200 г. по** \_\_\_\_\_ **200 г. включительно**

Ф. И. О. \_\_\_\_\_

Компания \_\_\_\_\_

Должность \_\_\_\_\_

Тел., факс, E-mail \_\_\_\_\_



## РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

### Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (190×190мм) — 700\$

Вторая страница обложки (200×290мм) — 550\$

Третья страница обложки (200×290мм) — 500\$

Четвертая страница обложки (200×290мм) — 600\$

### Обложка внутренняя, полноцветная

Первая страница обложки (200×290мм) — 400\$

Вторая страница обложки (200×290мм) — 400\$

Третья страница обложки (200×290мм) — 400\$

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

### Внутренняя вставка

Полноцветная (разворот А3) (400×290мм) — 570\$

Полноцветная (200×290мм) — 340\$

Полноцветная (200×142мм) — 170\$

Реклама в разделе информации

Полноцветная (165×245мм) — 300\$

Полноцветная (165×120мм) — 170\$

Полноцветная (82×120мм) — 80\$

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу

- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу

- Статья на правах рекламы — 50% стоимости рекламной площади

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

### Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290мм

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

### Все файлы в формате IBM PC

- Corell Draw, версия до 10.0

- Adobe Photoshop, версия до 7.0

- QuarkXPress, версия до 7.0

- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

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

Подписано к печати 23.04.2009. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 9,00. Усл.-отт. 9,60. Уч.-изд. л. 10,01 + 4 цв. вклейки. Цена договорная.

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



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

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

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

**Порошковые проволоки** — ПП-АН1, ПП-АН3,  
ПП-АН7, ПП-АН19, ПП-АН19Н, ПП-АН24С, ПП-АН30,  
ПП-АН59, ПП-АН61, ПП-АН63, ПП-АН67, ПП-АН68М,  
ПП-АН69, ПП-АН70М, ПП-АНВ2У, ПП-НnX25П4Н3Т,  
ППС-ЭК1, ППС-ЭК2, ППР-ЭК3, ППР-ЭК4

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

**Флюсы керамические** — АНК-40, АНК-47А,  
АНК-57, АНК-565

Возможно изготовление других марок материалов

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

**HYUNDAI**  
WELDING CO., LTD.



*Ваши надежные партнеры в мире сварки!*



Официальный дилер "HYUNDAI Welding Co., Ltd." в Украине:  
ООО "НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА "ЗНА"  
ул. Антоновича (Горького), 69, г. Киев, 03150 (справки в Киеве и Харькове)  
Тел. +38(044) 200-80-25, факс (044) 200-85-17  
e-mail: info@zna.com.ua  
www.zna.com.ua

ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
**СпецСплав**

**ПРОИЗВОДСТВО:**

Флюсы сварочные

Проволоки порошковые для внепечной  
обработки металлургических расплавов

Проволоки порошковые для сварки, наплавки,  
напыления и металлплазлы

Электроды наплавочные, специального назначения,  
для сварки чугуна и резки

Ферросплавы и легатуры

Хром металлический

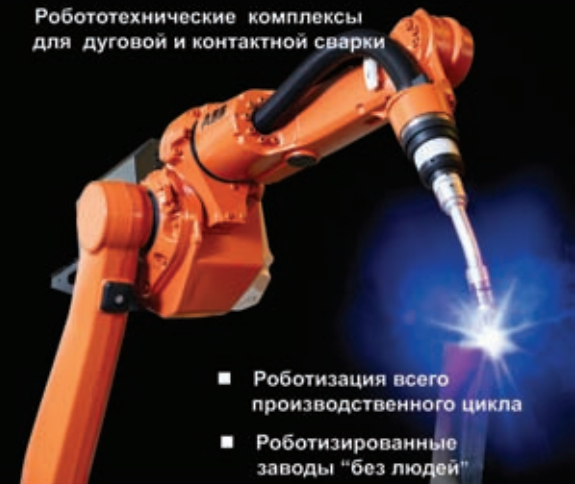
Комплексные раскислители и модификаторы

ул. Курганская, 1  
г. Днепродзержинск  
49051, Украина

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

**ABB - сердце робототехники**

Робототехнические комплексы  
для дуговой и контактной сварки



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

ABB Ltd  
Украина, 03038, Киев  
ул. Гриценко, 2/1  
Тел.: +380 44 495 22 11  
Факс: +380 44 495 22 10  
E-mail: robotics@ua.abb.com  
www.abb.ua



С 1992 г. на рынке сварочного оборудования Украины



**предприятие**  
**«Триада-Сварка»**  
г. Запорожье

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




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



**ОАО «ЗАПОРОЖСТЕКЛОФЛЮС»**  
69035, Украина г. Запорожье, ул. Диагональная, 2  
Тел.: +380 (61) 289-03-53; факс: +380 (61) 289-03-50  
E-mail: [market@steklo.zp.ua](mailto:market@steklo.zp.ua)

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

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

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

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

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

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



**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**  
**«ПРОБЛЕМЫ СВАРКИ, РОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И ТЕХНОЛОГИЙ»**

**Организаторы конференции**

Министерство образования и науки Украины  
Национальная академия наук Украины  
Национальный университет кораблестроения (НУК)  
Национальный технический университет Украины «КПИ»  
Институт электросварки им. Е. О. Патона  
Институт сильноточной электроники СО РАН РГТУ им. К.Э. Циолковского «МАТИ»  
Международная ассоциация «Сварка»  
Общество сварщиков Украины  
ГП НПК «Заря-Машпроект»  
ОАО судостроительный завод «Вадаи Ярде «Океан»

**Место проведения конференции**

Национальный университет кораблестроения им. Адмирала Макарова  
пр-т Героев Сталинграда, 9 г. Николаев, Украина

**Порядок работы конференции**

14 октября — заезд и регистрация участников;  
15–16 октября работа конференции;  
17 — отъезд участников конференции

**Координаты оргкомитета**

Ответственный секретарь Лабарткава Андрей Владимирович – (0512) 397-746; e-mail: [welding@usmtu.edu.ua](mailto:welding@usmtu.edu.ua)  
Заместитель председателя оргкомитета д.т.н. профессор Квасницкий Вячеслав Федорович – (0512) 397-318

