

### Nº 6 (662) Июнь 2008

Издается с 1948 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: Главный редактор Б. Е. ПАТОН Ю. С. Борисов, Н. М. Воропай, В. Ф. Грабин, А. Т. Зельниченко, А. Я. Ищенко, И. В. Кривцун, С. И. Кучук-Яценко, Ю. Н. Ланкин, В. К. Лебедев (зам. гл. ред.), В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.), В. И. Либанов, А. А. Мазур,
В. И. Махненко, О. К. Назаренко,
И. К. Походня, И. А. Рябцев,
Б. В. Хитровская (отв. секр.),
В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ: Н. П. Алешин (Россия) Гуань Цяо (Китай) У. Дилтай (Германия) П. Зайффарт (Германия) А. С. Зубченко (Россия) В. И. Лысак (Россия) Н. И. Никифоров (Россия) Б. Е. Патон (Украина) Я. Пилярчик (Польша) Г. А. Туричин (Россия) Чжан Янмин (Китай) Д. фон Хофе (Германия) УЧРЕДИТЕЛИ: Национальная академия наук Украины, Институт электросварки

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

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

Свидетельство о государственной регистрации КВ 4788 от 09.01.2001. Журнал входит в перечень утвержденных ВАК Украины изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней. При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна. За содержание рекламных материалов редакция журнала ответственности не несет. Цена договорная.

#### СОДЕРЖАНИЕ

НОВОСТИ 3
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ
<i>Кучук-Яценко С. И., Загадарчук В. Ф., Швец В. И., Гордань</i> <i>Г. Н.</i> Влияние неметаллических включений в низколегиро- ванных сталях на их свариваемость при контактной стыковой сварке оплавлением
<i>Махненко В. И., Великоиваненко Е. А., Олейник О. И.</i> Выбор технологий устранения дефектов в магистральном трубопроводе без вывода его из эксплуатации
<i>Харламов М. Ю., Кривцун И. В., Коржик В. Н., Петров С. В., Демьянов А. И.</i> Влияние рода газа спутного потока на характеристики дуговой плазмы, создаваемой плазмо-
троном с проволокой-анодом
напряжений при лазерной сварке
Колодзийчак П., Калита В. Оценка качества соединений магниевых сплавов, полученных лазерной сваркой
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ
Альберт Ф., Гримм А., Кагелер С., Шмидт М. Лазерная

<i>Альберт Ф., Гримм А., Кагелер С., Шмидт М.</i> Лазерная	
сварка и пайка в автомобестроении	37
Пашков И. Н., Ильина И. И., Родин И. В., Шокин С. В.,	
Таволжанский С. А. Способы получения и применение	
быстрозакаленных припоев	43
Покляцкий А. Г. Характерные дефекты при сварке трением	
с перемешиванием тонколистовых алюминиевых сплавов и	
основные причины их образования	48

#### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Найда В. Л., Мозжухин А. А., Лобанов О. Ф., Игнатенко	
В. А., Олейник Ю. А., Ефимов И. В., Копылов А. П., Захаров	
А. Ф. Модернизированное оборудование для АУЗК	
концевых участков труб	53
Изобретения стран мира	55
По зарубежным журналам	57

#### ХРОНИКА

Поздравляем лауреатов Премии им. Е. О. Патона	60
Международные специализированные выставки «Сварка и	
резка» и «Защита от коррозии. Покрытия»	60
Выставка «Сварка. Родственные технологии» в Киеве	61
Памяти В. М. Карпенко	64
ИНФОРМАЦИЯ	65

### **International Scientific-Technical and Production Journal**

# Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)

Nº 6 (662) June 2008 Published since 1948

WELDING - CUTTING - SURFACING - BRAZING - COATING

### CONTENTS

NEWS ...... 3

#### SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Kuchuk-Yatsenko S. I., Zagadarchuk V. F., Shvets V. I., Gor-	
dan G. N. Effect of non-metallic inclusions in low-alloy steels	
on their weldability in flash-butt welding	5
Makhnenko V. I., Velikoivanenko E. A., Oleinik O. I. Selection	
of technologies of elimination of defects in main pipeline with-	
out its service interruption 1	2
Kharlamov M. Yu., Krivtsun I. V., Korzhik V. N., Petrov S. V.,	
Demjanov A. I. Effect of type of concurrent flow gas on charac-	
teristics of arc plasma, generated by plasmatron with a wire-	
anode 1	9
Bokota A., Pekarska V. Modeling of residual stresses in laser	
welding 2	25
Kolodziejczak P., Kalita W. Assessment of quality of magne-	
sium alloy joints made by laser welding	32

#### **INDUSTRIAL**

Albert F., Grimm A., Kageler C., Schmidt M. Laser welding and	
brazing in automotive industry	37
Pashkov I. N., Iljina I. I., Rodin I. V., Shokin S. V., Tavolzhansky	
S. A. Methods of producing and application of rapidly-quenc-	
hed brazing alloys	43
Poklyatsky A. G. Characteristic defects in friction stir welding	
of thick-sheet aluminium alloys and main causes of their for-	
mations	48

#### **BRIEF INFORMATION**

Naida V. L., Mozzhukhin A. A., Lobanov O. F., Ignatenko V. A., Oleinik Yu. A., Efimov I. V., Kopylov A. P., Zakharov A. F. Up-	
dated equipment for AUST of cumferential regions of pipes	53
Inventions of countries of allover the world	55
Review of foreign journals	57

#### NEWS

Congratulations to laureates of the E. O. Paton Prize	60
International specialized exhibitions «Welding and Cutting» and	
«Corrosion Protection. Coatings»	60
Exhibition «Welding. Related Technologies» in Kiev	61
In memory of V. M. Karpenko	64

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



© NAS of Ukraine, PWI, International Association «Welding», 2008

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)

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief B.E.PATON

Yu. S. Borisov, N. M. Voropaj, V. F. Grabin, A. T. Zelnichenko,

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

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

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

*Editors:* E. N. Kazarova, T. V. Yushtina *Electron galley:* I. S. Batasheva, L. N. Gerasimenko, A.I.Sulima, I. R. Naumova, I. V. Petushkov State Registration Certificate

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

KV 4788 of 09.01.2001

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

#### - НОВОСТИ

#### СВАРОЧНЫЕ ТЕХНО-ЛОГИИ ФРОНИУС В МОСТОСТРОЕНИИ

Когда в Сарагосе 14 июня 2008 г. откроется всемирная выставка, все внимание будет приковано к конструкции длиной 275 м, возведенной через реку Эбро. Мост будет притягивать внимание, завораживать и станет центром и многоэтажным выставочным павильоном для «Экспо 2008». В его сердце находится 5,500 тыс. кг стали. Сварка опорной конструкции была выполнена известной испанской компанией «Урсса», специализирующейся в области открытых стальных конструкций.



Над созданием этого моста компания работала с января 2007 г. Использовалось сварочное оборудование компании «Галаэлектроник», испанского партнера «Fronius International», которое включало 42 сварочные системы TransPlus-Synergic 4000, VarioSynergic 5000 и TransSynergic 5000. Служащие компании «Галаэлектроник» также оказывали техническую поддержку. Они показали, что 80 специалистов по сварке компании «Урсса», которые работали в две смены, способны были выполнить работу точно по графику с наивысшим качеством. В ключевые моменты на участке находилось более 160 свар-щиков. Сталь, 95 % которой поставлялось в виде листовых заготовок, имела толщину от 6 до 100 мм, и это не един-



ственный впечатляющий факт: законченная стальная конструкция имеет 10 тыс. м сварных швов, для выполнения которых сварщики использовали в целом 100 тыс. кг присадочного материала для разделки кромок с зазором до 2 мм.

П. Арредондо, технический руководитель проекта по стальным конструкциям компании «Урсса», отмечает, что перед подписанием договора о найме и наряда-заказа на выполнение услуг была проведена оценка технических возможностей сварочных систем от компании «Fronius» на практике. Выбор был сделан в пользу сварочных систем от компании «Fronius».

14 июня, когда первые посетители попадут на мост во время «Экспо 2008», сварщики компании «Урсса» и оборудование компании «Галаэлектроник» уже будут вовлечены в выполнение других ответственных заказов.

#### КОМПЛЕКС НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ДУ-ГОВОЙ СВАРКИ НЕПО-ВОРОТНЫХ СТЫКОВ ТРУБ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Назначение разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ комплекса «СТЫК» — автоматическая дуговая сварка неповоротных стыков труб магистральных трубопроводов порошковой проволокой с принудительным формированием шва двумя сварочными головками орбитально снизу вверх.

Корневой шов выполняется снаружи соединения труб с применением самоходного внутреннего центратора со специальным медным подкладным кольцом в автоматическом режиме. Последующими проходами заполняется разделка и выполняется облицовка шва. За каждый проход разделка заполняется на 5...8 мм (в зависимости от толщины стентруб). Для выполнения ки сварных соединений из сталей класса Х70 и Х80 разработаны специализированные порошко-





A DIOMATINGERAE

#### НОВОСТИ -

вые проволоки диаметром 1,6; 2,0 и 2,4 мм.

Изготовитель оборудования комплекса «СТЫК» — ОАО «Каховский завод электросварочного оборудования». Изготовитель специализированных порошковых проволок — ГП «Опытный завод сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины». Научнотехническое сопровождение проекта — ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ.

#### ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ТИГЕЛЬНАЯ ПЕЧЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Разработанная в НТК «ИЭС им. Е. О. Патона» тигельная печь представляет собой компактный агрегат, поставляемый в составе технологического комплекса, предназначенного для создания металлургического мини-завода.

Комплекс находит применение для переплава отходов производства черных и цветных металлов и сплавов, для переработки отвалов ферросплавных предприятий и в переделе различных промышленных неметаллических отходов, в производстве карбида кальция и флюсов.



Помимо печи, в состав комплекса входят:

 оригинальный модульный источник питания, который состоит из нескольких независимых выпрямителей;

- блок управления, состоящий из пульта управления и шкафа;

 газоочистной агрегат (обеспечивает степень очистки отходящих газов не менее — 97,5%; содержание оксидов углерода, азота, серы в них



после очистки ниже уровня ПДК ).

Основные технические характеристики комплекса: напряжение питающей сети 380 В; первичная мощность 630 кВт; рабочее напряжение 0...56 В; рабочий ток (max) 9000 А; объем тигля печи (рабочий) 200 дм<sup>3</sup>; режим работы — непрерывный.

#### УСТРОЙСТВО НЕПРЕРЫВНОЙ РЕЗКИ «ДОНМЕТ-807»

Краматорский завод автогенного оборудования «Донмет» радует потребителей не только своей серийной продукцией, но и оригинальными устройствами для газопламенной резки проката.

Одно из таких устройств — «Донмет-807». Летом 2007 г. оно было внедрено в производство на механическом участке прокатного цеха ОАО «Донецкий металлопрокатный завод». Это устройство позволило автоматизировать разделку проката сечением 125 х 125 мм, осуществлявшуюся ранее ручными резаками.

Устройство непрерывной резки представляет собой самоходную переносную машинку CG-100 со смонтированной на ней штангой с суппортом, в котором закреплены газовые резак и горелка «Донмет-290».

Энергоносители (горючий газ и кислород) подводятся к резаку и горелке по специальным рукавам от газового коллектора, закрепленного на корпусе самоходной машинки.

Самоходная машинка перемещается по направляющему





скорость газовой резки устройства может составлять от 80 до 800 м/мин.

Как показала практика использования устройства «Донмет-807» на механическом участке прокатного цеха ОАО «Донецкий металлопрокатный завод», время резания проката сечением 125 х 125 мм сократилось на 40 % по сравнению с ручной резкой. Кроме того, при машинной обработке более чем в полтора раза (с 8 до 5 мм) уменьшилась ширина реза, а следовательно, и потери металла в процессе подготовки заготовок. Также на 10 % снизился расход горючего газа (метана) и кислорода.



## ВЛИЯНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЯХ НА ИХ СВАРИВАЕМОСТЬ ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ ОПЛАВЛЕНИЕМ

Академик НАН Украины С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, В. Ф. ЗАГАДАРЧУК, инж., В. И. ШВЕЦ, Г. Н. ГОРДАНЬ, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние неметаллических включений (HB), содержащихся в низколегированных сталях, на формирование соединений при контактной стыковой сварке оплавлением (КССО). Рассмотрены HB в сталях данного класса, в состав которых входят элементы, не регламентируемые стандартами. Показано, что наличие в стали таких HB ухудшает ее свариваемость, особенно если в них содержатся элементы, образующие тугоплавкие оксиды. Определены пути совершенствования технологий КССО при сварке сталей с повышенным содержанием HB.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка оплавлением, режим сварки, низколегированная сталь, легирующий элемент, неметаллическое включение, оксид, свариваемость, соединение, микроструктура, излом, фрактография

Контактная стыковая сварка оплавлением (КССО) широко используется для соединения проката из низкоуглеродистых и низколегированных сталей (профили, трубы, листы) в заводских и монтажных условиях. Режимы сварки таких изделий регламентированы в различных ведомственных инструкциях и нормативных документах. При их определении обычно принимают во внимание содержание в стали основных легирующих элементов, а также некоторых примесей, в частности, серы и фосфора, содержание которых контролируется. Соединения, выполненные КССО, отличаются стабильными и высокими показателями механических свойств, близкими к соответствующим показателям основного металла. Однако из многолетней практики применения КССО известны случаи, когда при сварке отдельных партий проката, несмотря на отсутствие каких-либо отклонений режимов сварки и химического состава стали от регламентированных значений, не удается получить стабильные показатели механических свойств. Чаще всего это обусловлено наличием неметаллических включений (HB) в сварных швах.

В современном металлургическом производстве применяются различные методы обработки жидкого металла с использованием шлаков, ферроприсадок, содержащих различные модификаторы и раскислители. В результате их взаимодействия с жидким металлом в нем остаются НВ, содержащие различные элементы, которые не входят в состав легирующих. Их содержание в металле не регламентируется [1].

Целью настоящей работы было исследование влияния НВ в низколегированных сталях на формирование соединений, полученных КССО, и их механические свойства.

Исследования проводили на цельнотянутых трубах нефтегазового сортамента из стали 20, изготовленных на различных предприятиях Украины и России и отличающихся технологией производства. Для сварки были выбраны две партии труб диаметром 168 мм с толщиной стенки 6,5 мм (партия № 1) и диаметром 178 мм с толщиной стенки 10 мм (партия № 2). Сварку труб выполняли на контактной стыковой машине К584 конструкции ИЭС им. Е. О. Патона, которая серийно выпускается Каховским заводом электросварочного оборудования [2]. Такие машины используются в различных отраслях промышленности, в том числе на предприятиях нефтегазового комплекса для сварки труб диаметром 114...325 мм.

Таблица 1. Параметры	режимов сварки труб	
----------------------	---------------------	--

№ пар- тии труб	Режим сварки	Время свар- ки, с	Конечная скорость оплавле- ния, мм/с	Припуск на оплавле- ние, мм	Максималь- ная потреб- ляемая мощность, кВ·А	Удельное давление осадки, кг/мм <sup>2</sup>	Величина осадки, мм	Минималь- ная ско- рость осад- ки, мм/с
1, 2	А (регламентирован ВСН 006-89)	7580	1,01,2	16,519,2	76	4,05,6	6	25
2	Б (усовершенствованный)	4550	4,04,5	15,016,0	304	5,0	7	100

С. И. Кучук-Яценко, В. Ф. Загадарчук, В. И. Швец, Г. Н. Гордань, 2008



# 0

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

№ партии труб	С	Si	Mn	S	Р	Cr	Ni	Cu	Al*	V*	Mo*	Ti*	Nb*	As
1	0,212	0,218	0,60	0,017	0,014	0,03	0,03	<0,02	0,021	<0,02	<0,03	<0,002	0,002	
2	0,163	0,327	0,52	0,003	0,007	0,11	0,13	0,19	0,010	0,05	0,03	0,002	<0,002	0,01

Таблица 2. Химический состав стальных труб, мас. %

Таблица З. Элементный состав НВ в трубных сталях, мас. %

№ партии труб	Al	Si	Mg	S	Mn	О	V	Ca	Примечание
1	0,382	0,421	0,467	0,132	0,659	1,157	Не опр.	Не опр.	Мелкие оксиды железа
	0,2780,298	0,3210,464	0,3660,775	5,58413,496	10,35819,304	1,26713,425	» »	» »	Оксисуль- фиды железа и марганца
2	8,68031,183	1,21623,117	1,9698,194	0,1050,421	0,3891,000	15,26337,527	0,0180,059	0,2776,819	Оксиды системы Al–Si–Mg–Ca
	0,3310,653	6,67230,933	0,3280,731	0,0120,050	0,4840,226	10,20617,722	0,0740,062	0,0740,261	Силикаты железа

LOROMATHREEKAE

На первом этапе исследований сварку труб обеих партий проводили на режиме, регламентируемом ведомственным нормативным документом [3]. Основные параметры режима приведены в табл. 1 (режим А). Испытание сварных соединений труб проводили в соответствии с упомянутым выше нормативным документом и международным стандартом АРІ 1104.

Идентификацию и распределение НВ в исследуемых образцах основного металла и сварных соединений проводили на полированных микрошлифах, содержание химических элементов в НВ определяли на микроанализаторе модели SX-50 Сатеbах фирмы «Сатеса». С целью идентификации структурных составляющих основного металла и сварных соединений в исследуемых образцах применяли травление в нитале, а микроструктуру изучали на микроскопе «Неофот-32» при различных увеличениях. Фрактографические исследования поверхности изломов выполняли на растровом микроскопе JSM-840 с микроанализатором «Lynk-Systems».

Содержание регламентированных легирующих элементов в обеих партиях примерно одинаково (табл. 2), а по составу неконтролируемых включений они различаются (табл. 3). В стали партии  $\mathbb{N}_2$  1 присутствуют мелкие глобулярные включения оксидов железа и включения большего размера оксисульфидов марганца и железа (рис. 1, *а*). Встречаются однородно распределенные в структуре включения оксидов алюминия, окантованные сульфидной фазой. В стали труб партии  $\mathbb{N}_2$  2 оксисульфиды не наблюдаются. В металле



Рис. 1. Неметаллические включения в трубных сталях ( $\times 250$ ) партии № 1 (*a*) и 2 ( $\delta$ )

присутствуют многочисленные частицы сложных оксидов размером порядка 1 мкм, в состав которых входят алюминий, кремний, магний, кальций

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



Рис. 2. Микроструктура стали труб партии № 1 (а, б) и 2 (в, г) (а, в — ×100; б, г — ×500)

(рис. 1,  $\delta$ ). Частицы наряду с однородным распределением их в объеме образуют также скопления в виде полос. Кроме этих частиц, в стали присутствуют включения силикатов железа с несколько повышенным содержанием элементов, входящих в состав частиц.

Микроструктура сталей труб обеих партий перлитно-ферритная (рис. 2), однако она значительно отличается морфологически. Зерна феррита в стали труб партии № 1 имеют грубую полигональную форму (рис. 2, *a*, *б*), между ними расположены колонии перлита. Микроструктура стали труб партии № 2 отличается меньшим размером зерна и состоит из феррита и отпущенных продуктов эвтектоидного распада (рис. 2, *в*, *г*).

Ширина ферритной полоски [4] сварного шва труб партии  $\mathbb{N}$  2 в 1,5 раза больше, чем в соединениях труб партии  $\mathbb{N}$  1 (рис. 3, *a*, *б*). При этом протяженность остальных структурных участков металла 3TB и размер зерен в них идентичны, что обусловлено одинаковым тепловложением при сварке. На рис. 4, *а* представлен макрошлиф соединения труб партии  $\mathbb{N}$  1, а на рис. 4, *б* партии  $\mathbb{N}$  2, сваренных на режиме А. Увеличение ферритной составляющей в шве косвенно свидетельствует о более интенсивном зарождении центров кристаллизации феррита, что может быть вызвано присутствием в шве оксидов, в состав которых входят ванадий и алюминий, которые, как известно [5], относятся к ферритообразующим элементам.

В работе [6] показано, что на формирование структуры в зоне соединения деталей при КССО существенное влияние оказывает состояние расплава жидкого металла, образующегося при оплавлении контактирующих деталей. Формирование качественных соединений возможно при таких параметрах КССО, когда расплав не успевает закристаллизоваться к моменту деформации торцов свариваемых деталей. При этом большая его часть выдавливается из стыка, а часть остается, формируя структуру с ферритной окантовкой по границам зерен. Расплав и соответственно его остатки в сварном шве отличаются повышенным содержанием кислорода. Поэтому металл на участке ферритной полоски в целом имеет пониженные механические свойства по сравнению с соседними участками. Наличие в стали элементов, образующих тугоплавкие оксидные плены на поверхности расплава, удаление которых в процессе осадки затруднено, приводит к сохранению оксидных плен в структуре шва, формирование которых во многом зависит от содержания оксидных структур в расплаве. При небольшом количестве оксидов образуются отдельные НВ.

В ферритной полоске соединений труб партии  $\mathbb{N}_{2}$  1 обнаружены отдельные НВ глобулярной формы (рис. 3, *a*). В швах труб партии  $\mathbb{N}_{2}$  2 мно-



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ -

Таблица 4. Содержание химических элементов в НВ на различных участках соединений труб партии № 2, мас. %

Участок соединения с НВ	Si	Al	Mn	Fe	V	0
Включения в шве (рис. 3, в)	5,48224,052	0,3000,826	2,69826,686	17,79253,723	0,3541,066	25,84636,060
Включения в МП (рис. 5, г)	14,08431,699	0,6551,167	15,69030,428	4,58622,436	0,5840,536	28,65456,919
Пленка непровара (рис. 5, в)	1,054	0,220	0,753	96,076	0,082	1,665



Рис. 3. Микроструктура соединений труб партии № 1 (а) и 2 (б, г): а, б — режим А; в, г — Б (а, б, г — ×100; в — ×500)

Режим сварки	№ партии труб	σ <sub>т</sub> , МПа		σ <sub>в</sub> , 1	МПа	δ, %		
т сжиж сварки	Nº nuprini ipyo	OM	Сварной шов	OM	Сварной шов	OM	Сварной шов	
А	1	<u>394398</u> 397	<u>388391</u> 390	<u>559565</u> 564	<u>555563</u> 557	$\frac{2224}{23}$	<u>2123</u> 22	
	2	<u>411418</u> 415		<u>543547</u> 545	<u>176349</u> 275	$\frac{3133}{32}$		
Б	2		<u>408414</u> 412		<u>531537</u> 534		<u>2931</u> <u>30</u>	

Таблица 5. Механические свойства основного металла (ОМ) и соединений труб обеих партий

#### Окончание табл. 5

Режим сварки	№ партии труб	<i>КСV</i> <sub>+20</sub> , Дж/см <sup>2</sup>		Угол загиба, град	Характер дефектов в изпоме	
		OM	Сварной шов	Сварной шов	b halone	
А	1	<u>121153</u> 150	<u>3051</u> 45	120	Дефекты отсутствуют	
	2	<u>249263</u> 259	_	<u>1020</u> 15	Оксидные плены площадью 1040 мм <sup>2</sup> и МП	
Б	2		<u>3263</u> 59	120	Дефекты отсутствуют	



#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

гочисленные выделения HB расположены не только в плоскости соединения, но и по границам зерен приконтактных участков (рис. 3,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ). По химическому составу они представляют собой железомарганцевые силикаты, содержащие алюминий и ванадий (табл. 4).

В табл. 5 приведены результаты механических испытаний соединений труб обеих партий, сваренных на режиме А. Показатели испытаний образцов партии № 1 весьма близки к аналогичным показателям испытаний образцов основного металла. Механические свойства соединений труб партии № 2 значительно ниже, чем основного металла. Все образцы этой партии разрушились по зоне соединения — ферритной полоске. При визуальном осмотре на поверхности изломов можно выделить характерные участки, отличающиеся макро- и микроструктурой. На участках, где присутствует металлическая связь, излом имеет крупнокристаллическое строение (рис. 5, а, участок 1). В местах отсутствия кристаллического излома соединение проходит через монолитную оксидную плену (рис. 5, участок 2). При КССО такое соединение классифицируется как непровар и отличается низкой пластичностью и прочностью. В зависимости от химического состава оксидные плены могут иметь различную окраску, выделяющую их на поверхности излома. В изломах образцов партии № 2 имелись участки, отличающиеся мелкокристаллической структурой (рис. 5, а, участок 3). Фрактографические исследования участков 1-3 показывают, что на участке излома 1 (рис. 5, б) наблюдается характерная для хрупкого разрушения структура транскристаллитного скола. Структура участка излома 2 (рис. 5, в) представляет собой монолитную оксидную плену толщиной более 20...30 мкм с включениями сложных оксидов на силикатной основе. Участок излома 3 характеризуется ямочным изломом. В неглубоких ямках располагаются преимущественно фрагменты разрушенной оксидной плены, толщина которой не превышает 10...20 мкм (рис. 5, г). Мелкие ямки с небольшими гребнями разрушений свидетельствуют о пластической деформации металла на этом участке в момент зарождения трещины. При визуальном осмотре эти участки поверхности излома независимо от химического состава стали имеют окраску от серой до матовой. В практике КССО их определяют как «матовые пятна» (МП). При небольшой площади МП относительно площади поперечного сечения образцов их влияние на показатели статических испытаний на растяжение сравнительно низкие.

Образцы партии труб № 1 при стандартных механических испытаниях разрушались за пределами плоскости соединения и ЗТВ, поэтому исследования проводили на изломах образцов с надрезами по линии сварки. Анализ полученных дан-

ных показывает, что в изломах образцов партии № 1 обнаружены единичные глобулярные включения, по составу близкие к включениям основного металла. При испытаниях сварных соединений партии № 2 наиболее низкие показатели наблюдались в образцах, где обнаружены оксидные плены и МП большой площади. В отличие от НВ образцов партии № 1 они формируются в виде протяженных плен в плоскости соединения, площадь которых составляет от 10 до 60% ее поверхности. В состав оксидных плен, согласно данным микрорентгеноспектрального анализа (табл. 4), входят, кроме железа и кремния, алюминий и ванадий, которые не являются контролируемыми элементами для этой стали. При этом содержание ванадия в оксидной плене МП почти в 70...100 раз превышает его среднее содержание в стали. Приведенные данные дают основание полагать, что доминирующее влияние на формирование оксидных плен и МП в сварных швах труб партии № 2 оказывают оксиды, содержащие алюминий, кремний, магний и ванадий в составе стали. Сочетание этих элементов ведет к образованию сложных легкоплавких оксидов, приповерхностный слой расплава которых при сварке содержит тугоплавкие оксидные плены, из-за которых затрудняется удаление оксидов при осадке. В местах скопления оксидов в стали (см. рис. 1, б) вероятность образования оксидных плен наиболее высокая. При сварке отдельных образцов труб из партии № 2, где содержание ванадия не превышало 0,02 %, были получены соединения без дефектов в плоскости соединения при том же режиме А который был разработан для труб



Рис. 4. Макрошлифы сварных соединений труб ( $\times$ 2): *а* — партия № 1 режим А; *б* — партия № 2, режим А; *в* — партия № 2, режим Б

ALEVOMAURIERIAR \_\_

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



Рис. 5. Поверхность излома (×6) соединения труб партии № 2, сваренных на режиме А (*a*) и фрактографическая картина (×300) на отдельных участках: 1 — крупнокристаллическое строение; 2 — оксидная плена; 3 — матовое пятно

выпуска 1990-х годов, подобных по химическому составу исследованной партии № 1.

Были проведены работы по усовершенствованию режима А, с учетом сварки труб современного производства, отличающихся большим содержанием НВ. Они были направлены на разработку способов повышения концентрации нагрева при оплавлении приконтактных слоев металла в сочетании с их скоростной деформацией, обеспечивающих сокращение длительности кристаллизации жидкого расплава на поверхности оплавления и взаимодействия его с воздушной средой искрового промежутка. Это потребовало создания новой системы регулирования процесса оплавления и переоборудования некоторых узлов сварочной машины К584. В результате проведенных ис-



следований разработан режим сварки Б (см. табл. 1), обеспечивающий получение качественных соединений труб партии  $\mathbb{N}$  2. По сравнению с режимом А он отличается меньшей длительностью процесса сварки, большей концентрацией энергии при оплавлении, повышенной скоростью осадки. Сварные соединения отличаются меньшей протяженностью ЗТВ (см. рис. 4,  $\varepsilon$ ), уменьшением балла зерна и ширины ферритной полоски (см. рис. 3,  $\varepsilon$ ). Механические свойства сварных соединений партии  $\mathbb{N}$  2 соответствуют нормативным документам, а в изломах отсутствуют дефекты типа оксидных плен (табл. 5 режим Б).

Полученные результаты свидетельствуют о достаточной адаптивности технологии КССО к изменениям структуры металла свариваемых сталей, в том числе и по содержанию в нем НВ. Однако они не дают оснований для отмены контроля над содержанием НВ в сталях при определении режимов сварки и технологий. Особенно опасно наличие сегрегации включений, представленных на рис. 1, б. При сварке образцов труб на участках, где сегрегации попадали в зону сварных соединений, не удалось получить стабильные показатели механических испытаний даже с использованием усовершенствованного режима сварки Б и последующей термической обработки. В местах выхода сегрегации в зону соединения наблюдались оксидные плены большой площади. Для получения стабильного качества сварных стыков рассматриваемых сталей ограничение содержания некоторых HB, в частности, с высокой температурой плавления, представляется наиболее рациональной мерой для конструкций ответственного назначения. Например, снижение содержания ванадия в сталях труб партии № 2 с 0,05 до 0,02 % позволило бы сваривать эти трубы на установленном нормативами режиме А с большими допусками на изменение условий эксплуатации без переоснащения и модернизации сварочного оборудования. По такому пути пошли некоторые предприятия нефтегазового комплекса РФ.

#### Выводы

1. Наличие в углеродистых и низколегированных сталях НВ, содержащих элементы, которые образуют тугоплавкие оксидные структуры, ухудшает их свариваемость при КССО.

2. Режимы сварки указанных сталей, установленные нормативными документами, требуют корректировки в случае повышенного содержания в стали неконтролируемых примесей металлургического производства, особенно содержащих титан, ванадий и кальций.

3. Разработана технология сварки труб исследованных сталей с повышенным содержанием НВ, обеспечивающая получение механических свойств сварных соединений, соответствующих нормативным требованиям.

4. При изготовлении деталей ответственного назначения целесообразно ввести контроль проката, поступающего на сварку, для определения в нем локальных сегрегаций HB.

- 1. Калинников Е. С. Хладостойкая низколегированная сталь. М.: Металлургия, 1976. 288 с.
- 2. Контактная сварка трубопроводов / С. И. Кучук-Яценко, В. Г. Кривенко, В. А. Сахарнов и др. Киев: Наук. думка, 1986. 180 с.
- ВСН 006–89. Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Сварка. — М.: Миннефтегазстрой, 1989. — 55 с.
- Особенности образования ферритной полоски при сварке давлением / С. И. Кучук-Яценко, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 6. — С. 11–17.
- 5. *Лахтин Ю. М.* Металловедение и термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1983. 359 с.
- 6. *Кучук-Яценко С. И.* Контактная стыковая сварка оплавлением. Киев: Наук. думка, 1992. 236 с.

Influence of nonmetallic inclusions (NMI) contained in low-alloyed steels on joint formation in flash-butt welding was studied. NMI based on chemical elements not belonging to alloying elements of this steel class and defined as endogenous impurities were considered. It is shown that the presence of such NMI in steel impairs its weldability, particularly if they contain elements forming refractory oxides. Ways of improvement of flash-butt welding technologies for joining steels with an increased NMI content were determined.

AUTOMATURIEGRAE

Поступила в редакцию 10.12.2007

# ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЙ УСТРАНЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В МАГИСТРАЛЬНОМ ТРУБОПРОВОДЕ БЕЗ ВЫВОДА ЕГО ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Академик НАН Украины В. И. МАХНЕНКО, Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО, канд. физ.-мат. наук, О. И. ОЛЕЙНИК, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Ремонтные технологии для устранения дефектов в магистральных трубопроводах требуют обоснования для характерных типовых случаев соответствия назначению. Для этой цели разрабатываются соответствующие расчетные алгоритмы определения риска отказа отремонтированного дефекта в зависимости от его размеров, метода ремонта и условий эксплуатации. В работе освещается разработанный подход при выборе технологии ремонта трещин.

LOROMATICICERAE

Ключевые слова: магистральные трубопроводы, безопасная эксплуатация, техническая диагностика, обнаруженные дефекты, выбор технологии ремонта, герметичная муфта, бандаж, расчетные алгоритмы, метод Монте-Карло, вероятность отказа, соответствие назначению

Обеспечение стабильной безопасной работы магистральных трубопроводов является одной из главных задач трубопроводного транспорта во всем мире, в том числе и в Украине, где ежегодно с Востока на Запад транспортируется по трубопроводам до 120 млрд м<sup>3</sup> газа и свыше 30 млн т нефти. Стабильность, связанная с безотказностью функционирования трубопроводов, в первую очередь определяется безопасной эксплуатацией трубопровода в результате своевременно проводимых мероприятий по технической диагностике его состояния и соответствующими ремонтами обнаруженных дефектов. Среди большого количества способов ремонта трубопроводов основное внимание привлекают те из них, которые не требуют вывода трубопровода (участка) из эксплуатации. Для решения таких задач известен целый ряд подходов, в том числе и с применением сварочных технологий [1-3]. Американским институтом нефти разработан специальный стандарт [4] по применению сварки при ремонте отдельных локальных дефектов на действующем трубопроводе. Значительный объем работ в этом направлении выполнен в последние годы в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины [1, 2, 5, 6]. Целый ряд таких разработок получил признание соответствующих специалистов и используется на практике [3].

Тем не менее многие вопросы, связанные с применением сварочных технологий, остаются еще недостаточно исследованными. Это в первую очередь относится к вопросам ресурса безопасной эксплуатации отремонтированных в указанных условиях трубопроводов, поскольку специфика ремонтных условий накладывает целый ряд ограничений на параметры сварочных технологий, форму и размеры конструктивных решений. Здесь часто невозможно уложиться в общие рекомендации (стандарты), используемые при ремонте сваркой подобных конструкций в обычных условиях, т. е. выведенных из эксплуатации и прошедших соответствующую подготовку для выполнения сварки. Поэтому большое значение для таких технологий с учетом конкретных условий нагружения отремонтированного узла трубопровода имеют доказательства соответствия назначению.

Цель настоящей работы состоит в разработке расчетной методики, позволяющей с определенной консервативностью оценить соответствие назначению участков трубопровода (по условию безопасной эксплуатации) после характерных методов ремонта [3], связанных с устранением обнаруженных недопустимых дефектов.

Одним из наиболее опасных дефектов являются несплошности материала типа трещин. Такие дефекты могут быть поверхностные (с наружной либо внутренней поверхности трубы), сквозные и подповерхностные (последние при обычных толщинах магистральных трубопроводов встречаются редко). Выбор ремонта таких дефектов начинается, как правило, с оценки возможности путем шлифования перевода дефекта из типа недопустимой трещины в объемный дефект канавочного типа [7], расположенный вдоль образующей (длина дефекта *c*) при глубине  $\delta_{изм}$  (рис. 1).

Допустимость такого типа дефектов оценивается с учетом прогнозируемого уменьшения толщины в результате коррозии по соотношениям из работ [7–9]

$$Y = \delta_{\mu_{3M}} - \{ [\delta] R_i + v_{KOD} t \}, \quad j = s, c > 0,$$
(1)

© В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, О. И. Олейник, 2008



Рис. 1. Схема удлиненных объемных дефектов, имеющих форму канавок (Groove-Like Flaw): *а* — дефект в виде канавки (вид сверху); *б*, *в* — соответственно длина дефекта (сечение *A*–*A*) и ширина дефекта в виде канавки (сечение *B*–*B*)

где

$$\begin{split} R_{j} &\geq 0,2 \text{ при } \lambda = \frac{1,285s}{\sqrt{D[\delta]}} \leq 0,3475, \ \frac{c}{D} \leq 0,348; \\ R_{s} &= f(\lambda) \text{ при } 0,3475 < \lambda < 10; \\ R_{c} &= \frac{-0,7568 + 10,511(c/D)^{2}}{1,0 + 13,838(c/D)^{2}} \text{ при } \frac{c}{D} > 0,348; \\ R_{s} &\geq 0,885 \text{ при } \lambda \geq 10; \end{split}$$

 $R_j$  — допустимое снижение величины [ $\delta$ ]; D — диаметр трубы; [ $\delta$ ] — минимально допустимая толщина трубы на основе применения расчетного кода для данного участка целой трубы (без учета коррозии);  $v_{\text{кор}}$  — скорость коррозии на прогнозируемый интервал времени t эксплуатации до следующей диагностики.

Условие Y > 0 по (1) определяет допустимость выявленного дефекта. В случае, если Y < 0, т.е.



Рис. 2. Схема бандажа для ремонта коррозионно-механических повреждений стенки трубы глубиной до 50 % ее толщины [3] канавочный дефект полученных размеров недопустим, следует применить соответствующие технологии для его устранения, например, заварку либо постановку бандажа (рис. 2).

В случае, когда бандаж воспринимает значительную часть силовой нагрузки [3], вместо условия (1) можно записать

$$Y = \delta_{\mu_{3M}} - v_{\kappa op} t.$$
 (2)

Зависимость (2) соответствует условию появления сквозного коррозионного дефекта. Видно, что силовое разгружение зоны дефекта канавочного типа — удаление слагаемого  $[\delta]R_j$  из (1) — формально может резко увеличить время t до появления течи. Учитывая значительную стохастичность в величинах  $\delta_{изм}$  и  $v_{кор}$ , такие оценки для времени t более корректно выполнять в вероятностном виде, как предлагается, например, в работе [9].

На рис. 3 с помощью методики расчета вероятности отказа на основе метода Монте-Карло при заданных усеченных нормальных законах распределения измеренных величин  $\delta_{изм}$  и скорости коррозии  $v_{кор}$  построены вероятности отказа P во времени t.

В качестве исходных данных относительно  $\delta_{_{\rm H3M}}$ , *s*, *c* и  $v_{_{\rm KOP}}$ , т. е. средних значений  $\overline{\delta_{_{\rm H3M}}}$ ,  $\overline{s}$ ,  $\overline{c}$ ,  $\overline{v}_{_{\rm KOP}}$  в усеченном нормальном законе распределения, характеризуемомстандартомот-клонения  $\xi$  и нижним пределом отклонения *A*, приняты следующие:  $\overline{s} = 40$  мм,  $\overline{c} = 500$  мм,  $\overline{\delta_{_{\rm H3M}}} = 11,5$  мм,  $\xi_{\delta} = 0,5$  мм,  $\xi_{s} = 2$  мм,  $\xi_{c} = 5$  мм,  $\overline{v}_{_{\rm KOP}} = 1,0$  мм/год,  $\xi_{v} = 0,1$  мм/год,  $A_{\delta} = 10,5$  мм,  $A_{v} = 0,8$  мм/год. Кривые  $P_{s}$  и  $P_{c}$  определяют увеличение вероятности отказа для случаев зашлифованной трещины вдоль образующей (длиной  $\overline{s} = 40$  мм), вдоль окружности (длиной  $\overline{c} = 5$ 



Рис. 3. Расчетная вероятность отказа во времени t с начала процесса коррозии для дефекта канавочного типа вдоль образующей  $P_s$  и окружности  $P_c$  при отсутствии бандажа и после его установки  $P_{\text{бан}}$  в момент t = 0

ADTOMATCHERKAR

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

= 500 мм) на основе критерия (1) при D = 1420 мм, [ $\delta$ ] = 16 мм.

Видно, что через четыре года эксплуатации таких канавочных утонений при наличии коррозии вероятность отказа  $P_c \approx 0.2$ . Однако уже при t = 4.5 года  $P_c \approx 0.5$ , т. е. надежность такого вида ремонта наружных трещин соответствующих размеров является небольшой.

Кривая  $P_{\text{бан}}$  на рис. З определяет вероятность отказа тех же дефектов во времени с учетом того, что установлен бандаж, способный взять на себя значительную часть силовой нагрузки, т. е. учитывается только коррозия по критерию (2). Видно, что установка бандажа значительно снижает вероятность отказа во времени. Тем не менее после t = 10 лет с начала коррозионного процесса вероятность отказа выше 0,1, что во многих случаях является нежелательным. С этих позиций более надежным является установка при ремонте герметичной муфты (рис. 4), позволяющей сохранить работоспособность после образования сквозного



Рис. 4. Схема герметичной муфты (*a*) и нагружения углового (*б*) и прорезного кольцевого шва (*в*) от рабочего давления в щели между муфтой и трубой

дефекта. Вероятность отказа P<sub>2</sub> для такого варианта ремонта определяется в виде произведения

$$P_2 = P_1 P_{1,2}, (3)$$

где  $P_1$  — вероятность получения во времени сквозного дефекта в результате коррозии с учетом зависимости (2);  $P_{1,2}$  — вероятность отказа муфты при условии появления рабочего давления газа в полости между муфтой и трубой.

Критерий отказа в этом случае согласно работе [5] связан с работоспособностью сварных соединений приварки муфты к трубе. Вероятность отрыва углового либо прорезного шва (рис. 4) можно связать с критерием хрупковязкого разрушения по механизму спонтанного распространения примыкающей к сварному шву острой полости при появлении в ней рабочего давления:

$$Y = -K_r + (1 - 0.14L_r^2) [0.3 + 0.7 \exp(-0.65L_r^6)], \quad (4)$$
при  $L_r \le L_r^{\max} = \frac{\sigma_{\rm T} + \sigma_{\rm B}}{2\sigma_{\rm T}},$ при  $L_r > L_r^{\max}$   $Y = -K_r$ ,

где  $K_r$  характеризует чисто хрупкое разрушение сварного шва,  $K_r = K_{\rm I}/K_{\rm IC}$  ( $K_{\rm I}$  — коэффициент интенсивности напряжений в металле сварного шва при указанном нагружении;  $K_{\rm IC}$  — вязкость разрушения металла шва);  $L_r = \sigma_{\rm ref}/\sigma_{\rm T}$  характеризует чисто вязкое разрушение сварного шва в результате пластической неустойчивости, когда  $\sigma_{\rm ref}$  определяется, например, по теории Мизеса через компоненты тензора напряжений в металле шва при рассматриваемом нагружении.

В работе [5] описана методика определения величин  $K_{I}$  и  $\sigma_{ref}$  через изгибающие моменты M и перерезывающие силы  $Q_r$ , действующие на единицу длины кольцевого сварного шва (рис. 4). При фиксированном рабочем давлении в полости достаточно стохастичными величинами являются геометрические расчетные размеры сварного шва h или 2a, сопротивление металла шва хрупкому разрушению  $K_{IC}$ , а также его механические свойства  $\sigma_{T}$  и  $\sigma_{B}$ . Для величин X = h, a,  $\sigma_{T}$  и  $\sigma_{B}$  удобно использовать усеченный нормальный закон распределения таких случайных величин, определя-

емый средним значением  $\overline{X}$ , стандартом отклонения  $\xi_v$  и нижним пределом усечения  $A_v$  [9].

нения  $\xi_X$  и нижним пределом усечения  $A_X$  [9]. Для значений  $K_{IC}$  более приемлемым является распределение в соответствии с законом Вейбулла, когда вероятность

$$p(K_{\rm IC}) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{K_{\rm IC} - K_0}{K_d - K_0}\right)^{\eta}\right],\tag{5}$$

где  $K_0$ ,  $K_d$ ,  $\eta$  — параметры распределения, определяемые обычно по результатам 12-15 экспе-

AUTOMATHREEKAR

риментов [8], из которых вычисляются  $K_{IC}$  при p = 0.5; 0.05 и 0.95. Затем, подставляя в уравнение (4) значения  $K_{IC}$  и p, получаем систему из трех нелинейных уравнений, из которой находим значения параметров Вейбулла  $K_0$ ,  $K_d$ ,  $\eta$ .

Рассмотрим генератор случайных чисел Z в пределах  $0 \le Z \le 1,0$  и условие соответствия исходной величины X в виде

$$Z = \int_{A_X}^X \overline{\phi}_X dX = P(X),$$

(6)

где  $\overline{\phi_X}$  — нормированный закон распределения величины *X*; *P*(*X*) — вероятность значения *X*.

Используя зависимость (6), получаем возможность генерировать выборку вариантов по Y для метода Монте-Карло. Представительность выборки проверяется увеличением количества вариантов N до тех пор, пока сред-

нее значение  $\overline{Y}$ , стандарт отклонения

 $\xi_{Y} = \left[\frac{1}{N}\sum_{n}^{N} (Y - \overline{Y})_{n}^{2}\right]^{0,5}$  и вероятность

отказа  $P_{1,2}$  практически не меняются. Вероятность отказа  $P_{1,2}$  определяется зависимостью

$$P_{1,2} = \int_{-A_{y}}^{0} \overline{\phi}_{Y} \, dY, \tag{7}$$

где  $\overline{\phi}_{Y}$  — нормализованный закон распределения величины *Y* для представительной выборки.

Ниже выполнены расчеты вероятности отказа  $P_{1,2}$  для муфты с угловым и прорезным швом в зависимости от толщины стенки муфты  $\delta_{\rm M}$  при длине 2L = 1000 мм для углового шва и 2L = 1000 + 2.100 мм для муфты с прорезным швом.

В табл. 1 приведены соответствующие варианты расчета для различных размеров  $\overline{h}$  (углового шва при  $h(\phi) = \text{const}$ ) и  $2\overline{a}$  (размеров прорезного шва) с указанием возникающего при рабочем давлении  $P_{\text{раб. дав}} = 5,5$  МПа изгибающего момента M и перерезывающей силы  $Q_r$  в металле шва.

Соответственно для углового шва по [5, 8]

$$K_{\rm I} = 4,295 \frac{M}{h^{3/2}} + 0,5369 \frac{Q_r}{\sqrt{h}} , \ \sigma_{\rm ref} = \frac{4M}{h^2} + \frac{Q_r}{h}.$$
 (8)

Для прорезного шва

риментов [8], из которых вычисляются Таблица 1. Результаты расчета геометрических параметров для гер- $K_{re}$  при p = 0.5; 0.05 и 0.95. Затем, метичной муфты

	Угловые швы										
δ <sub>м</sub> , мм	<i>Ћ</i> , мм	<i>М</i> , МПа∙мм <sup>2</sup>	$Q_{r}$	$\overline{K}_{I}$	<del>,</del> б <sub>го</sub> р МПа	P <sub>1,2</sub>					
			wii ia mm	IVII IQ MIM	ici	Ι	Π				
20	12	13780	274	46,4	405,6	0,3670	1,0				
20	20	23435	319	36,8	250	0,0837	0,867				
28	20	25174	345	39,5	269	0,2300	0,969				
28	22	27160	352	37,0	240	0,0450	0,839				
28	24	29000	358	34,7	216	0,0030	0,577				
28	26	30656	362	32,6	195	0	0,295				
28	28	32120	370	30,6	177	0	0,188				
28				_			_				

Окончание табл. 1

	Прорезные швы									
δ <sub>м</sub> , мм	2 <del>а</del> , мм	М, ,	<i>Q<sub>r</sub></i> , МПа·мм	$\overline{K}_{I'}$	- с МПа	P <sub>1,2</sub>				
		МПа∙мм²		IVIIIa MM	o <sub>ref</sub> , with	Ι	Π			
20		—		—		_	_			
20		—	_	—	_	—	_			
28	22	36915	447	38,5	327	0,7100	1,0000			
28	24	37160	425	34,1	277	0,1730	0,9370			
28	26	37351	405	30,4	238	0,0048	0,5310			
28	28	37492	388	27,4	206	0	0,1090			
28	30	37590	374	24,8	181	0	0,0045			
28	32	37661	361	22,6	159	0	0			

$$K_{\rm I} = 1,129 \frac{M}{a^{3/2}} + \frac{Q_r}{\sqrt{\pi a}}, \ \sigma_{\rm ref} = \frac{M}{a^2} + \frac{Q_r}{2a}.$$
 (9)

Приведенные в табл. 1 данные относительно изгибающих моментов в сварном шве соответствуют средним значениям  $\overline{h}$  и  $2\overline{a}$ . Там же указаны средние значения  $\overline{K}_{I}$  и  $\overline{\sigma}_{ref}$  и приведены результаты расчета  $P_{1,2}$ . Учитывалась стохастичность значений h, a,  $K_{IC}$ ,  $\sigma_{T}$ ,  $\sigma_{B}$ . Принималось  $\xi_{h} = 0,5$  мм,  $A_{h} = \overline{h} - 2\xi_{h}$ ,  $\xi_{a} = 0,5$  мм,  $A_{a} = \overline{a} - 2\xi_{a}$ ,  $\overline{\sigma}_{T} = 270$  МПа,  $\overline{\sigma}_{B} = 475$  МПа,  $A_{\sigma_{T}} = 230$  МПа,  $A_{\sigma_{B}} = 435$  МПа,  $\xi_{\sigma_{T}} = \xi_{\sigma_{B}} = 20$  МПа. Для  $K_{I}$  использовали два варианта значений: I — вариант для основного металла  $K_{d} = 107,5$  МПа·м<sup>1/2</sup>,  $K_{0} = 20$  МПа·м<sup>1/2</sup>,  $\eta = 4,0$ ; вариант II отличается значением  $K_{d} = 42$  МПа·м<sup>1/2</sup>.

Из данных табл. 1 видно, что по объему наплавляемого металла сварного шва при одинаковых толщинах стенки муфты  $\delta_{\rm M}$  сварные угловые швы имеют небольшое преимущество. Например, при  $\delta_{\rm M} = 28$  мм и h = 2a = 28 мм объем наплавленного

LETOMATHECKAR

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

металла на единицу длины для углового шва  $V_{\rm yr} \approx \pi h^2/4 = \pi \delta_{\rm M}^2/4 \approx 0,785 \delta_{\rm M}^2$ , а для прорезного  $2a\delta_{\rm M} = \delta_{\rm M}^2$ . У угловых швов также наблюдается определенное преимущество по надежности, т. е. меньше риск  $P_{1,2}$  при одинаковых h = 2a.

С учетом полученных  $P_{1,2}$  можно построить вероятность отказа  $P_2 = P_1 P_{1,2}$ . Видно, что по сравнению с бандажом (см. рис. 3), применение герметичной муфты может заметно снизить риск  $P_2$ , особенно для тяжелых муфт, у которых риск  $P_{1,2} \rightarrow 0$ . Следует отметить, что по сравнению с работой [5], где использовали детерминированный подход при  $K_1 = 1000$  МПа·мм<sup>1/2</sup> = = 31,6 МПа·мм<sup>1/2</sup>, что соответствует  $p(K_{1C}) <$ < 0,05, у рассмотренного вероятностного подхода менее жесткие требования относительно размеров сварных швов, при которых  $P_{1,2} \approx 0$ .

Рассмотренные варианты ремонта трещины без вывода трубопровода из эксплуатации неприменимы для трещин на внутренней поверхности трубопровода, поскольку не предусматривают удаления металла в зоне трещины на внутренней поверхности трубы с целью предупреждения распространения трещины во время эксплуатации.

Для таких случаев в работе [3] предлагается вариант ремонта с применением конструкции, характерной для получения отводов без вывода трубопровода из эксплуатации. В ее основе находится приварная муфта 2 с отверстием (рис. 5), к которой заранее приварен патрубок 3 с фланцем 4, на котором крепится механизм для удаления зоны диаметром d, в пределах которой расположена трещина 5. Если муфта приварена к трубе только наружными кольцевыми швами 6, то ее надежность определяется с учетом рабочего давления газа в полости между муфтой и трубой по описанному выше алгоритму для герметичной муфты. Если имеется возможность качественно выпол-

Таблица 2. Результаты расчета вероятности отказа для внутреннего шва (рис. 5)

an Dij Pomoro III (piete)									
d = 5	00 мм	d = 40	00 мм	<i>d</i> = 300 мм					
<i>Ћ</i> , мм <i>р</i>		<i>Ћ</i> , мм	р	<i>Ћ</i> , мм	р				
14,0	0,00054	10,0	0	6,0	0				
13,0	0,02570	9,00	0,00360	5,5	0,00334				
12,0	0,20900	8,00	0,18900	5,0	0,12000				

нить внутренний сварной шов 7 без наружного 6, то в этом случае надежность конструкции будет определяться способностью внутреннего сварного шва 7 выдерживать силу давления в патрубке, т.е. в этом сварном шве будут действовать перерезывающие силы  $Q_z$  на единицу длины внутреннего шва. При этом

$$Q_{z} = \frac{P_{\text{pa}\overline{0}.\,\text{дав}}(\pi d_{\text{пат}}^{2})/4}{\pi d_{\text{в.ш}}} \eta(\xi), \tag{10}$$

где  $P_{\text{раб. дав}}$  — рабочее давление;  $\eta(\xi)$  — функция распределения  $Q_z$  вдоль сварного шва;  $d_{\text{пат}}$  — диаметр патрубка;  $d_{\text{в.ш}}$  — диаметр внутреннего шва.

(

Максимальное значение  $\eta(\xi)$  согласно [10] имеет место в поперечном сечении трубы, совпадающем с осью патрубка. При условии  $h/d_{\rm B.III} < 0.2$  и  $d_{\rm B.III}/d_{\rm nat} \rightarrow 1.0$  максимальное значение  $\eta(\xi)$  можно представить в следующем виде:

$$\eta_{\max}(\xi) = 0.9 + \frac{10.6 \cdot d_{\max}}{D} \left( 1 - 0.4 \frac{\delta + \delta_{M}}{d_{\max}} \right) + 4.0 \frac{h}{d_{\max}}.$$
 (11)

При указанных ограничениях вместо (10) получаем

 $Q_z^{\max} = P_{\text{pab.gab}} \frac{d_{\text{пат}}}{4} \times$ 



Рис. 5. Схема конструкции для удаления трещин и прочих дефектов на внутренней поверхности трубопровода под давлением: *I* — трубопровод; *2* — муфта; *3* — патрубок; *4* — фланец для крепления механического устройства удаления зоны с трещиной и глушения отвода; *5* — трещина; *6*, *7* — соответственно наружные и внутренние сварные швы приварки муфты

LEVENATURIERARI

Раскладывая вектор  $Q_z$  на составляющие вдоль радиуса r и окружности сварного шва  $\beta$ , получаем

$$Q_r^{\max} = Q_z^{\max} \sqrt{1 - (d/D)^2}, \ Q_{\beta}^{\max} = Q_z^{\max} \frac{d}{D}.$$
 (13)

Соответственно в вершине сварной полости, примыкающей к внутреннему шву, будут действовать моды I и II коэффициента интенсивности напряжений, определяемые величинами  $Q_r^{\text{max}}$  для  $K = O_r^{\text{max}} = K$ 

 $K_{\rm I}$  и  $Q_{eta}^{\rm max}$  для  $K_{\rm II}$ .

Для небольших отношений  $d_{\text{пат}}/D$ , что характерно для данной процедуры ремонта внутренних трещин относительно небольшой длины, величина  $Q_r^{\text{max}}$  незначительно отличается от  $Q_z^{\text{max}}$  по (13), что позволяет использовать для вычисления  $K_{\text{I}}$ и  $\sigma_{\text{ref}}$  зависимости (8) при M = 0.

Риск спонтанного возрастания примыкающей к внутреннему шву острой полости можно определить по критерию (4) с учетом стохастичности исходных значений по h,  $K_{\rm IC}$ ,  $\sigma_{\rm T}$ ,  $\sigma_{\rm B}$ . В табл. 2 приведены результаты такого расчета для D == 1420 мм,  $\delta = 19$  мм,  $\delta_{\rm M} = 28$  мм при d = 500...300 мм в зависимости от катета углового шва  $\overline{h}$  при отсутствии наружных швов 6. Из таблицы видно, что ремонтная конструкция для удаления трещин на внутренней поверхности трубопровода отличается достаточно высокой надежностью при соответствующем выборе сечения сварного шва  $\overline{h}$ , соединяющего муфту с трубой (см. рис. 4). Чем больше отношение  $d_{\rm nat}/D$ , тем более высокие значения  $\overline{h}$  необходимы для требуемой надежности.

Следует отметить, что толщина стенки муфты  $\delta_{\rm M}$  в пределах  $\delta \leq \delta_{\rm M} \leq 1,5\delta$  незначительно влияет на вероятность отказа при отсутствии внешнего шва (см. рис. 5). При наличии последнего риск отказа конструкции будет определяться произведением соответствующих вероятностей отказа из табл. 2 с таковыми из табл. 1 при соответствующих  $\delta_{\rm M}$ , т. е. риск отказа можно еще существенно снизить.

Как уже отмечалось выше, при использовании метода Монте-Карло для вычисления вероятности отказа на основе соответствующего критерия предельного состояния

$$Y = f(X) \tag{14}$$

с помощью случайных чисел Z формируется выборка комбинаций соответствующих параметров X, на основе которой строится нормированная плотность распределения  $\varphi_Y = \partial P / \partial Y$ , интегрирование которой по [8] дает значение искомой вероятности.



Рис. 6. Плотность распределения  $\overline{\phi}_Y$  величины Y по критерию (4) для варианта d = 300 мм,  $\overline{h} = 5,5$  мм (*a*) и более подробное представление «хвоста» кривой  $\overline{\phi}_Y$  в зоне  $Y \le 0$ , по которой определяется вероятность отказа  $P(\delta)$ 

В качестве иллюстрации на рис. 6 приведены плотность распределения  $\overline{\phi}_Y$  величины *Y* по критерию (4) для варианта d = 300 мм,  $\overline{h} = 5,5$  мм из табл. 2, полученной на основе выборки из N == 10<sup>4</sup> комбинаций исходных параметров *X*, определяемых, как в работе [9], условием (6).

Современная компьютерная техника позволяет использовать величины таких выборок практически без серьезных ограничений, т. е. достоверность получаемых результатов в основном определяется достоверностью исходных параметров X, входящих в критерий предельного состояния (14). Это геометрические размеры характерных элементов (утонений, трещин, сварных швов) и механические свойства материала в зоне указанных характерных элементов. Соответствующие рекомендации по этому вопросу технической диагностики можно найти в работе [8], более детально его рассмотреть применительно к трубопроводам планируется в отдельной статье.

#### Выводы

ADTOMATCHERKAR

1. Ремонтные технологии для обнаруженных дефектов в магистральном трубопроводе без вывода последнего из эксплуатации представляют боль-

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

шой интерес для практики, но требуют для типовых случаев обоснования соответствия назначению.

2. Разработанные расчетные алгоритмы оценки риска отказа отремонтированных дефектов типа трещин на внешней и внутренней поверхностях трубопровода позволяют выстроить ремонтные технологии в ряд в зависимости от требуемого соответствия назначению.

3. Положенный в основу расчета вероятностный подход позволяет учитывать разброс исходных данных по геометрическим размерам, механическим свойствам и условиям эксплуатации соответствующим увеличением риска отказа, стимулируя получение исходных данных при технической диагностике с максимально возможной точностью.

- Направления развития технологий ремонта магистральных трубопроводов в условиях эксплуатации / В. С. Бут, В. М. Василюк, Ю. Т. Федоренко, М. Н. Дрогомирецкий // Сб. тр. науч. семинара «Обеспечение эксплуатационной надежности систем трубопроводного транспорта». — Киев, 11 апр. 2006 г. — Киев, 2006. — С. 31–38.
- Обгрунтування нового підходу до виконання зварювальних робіт на трубопроводах під тиском / В. С. Бут, Ю. Я.

Грецький, В. В. Розгонюк, В. М. Коломеев // Нафт. і газова пром-сть. — 2001. — № 4. — С. 33–39.

- Бут В. С., Олійник О. І. Стратегія розвитку технологій ремонту діючих магістральних трубопроводів // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» / За ред. Б. Є. Патона. — К.: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ, 2006. — С. 491–496.
- API Standart 1104. Welding of pipelines and related facilities. Appendix II serves welding. Pupl. Sept. 1999.
- 5. Определение допустимых размеров сварных швов при установке тройников и муфт на действующих магистральных трубопроводах / В. И. Махненко, В. С. Бут, Е. А. Великоиваненко и др. // Автомат. сварка. 2003. № 8. С. 7–12.
- Математическое моделирование язвенных дефектов на действующих нефте- и газопроводах и разработка численного метода оценки допустимых режимов дуговой заварки таких дефектов / В. И. Махненко, В. С. Бут, Е. А. Великоиваненко и др. // Там же. — 2001. — № 11. — С. 3–10.
- 7. *Fitness-for-service.* American Petroleum Institute. Recommended Practice 579. 2000. 625 p.
- Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. — Киев: Наук. думка, 2006. — 618 с.
- 9. Махненко В. И., Великоиваненко Е. А., Олейник О. И. Риск-анализ как средство формализации принятия решений, связанных с внеплановым ремонтом сварных конструкций // Автомат. сварка. — 2008. — № 5. — С. 5–10.
- Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). — М.: Энергия, 1989. — 525 с.

Repair technologies for elimination of defects in the main pipelines require substantiation for the characteristic fitnessfor-purpose cases. Appropriate calculation algorithms are developed for this purpose for determination of the risk of failure of the repaired defect, depending on its dimensions, repair method and operating conditions. The developed approach to selection of the crack repair technology is described in the work.

Поступила в редакцию 15.11.2007

#### НОВАЯ КНИГА

**Неорганическое материаловедение**: Энциклопед. изд.: В 2 т. / Под ред. В. В. Скорохода, Г. Г. Гнесина. — Киев: Наук. думка, 2008. — Т.1: Основы науки о материалах / В. В. Скороход, Г. Г. Гнесин, В. М. Ажажа и др. — 1152 с.

LOROMATHREEKAR

Первый том посвящен научным основам неорганического материаловедения, что соответствует общей концепции издания, совмещающего информацию о фундаментальных принципах формирования и исследования материалов со сведениями об их свойствах, технологиях и областях применения. Впервые создан энциклопедический свод современных научных представлений о физико-химической природе твердых тел, поведении неорганических материалов под действием внешних физических полей и химических факторов, рассмотрены методы анализа, исследований и диагностики неорганических материалов.

Для научных работников, инженеров, аспирантов и студентов, специализирующихся в фундаментальных и прикладных областях современного материаловедения (металлургия расплавов, порошковая металлургия, полупроводники и материалы электронной техники, специальная керамика, оптические материалы, материалы ядерной техники, газофазные, плазменные, лазерные и электронно-лучевые технологии, техника высоких давлений, сварка, пайка и пр.).



## ВЛИЯНИЕ РОДА ГАЗА СПУТНОГО ПОТОКА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ, СОЗДАВАЕМОЙ ПЛАЗМОТРОНОМ С ПРОВОЛОКОЙ-АНОДОМ

М. Ю. ХАРЛАМОВ, канд. техн. наук (Восточноукр. нац. ун-т им. В. Даля, г. Луганск), чл.-кор. НАН Украины И. В. КРИВЦУН, В. Н. КОРЖИК, С. В. ПЕТРОВ, доктора техн. наук, А. И. ДЕМЬЯНОВ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлена математическая модель процессов тепло- и массопереноса, протекающих при взаимодействии с окружающей газовой средой турбулентного потока дуговой плазмы, создаваемого плазмотроном с проволокойанодом. Проведен сравнительный численный анализ пространственных распределений тепловых, газодинамических и других характеристик турбулентной струи аргоновой плазмы при ее обдуве ламинарным потоком аргона и воздуха, а также при истечении в покоящийся газ.

Ключевые слова: дуговая плазма, плазмотрон, проволока-анод, математическая модель, численный анализ, турбулентная струя, спутный поток, тепло- и массоперенос

Во многих технических приложениях низкотемпературной дуговой плазмы таких, например, как термообработка поверхности, напыление покрытий, различные плазмохимические и другие процессы, турбулентные потоки плазмы, формируемые электродуговыми генераторами (плазмотронами), истекают во внешнюю газовую среду иного, нежели используемый плазмообразующий газ, химического состава, чаще всего в воздух. При этом поток дуговой плазмы во внешней области может представлять собой как бестоковую плазменную струю (когда оба электрода дуги находятся внутри плазмотрона), так и содержать открытый участок столба дугового разряда (например, в плазмотронах с внешним анодом-проволокой [1], которые используются при плазменно-дуговом напылении покрытий). Кроме того, плазменный поток может истекать как в покоящуюся газовую среду (затопленная струя), так и обдуваться спутным потоком воздуха или защитного (инертного) газа [1]. Во всех случаях состав внешней газовой среды (если он отличается от состава плазмообразующего газа) будет оказывать определенное влияние на характеристики формируемого потока дуговой плазмы. Таким образом, для корректного описания и математического моделирования таких потоков необходимо учитывать смешение плазмообразующего газа с окружающей газовой средой.

В большинстве существующих математических моделей турбулентных плазменных струй последние рассматриваются в условиях истечения в газовую среду с идентичным плазмообразующему газу составом [1–4]. Одно из немногих решений задачи подмешивания к турбулентной газовой струе окружающего газа иного химического состава приведено в [5] и заключается в использовании условий подобия профилей избыточных температуры и концентрации примеси. Однако данный подход не описывает особенности турбулентного диффузионного пограничного слоя в случае рассматриваемых здесь плазменных потоков и неприемлем для течения сложных конфигураций. Цель данной работы состояла в разработке математической модели, описывающей газодинамику и теплообмен в условиях турбулентного течения дуговой плазмы с учетом процессов конвективной диффузии, имеющих место при смешении плазмообразующего газа с внешней газовой средой (спутным потоком газа), и соответствующего изменения состава, теплофизических свойств и коэффициентов переноса плазмы.

За основу предлагаемой математической модели взята модель для расчета характеристик турбулентного течения дуговой плазмы в плазмотронах с проволокой-анодом, в том числе при наличии обдувающего газового потока [1]. Схема рассматриваемого в настоящей работе плазмотрона представлена на рис. 1. Дуга постоянного тока горит между тугоплавким катодом и токоведущей проволокой, находящейся за срезом сопла плазмотрона на расстоянии Z<sub>2</sub> от начального сечения расчетной области (z = 0), расположенного вблизи рабочего конца катода. Предполагается, что весь ток дуги замыкается на проволоку и при  $z > Z_2$  имеет место бестоковое инерционное движение плазмы. Подаваемый в плазмоформирующее сопло длиной  $Z_1$  и радиусом  $R_c$  плазмообразующий газ с расходом G<sub>1</sub> нагревается электрической дугой и истекает во внешнюю газовую среду. Следует отметить, что, изменяя в парамет-

LEUROMATICHERKAE

<sup>©</sup> М. Ю. Харламов, И. В. Кривцун, В. Н. Коржик, С. В. Петров, А. И. Демьянов, 2008

АУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



Рис. 1. Схема плазмотрона с проволокой-анодом: 1 — катод; 2 — сопло; 3 — канал подачи обдувающего газа; 4 — обдувающий газ; 5 — внешняя газовая среда; 6 — область смешения; 7 — проволока-анод; 8 — дуговая плазма; остальные обозначения см. в тексте

рах модели длину дуги  $Z_2$ , можно смоделировать ее горение внутри сопла плазмотрона ( $Z_2 < Z_1$ ), что соответствует плазмотрону косвенного действия. Открытый участок течения дуговой плазмы может обдуваться коаксиальным потоком внешнего газа с расходом  $G_2$ . При этом обдувающий газ подается через кольцевой канал  $R_1 \le r \le R_2$  (рис. 1) под углом  $\alpha$  к оси плазмотрона (при моделировании истечения дуговой плазмы в покоящийся газ можно положить  $G_2 = 0$ ). Давление во внешней газовой среде предполагается атмосферным. Если составы плазмообразующего газа и внешней газовой среды (обдувающего газа) отличаются, то при  $z > Z_1$  начинается их смешение.

Для описания смешения потока дуговой плазмы с внешним газом наряду с обычными допущениями при моделировании подобных течений [1, 6] примем следующие допущения:

плазменная компонента смеси является инертной (плазмообразующий газ — аргон) и не вступает в химические реакции с внешним газом;

смешение плазмообразующего газа с внешней газовой средой иного состава описывается уравнением конвективной диффузии с учетом турбулентной составляющей коэффициента взаимной диффузии компонент;

при обдуве турбулентной плазменной струи коаксиальным ламинарным потоком холодного

LEVENERALITATION

газа, этот газ имеет такой же состав, что и окружающая газовая среда.

Для расчета газодинамических, тепловых и электрических характеристик дуговой плазмы, генерируемой рассматриваемым плазмотроном, будем использовать систему магнитогазодинамических (МГД) уравнений уравнений в приближении турбулентного пограничного слоя, записанную относительно осредненных по времени значений температуры T, радиальной  $\overline{v}$  и аксиальной u компонент скорости плазмы с соответствующими начальными и граничными условиями [1]. При определении турбулентных составляющих коэффициентов вязкости и теплопроводности плазмы будем использовать k- $\epsilon$ -модель турбулентности, которая для рассматриваемых здесь условий описана в [1]. Указанную систему уравнений дополним уравнением конвективной диффузии плазмообразующего газа во внешней газовой среде:

$$\rho\left(u\frac{\partial m_1}{\partial z} + \overline{v}\frac{\partial m_1}{\partial r}\right) = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\rho D_{1,2} - \frac{\partial m_1}{\partial r}\right),$$
  
$$m_1 + m_2 = 1.$$
 (1)

Здесь  $m_1(r, z)$  и  $m_2(r, z)$  — относительная массовая концентрация соответственно плазмообразующего и внешнего газа в плазменной смеси (здесь и далее индексом 1 будем обозначать характеристики плазмообразующего газа, а индексом 2 — внешнего газа), определяемые как

$$m_i = \frac{\rho_i}{\rho},\tag{2}$$

где  $\rho_i$  — приведенная плотность компонент (i = 1, 2), характеризующая их массу в единице объема плазменной смеси;  $\rho$  — осредненная плотность смеси;  $\overline{D}_{1,2}$  — коэффициент турбулентной диффузии, имеющий вид

$$\overline{D}_{1,2} = D_{1,2} + D_t = D_{1,2} + \frac{\eta_t}{\rho \text{Sm}_t},$$
(3)

 $D_{1,2}$  — коэффициент взаимной молекулярной диффузии в плазменной смеси;  $D_t$  — турбулентная составляющая коэффициента диффузии;  $\eta_t$  — коэффициент турбулентной вязкости, определяемый с помощью k— $\varepsilon$ -модели турбулентности [1]; Sm<sub>t</sub> — турбулентное число Шмидта, которое согласно рекомендациям [4] принималось равным единице.

Коэффициент взаимной диффузии для бинарной плазменной смеси рассчитывали по формуле Чепмена–Энскога [7]:

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

$$D_{1,2} = 2,66 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{T^3 (M_1 + M_2) / (2M_1 M_2)}}{p \sigma_{1,2}^2 \,\Omega^{(1,1)}(T_{1,2}^*)}, \qquad (4)$$

где  $M_1, M_2$  — молекулярная масса соответственно плазмообразующего и внешнего газа; p — давление;  $\sigma_{1,2}$  — эффективное сечение столкновений частиц в модели твердых сфер для составляющих смесь газов;  $\Omega^{(1,1)}(T^*)$  — функция приведенной температуры  $T^* = kT/\varepsilon_{1,2}$ , таблица значений которой дана, например, в [7]; k — постоянная Больцмана;  $\varepsilon_{1,2}$  — эффективный энергетический параметр в заимодействия частиц, составляющих смесь газов.

Ì

Система МГД уравнений [1], а также уравнение диффузии (1) должны быть дополнены соотношениями, определяющими зависимость термодинамических характеристик, молекулярных коэффициентов переноса и оптических свойств двухкомпонентной плазмы от температуры, давления и концентрации компонент. Подробные таблицы температурных зависимостей этих величин для различных газов приводятся, например, в работах [3, 8]. Для определения молекулярных коэффициентов вязкости и теплопроводности плазменной смеси можно воспользоваться следующими соотношениями [7, 8]:

$$\eta_{\rm CM} = \sum_{j=1}^{2} x_j^2 \left[ x_j^2 / \eta_j + 1,385 \sum_{\substack{k=1, \ k \neq j \\ k = 1, \ k \neq j}}^{2} x_j x_k RT / (PM_j D_{j,k}) \right]^{-1}, (5)$$
$$\chi_{\rm CM} = \left( \sum_{\substack{j=1 \\ j=1}}^{2} \chi_j x_j + \left[ \sum_{\substack{j=1 \\ j=1}}^{2} x_j / \chi_j \right]^{-1} \right) / 2, \tag{6}$$

где  $\eta_{cM}$ ,  $\eta_j$  — коэффициенты соответственно вязкости смеси и *j*-й компоненты (*j* = 1, 2);  $\chi_{cM}$ ,  $\chi_j$  коэффициенты соответственно теплопроводности смеси и *j*-й компоненты;  $x_j$  — объемная концентрация *j*-й компоненты, определяемая соотношением

$$x_j = \frac{m_j / M_j}{\sum_{k=1}^{2} m_k / M_k}.$$

Остальные свойства плазмы при смешении приближенно вычислялись следующим образом:

$$\Gamma(T) = m_1 \Gamma_1(T) + m_2 \Gamma_2(T), \tag{7}$$

где  $\Gamma = \{\rho, C_p, \sigma, \psi\}$  — соответственно массовая плотность, удельная теплоемкость при постоянном давлении, удельная электропроводность и объемная плотность мощности собственного излучения.

Рассмотрим постановку граничных условий для уравнения конвективной диффузии (1). На оси (*r* = 0) используется условие симметрии

$$\partial m_1 / \partial r = 0.$$
 (8)

Полагая, что в сопле плазмотрона может находиться только плазмообразующий газ, для входного сечения (z = 0 и  $0 \le r \le R_c$ ) ставится начальное условие

$$m_1(r, 0) = 1,$$
 (9)

а на стенках сопла плазмотрона (при  $r = R_c$  и  $0 \le z < Z_1$ ) задается

$$m_1 = 1.$$
 (10)

На внешних границах открытого участка расчетной области, т. е. при r = R и  $z > Z_1$ , полагается

$$m_1 = 0.$$
 (11)

Система МГД уравнений турбулентного пограничного слоя [1] совместно с уравнением конвективной диффузии (1), соотношениями (2)–(7) и соответствующими граничными условиями (8)– (11) позволяет определять газодинамические и тепловые характеристики плазменной струи с учетом изменения свойств плазмы при смешении плазмообразующего газа с внешней газовой средой. По аналогии с уравнениями движения и энергии уравнение (1) решалось методом конечных разностей с использованием основной разностной схемы для интегрирования уравнений пограничного слоя [9].

Математическое моделирование влияния рода внешнего газа на формируемый плазмотроном с проволокой-анодом поток дуговой плазмы проводилось применительно к реальным условиям процесса плазменно-дугового напыления; при этом плазмообразующий газ – аргон, внешняя газовая среда и обдувающий газ – воздух (для сравнения — аргон). Выбирали следующие геометрические параметры расчетной области (см. рис. 1): радиус и длина плазмоформирующего канала равны соответственно 1,5 и 3,0 мм; проволокаанод расположена при  $z = Z_2 = 9,3$  мм; кольцевой канал для подачи обдувающего газа имеет в выходном сечении ( $z = Z_1 = 3$  мм) внутренний радиус 4,78 мм, внешний — 7,22 мм и наклонен под углом 37,5° к оси плазмотрона; длина внешней части расчетной области L выбиралась равной 250 мм, а ее радиус R = 12 мм. Температура холодных стенок каналов и внешнего газа принималась равной 300 К. Режим работы плазмотрона следующий: ток дуги I =200 A; расход плазмообразующего газа  $G_1 = 1 \text{ м}^3/4$ ; расход обдувающего газа  $G_2 = 20 \text{ m}^{3/4}$ 

ADDIOMATICHERKAR



Рис. 2. Радиальное распределение скорости u(a) и температуры  $T(\delta)$  плазмы, обдуваемой кольцевым потоком аргона (1, 2, 3, 5) и воздуха (1, 2, 4, 6), при I = 200 A,  $G_1 = 1$  м<sup>3</sup>/ч,  $G_2 =$  $= 20 \text{ м}^3/\text{ч}$ : 1 — z = 3 (срез сопла плазмотрона); 2 — 9,3 (область проволоки-анода); *3*, *4* — 50; *5*, *6* — 150 мм

Результаты численного моделирования характеристик потока аргоновой плазмы при истечении в воздушную среду и среду аргона как при наличии обдувающего газового потока, так и для соответствующей затопленной струи представлены на рис. 2-7. В частности, на рис. 2-4 показаны



радиальные профили и продольные распределения аксиальной компоненты скорости и температуры плазмы при истечении в каждую из рассматриваемых сред, а также соответствующее распределение концентрации аргона в плазменной струе при ее истечении в воздух. Как следует из этих рисунков, затопленная струя, истекающая в любой из рассматриваемых газов, достаточно быстро расширяется, интенсивно перемешиваясь при этом с внешней газовой средой. Обдув плазменной струи кольцевым ламинарным потоком холодного газа того же состава, что и плазмообразующий, как описывалось в [1], препятствует расширению плазменной струи. Турбулентность частично гасится окружающим струю кольцевым потоком газа, а энергия и импульс струи сохраняются на больших расстояниях, чем для затопленной струи.

Аналогичный результат получен и при обдуве аргоновой плазменной струи спутным потоком воздуха (рис. 2, 3). При этом, как следует из этих рисунков, род внешнего газа не оказывает существенного влияния на скорость потока. В начальных сечениях открытого участка течения температура также изменяется незначительно. Однако в дальнейшем на расстоянии около 25...30 мм от среза сопла аргоновая плазменная струя, обдуваемая воздухом, в результате смешения газов начинает охлаждаться интенсивней, чем струя, обдуваемая аргоном. Открытый участок столба дуги при этом дополнительно сжимается и напряженность электрического поля на внешнем участке дугового разряда несколько возрастает (см. рис. 5).

Влияние состава внешней среды на тепловые характеристики течения дуговой плазмы особенно заметно для затопленной струи, истекающей в воздушное пространство. В этом случае смешение



Рис. 3. Продольные изменения скорости u(a), температуры  $T(\delta)$  плазмы и относительной концентрации аргона  $x_{Ar}(\theta)$  в плазменной струе, истекающей в аргоновую (1, 3) и воздушную (2, 4) среду при различных режимах работы плазмотрона (I = 200 Å,  $G_1 = 1$  м<sup>3</sup>/ч): 1, 2 —  $G_2 = 20$  м<sup>3</sup>/ч соответственно аргон, воздух;  $\dot{3}$ ,  $4 - G_2 = 0$ 



Рис. 4. Профили относительной концентрации аргона в плазменной струе, обдуваемой кольцевым потоком воздуха (1, 2, 4, 6, 7) и истекающей в покоящуюся воздушную среду (1, 3, 5) (I = 200 A;  $G_1 = 1$  м<sup>3</sup>/ч,  $G_2 = 20$  м<sup>3</sup>/ч): I - z = 3 (срез сопла плазмотрона); 2, 3 — 9,3 (область проволоки–анода); 4, 5 — 50; 6 — 150; 7 — 250 мм



Рис. 5. Продольное изменение напряженности *Е* электрического поля на дуговом участке течения при различных режимах работы плазмотрона: *1*–*4* — см. на рис. 3



Рис. 6. Распределение температуры аргоновой плазменной струи, истекающей в воздушное пространство без обдува (a) и с обдувом ( $\delta$ )

аргоновой плазмы с воздухом интенсифицируется (см. рис. 3, 4), теплопроводность смеси ввиду больших значений  $\chi$  для воздуха увеличивается, что приводит к более быстрому снижению температуры струи.



Рис. 7. Распределение относительной концентрации аргона в плазменной струе, истекающей в воздушное пространство без обдува (a) и с обдувом ( $\delta$ )

Соответствующие истечению в воздушную среду поля концентрации аргона и температуры плазмы для обдуваемой ламинарным потоком и затопленной турбулентной плазменной струи показаны на рис. 6, 7. Как следует из результатов моделирования, представленных на этих рисунках, при обдуве струи спутным потоком воздуха происходит перестройка течения. В частности, формируется высокотемпературный след дуги, в котором концентрация аргона остается достаточно высокой. Так, например, на расстоянии около 50 мм от среза сопла концентрация аргона в плазменной смеси превышает 0,8, а на расстоянии 100 мм — 0,6 (см. рис. 3, в; 7). Поперечное сечение обдуваемой струи с увеличением расстояния возрастает незначительно, а ядро струи имеет достаточно равномерное распределение характеристик плазмы.

#### Выводы

LOTOMATHECKAS

1. Проведенные численные исследования подтверждают широкие возможности предложенной математической модели для расчета характеристик турбулентных потоков дуговой плазмы, взаимодействующих с внешней газовой средой. Данная математическая модель может быть обобщена для случая сложного многокомпонентного взаимодействия различных газов и их смесей, в том числе при наличии химических реакций между компонентами.

2. Затопленная турбулентная струя аргоновой плазмы, истекающая в воздушную среду, достаточно быстро перемешивается с воздухом вследствие ее неограниченного расширения и увеличения теплопроводности образующейся плазмен-

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

ной смеси она охлаждается интенсивней, чем такая же струя при истечении в покоящийся аргон.

3. Обдув турбулентной струи аргоновой плазмы кольцевым ламинарным потоком холодного воздуха приводит к формированию достаточно узкого относительно высокотемпературного ядра течения, концентрации аргона, в котором остается высокой на значительных расстояниях (около 0,5 на расстоянии 150 мм от среза сопла).

- Математическая модель дуговой плазмы, генерируемой плазмотроном с проволокой-анодом / М. Ю. Харламов, И. В. Кривцун, В. Н. Коржик и др. // Автомат. сварка. — 2007. — № 12. — С. 14–20.
- Favalli R. C., Szente R. N. Physical and mathematical modeling of non transferred plasma torches // Brazilian J. of Physics. — 1998. — № 1, Mar. — P. 25–34.

- Математическое моделирование электрической дуги / В. С. Энгельшт, Д. С. Асанов, В. Ц. Гурович и др. — Фрунзе: Илим, 1983. — 363 с.
- Теория столба электрической дуги / Под ред. М. Ф. Жукова. — Новосибирск: Наука, 1990. — 376 с.
- Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. — 847 с.
- 6. Компьютерное моделирование процесса плазменного напыления / Ю. С. Борисов, И. В. Кривцун, А. Ф. Мужиченко и др. // Автомат. сварка. 2000. № 12. С. 42–51.
- 7. Арефьев К. М. Явления переноса в газе и плазме. Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 112 с.
- Boulos M. I., Fauchais P., Pfender E. Thermal plasmas: Fundamentals and applications. — New York; London: Plenum press, 1994. — Vol. 1. — 467 p.
- Пасконов В. М., Полежаев В. И., Чудов Л. А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. — М.: Наука, 1984. — 286 с.

Mathematical model is presented, describing the heat and mass transfer processes occurring in interaction with the ambient gas of the turbulent arc plasma flow generated by plasmatron with an anode wire. Comparative numerical analysis of spatial distributions of heat, gas-dynamic and other characteristics of the turbulent argon plasma jet blown about with laminar argon and air flows, as well as emitted into a quiescent gas, was conducted.

Поступила в редакцию 27.11.2007



#### ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ ЖУРНАЛА!

С 1 по 5 октября 2008 г. в Ялте во время проведения традиционной осенней Международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» состоится научно-технический семинар «Применение современной технологии дальнодействующего ультразвукового контроля для мониторинга состояния длинномерных объектов с ограниченным доступом».

Используемые на протяжении последних пятидесяти лет методы контроля протяженных инженерных сооружений имеют основной недостаток: с определенного места может быть проконтролирована только небольшая по площади зона с максимальными размерами, измеряемыми десятками миллиметров. Это значит, что для контроля больших конструкций таких, как трубопровод и трубные конструкции, мостовые канаты, рукавные части морских оснований и др., необходимы большие временные и финансовые затраты. Кроме того, эти методы контроля требуют доступа непосредственно ко всем участкам конструкции в целом.

Сегодня несомненно актуальной является задача разработки и внедрения новых технологий для диагностики и контроля протяженных инженерных сооружений (нефте- и газопроводы, железнодорожные рельсы, морские основания, вантовые мосты, плоские речные сваи и волнобойные стенки).

Одной из таких технологий является метод дальнодействующего ультразвукового контроля (LRUT), который основан на использовании направленных волн, способных распространяться на большие расстояния от места закрепления датчиков, что позволяет по эхосигналам обнаруживать, к примеру, коррозионные поражения. Термин «направленная волна» в неразрушающем контроле означает волну с высокочастотной модой, распространяющуюся вдоль пластин и труб. Эти волны характеризуются небольшим затуханием, так как энергия при распространении концентрируется между нижней и верхней поверхностями трубы. При неразрушающем контроле трубопроводов направленными волнами используется именно их способность распространяться на большие расстояния, что позволяет контролировать от нескольких метров до нескольких десятков метров трубы. По сравнению с традиционными методами контроля производительность контроля направленными волнами намного выше, а стоимость ниже.

С целью развития этой технологии, разработки новых технологических инструментов — датчиков и систем дальнодействующего ультразвукового контроля, предназначенных для обнаружения дефектов и коррозионных поражений и внедрения их в практику неразрушающего контроля, 23 научные организации из 12 европейских стран выполняют проект «Мониторинг состояния объектов посредством дальнодействующего ультразвука (LRUCM)» (в оригинале — Long Range Ultrasonic Condition Monitoring), который включен в 6-ю Рамочную Программу Европейского Союза. Ведущей организацией Консорциума является Британский институт сварки (TWI). Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики является одним из участников проекта и выполняет задачи по продвижению данной технологии в Украине и странах СНГ.

По вопросу участия в работе конференции и семинара следует обращаться в Оргкомитет конференции: 02094, г. Киев, ул. Минина, 3, к. 47, тел./факс: (+38 044) 573 30 40, +38 067 708 93 95 E-mail: office@conference.kiev.ua, www.conference.kiev.ua Почтовый адрес: 02094, г. Киев, а/я 41

LEUROMATICHERKAE

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ

А. БОКОТА, В. ПЕКАРСКА (Политехника Ченстоховская, Республика Польша)

Представлены математическая модель и расчет деформаций и напряжений, возникающих при лазерной сварке стального листа. Для определения температурного поля используется уравнение теплопроводности с конвективным членом, решаемое методом функции Грина. Модель фазовых превращений базируется на диаграмме непрерывного охлаждения свариваемой стали и уравнениях Авраами, Коистинена и Марбургера. При определении временных и остаточных напряжений в зависимости от термической нагрузки и фазовых превращений учитывается связь термофизических параметров с температурой и фазовым составом стали. В модели напряжений учитывается структурная и трансформационная деформация.

Ключевые слова: лазерная сварка, сталь, сварные соединения, модель, численное исследование, фазовый состав, структурная и трансформационная деформация, напряженное состояние

При рассмотрении процесса лазерной сварки обычно отсутствуют комплексные описания и модели, дающие возможность оценивать явления, сопутствующие ее процессу. Причиной возникновения специфических процессов, не характерных для других способов сварки, является высокая скорость и специфическая форма шва, поскольку лазерный луч характеризуется высокой концентрацией энергии. Металл в зоне сварки нагревается до высокой температуры при значительном ее градиенте [1–3]. В результате возникает существенная термическая деформация и деформация, обусловленная фазовыми превращениями, а в итоге — образование временных и остаточных напряжений [4–9].

В большинстве работ, главным образом экспериментальных, рассматривается влияние параметров сварки на характеристики сварных соединений, а существующие цифровые модели относятся к определению температурного поля, зоны сплавления и ЗТВ. В работах [4, 6, 7] предложена модель механических явлений при лазерной сварке, но без учета трансформационной деформации.

Особое значение с технологической точки зрения имеет оценка влияния структурных превращений на деформацию и уровень напряжений в свариваемой зоне. Возникающие напряжения формируют механические характеристики и прочность сварного соединения. Такая оценка возможна, если имеется информация о значении и виде фазовых превращений, возникающих в определенном тепловом цикле.

В работе для расчета удельного фазового состава в твердом состоянии и сопутствующей изот-

© А. Бокота, В. Пекарска, 2008

ропной термической и структурной деформации использована модель фазовых превращений для свариваемой низколегированной стали [8, 10]. Принято, что свариваемый материал является упругопластичным. Значения временных и остаточных напряжений, возникающих в результате термических нагрузок и фазовых превращений, получены путем решения уравнений равновесия методом конечных элементов, используя закон неизотермического пластического течения с изотропным упрочнением и условием Губера-Мизеса [11]. В модели учтена зависимость термофизических параметров от температуры и фазового состава металла [5, 8, 12]. Расчет фазовых превращений и напряжений позволяет избегать дорогостоящих экспериментов, проводимых с целью получения данных, необходимых для оптимального ведения лазерной сварки.

Расчет температурного поля проводится по уравнению неустановившегося потока тепла с конвективным членом:

$$a\nabla^2 T(\mathbf{x}, t) - \frac{\partial T(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \nabla T(\mathbf{x}, t)\mathbf{v} = -\frac{Q}{C},$$
(1)

где a — коэффициент выравнивания температуры; C — удельная теплоемкость; Q — мощность объемных источников тепла, в которых учитывается тепло от лазерного луча; **v** — вектор скорости перемещения лазерного луча; **x** = **x**( $x_{\alpha}$ ) — вектор положения рассматриваемой точки.

Уравнение (1) решено для линейного источника тепла с определенным погружением  $h_z$  методом суперпозиции функции Грина, предложенным в работе [3].

Температурное поле в рассматриваемой точке определяет источник тепла с распределением мощности в виде

ADVOMAULTUCKAR

$$Q(\mathbf{x}') = \begin{cases} \overline{Q}(1-R)/(\pi r^2 h_z), \, x' = 0, \, y' = 0, \, -h_z \le z' \le h_z, \\ 0, \, |z'| > h_z, \end{cases}$$
(2)

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

где  $h_z$  — глубина лазерного проплавления, м; Q — мощность лазерного луча, Вт; R — коэффициент отражения; r — радиус лазерного луча, м.

Принято, что стационарное решение в рассматриваемой области существует для времени t, а подвижная система координат  $\{x', y', z'\}$  перемещается относительно базовой со скоростью  $\mathbf{v} = \mathbf{v}(u, 0, 0)$ .

Используя функцию Грина и добавляя начальную температуру  $T_0$ , получаем

$$T(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{C} \int_{0}^{t} \int_{\Omega} Q(\mathbf{x}', t') G(|\mathbf{x} - (\mathbf{x}' - d)|, t - t') d\Omega' dt' + T_{0.} (3)$$

Интегрируя выражение (3) по пространственным координатам с учетом уравнения (2), получаем полуаналитическое решение уравнения (1), численное интегрирование (3) по времени проводится методом Ромберга.

Фазовые превращения, термические и структурные деформации. Удельный объем аустенита, образовавшегося во время нагрева, определяется по формуле Мехля–Авраами [13–15]:

$$\widetilde{\eta}_{A}(T, t) = 1 - \exp\left(-bt^{n}\right), \tag{4}$$

где  $\tilde{\eta}_{A}$  — массовая доля аустенита, образовавшегося в результате нагрева; t — время нагрева; b = b(T) и n = n(T) — коэффициенты, устанавливаемые в соответствии с условиями начала ( $\eta_{s} = 0,01$ ) и конца ( $\eta_{f} = 0,99$ ) превращений [15].

Массовая доля фазы, образовавшейся во время охлаждения аустенита, определяется температурой и скоростью охлаждения в диапазоне температур  $T_{8/5}$ . Количественно массовая доля новой фазы (феррит, перлит либо бейнит) также определяется с учетом скорости охлаждения  $w_{8/5}$  по формуле Мехля–Авраами (диффузионные превращения) и с учетом уже существующих удельных составляющих:

$$\eta(\cdot)(T, t) = \eta(\cdot)^{\%} \tilde{\eta}_{A}(1 - \exp(-b(t(T))^{n})) + \eta^{0}(\cdot), \quad (5)$$

где  $\eta^{\%}(\cdot)$  — максимальная массовая доля фазы при определенной скорости охлаждения, установленная экспериментально;  $\tilde{\eta}_A$  — массовая доля аустенита, образующегося во время нагрева;  $\eta^0(\cdot)$  — количество фазы исходной структуры без перехода в аустенит.

Массовая доля мартенсита определяется по модифицированной формуле Коистинена – Марбургера [10, 15, 16]:

$$\eta_{\rm M}(T) = \eta^{\%}(\cdot) \,\widetilde{\eta}_{\rm A} \left( 1 - \exp\left( \left( -\frac{M_s - T}{M_s - M_f} \right)^m \right) \right), \qquad (6)$$
$$T \in [M_s, M_f(w_{8/5})],$$

где m — коэффициент, определяемый экспериментально (для испытуемой стали m = 2,5);  $M_s$ ,  $M_f$  — температуры начала и конца мартенситного превращения.

Приросты изотропных деформаций в зависимости от температуры и фазовых превращений (структурные деформации) определяются по формулам [8, 10]:

$$d\varepsilon^{TPh} = \sum_{i=1}^{i=5} \alpha_i \eta_i dT - \varepsilon_A^{Ph} d\eta_A,$$
  

$$d\varepsilon^{TPh} = \sum_{i=1}^{i=5} \alpha_i \eta_i dT + \sum_{j=2}^{j=5} \varepsilon_j^{Ph} d\eta_j,$$
(7)

где  $\alpha_i = \alpha_i(T)$ ,  $i = A, E, \Phi, M, \Pi$  — коэффициенты линейной дилатации соответственно аустенита, бейнита, феррита, мартенсита и перлита;  $\varepsilon_A^{Ph}$  — изотропная деформация фазового превращения исходной структуры в аустенит;  $j = E, \Phi, M$  и П;  $\varepsilon_j^{Ph} = \varepsilon_j^{Ph}(T)$  — изотропные деформации фазового превращения аустенита соответственно в феррит, бейнит, мартенсит и перлит.

Значения коэффициентов линейной дилатации и изменения объема в зависимости от фазовых превращений принимаем в соответствии с экспериментальными данными, полученными на установке с воспроизведением тепловых циклов при различных скоростях нагрева и охлаждения [10].

Напряжения. Напряжения во время лазерной сварки рассчитывали путем решения уравнения равновесия, выраженного в скоростях:

$$\operatorname{liv}(\dot{\boldsymbol{\sigma}}(\mathbf{x},t)) = 0, \ \boldsymbol{\sigma}^{T} = \boldsymbol{\sigma}.$$
(8)

Формулы закона Гука, выраженные в скоростях, имеют вид

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = E \, \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e + E \, \boldsymbol{\varepsilon}^e, \ \boldsymbol{\varepsilon}^e = \boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p - \boldsymbol{\varepsilon}^{TPh} - \boldsymbol{\varepsilon}^{tp}, \tag{9}$$

где  $\sigma = \sigma(\sigma_{\alpha\beta})$  — тензор напряжения; *E* — тензор постоянных материала;  $\varepsilon^{e}$ ,  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon^{p}$  — соответственно тензор упругой, суммарной и пластической деформации;  $\varepsilon^{TPh}$  — тензор изотропных, термических деформаций и деформаций, возникающих в результате фазовых превращений в твердом теле ( $\varepsilon^{TPh} = \varepsilon^{T} + \varepsilon^{Ph}$ );  $\varepsilon^{tp}$  — тензор трансформационной деформации.

AUTOMATCHICKAR

Пластическая деформация определяется с учетом закона неизотермического пластического течения [4, 11, 17]

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p} = \dot{\Lambda} \; \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \dot{\Lambda} \; \frac{3S}{2Y}, \; \dot{f} = 0, \; f = 0, \tag{10}$$

где  $\Lambda$  — скалярный множитель пластичности;  $f = f(\sigma, Y(T, \varepsilon^p))$  — функция пластического течения, зависимая от тензора напряжения и предела текучести; S — девиатор тензора напряжения.

Значение пластической деформации определяется с помощью модели неизотермического пластического течения с изотропным упрочнением и условием пластичности Губера–Мизеса, а функция течения равна

$$f = \sigma_{ef} - Y(T, \sum \eta_k, \varepsilon_{ef}^p) = 0, \qquad (11)$$

где  $\sigma_{ef}$  — эквивалентное напряжение;  $\varepsilon_{ef}^{p}$  — эффективная пластическая деформация;  $Y = Y(T, \sum \eta_{k}, \varepsilon_{ef}^{p})$  — предел текучести материала, зависимый от фазового состава  $\sum \eta_{k}$  при температуре *T* и эквивалентной пластической деформации  $\varepsilon_{ef}^{p}$ ;

$$Y(T, \sum \eta_k, \varepsilon_{ef}^p) = Y_0(T, \sum \eta_k) + Y_H(T, \sum \eta_k, \varepsilon_{ef}^p);$$
<sup>(12)</sup>

 $Y_0 = Y_0(T, \Sigma \eta_k)$  — предел текучести материала, зависящий от температуры и фазового состава при отсутствии пластической деформации;  $Y_H = Y_H(T, \Sigma \eta_k, \varepsilon_{ef}^p)$  — прирост предела текучести в результате упрочнения материала.

Модуль Юнга и касательный модуль зависят от температуры, предел текучести — от температуры и фазового состава:

$$E = E(T), \ E' = E'(T), \ Y_0 = \sum_{i=1}^{5} Y_i(T)\eta_i.$$
(13)

Скорость изменения предела текучести определяется зависимостью

$$\dot{Y} = \kappa \dot{\varepsilon}_{ef}^{p} + H_{T}^{Y} \dot{T} + \sum H_{\eta_{k}}^{Y} \dot{\eta}_{k}, \qquad (14)$$

где к,  $H_T^Y, H_{\eta_k}^Y$  — соответственно модули упрочнения, термического ослабления, структурного упрочнения-ослабления [7, 8, 17].

Очевидно, что скорость эквивалетной пластической деформации ( $\dot{\varepsilon}_{ef}^{p} = \dot{\Lambda}$ ) зависит от прироста напряжений выше предела текучести, градиентов



Рис. 1. Распределение температуры в поперечном сечении образца (зона максимальной температуры)

термофизических параметров и структурного состояния материала.

На основе модели Леблонда [13, 18] принимаем, что трансформационная деформация

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{tp} = \begin{cases} 0, \ \eta_i \le 0.03, \\ -K_{1i} \frac{S}{Y(\eta_1)} \ln(\eta_i) \dot{\boldsymbol{\eta}}_i, \ \eta_i \ge 0.03, \\ \end{cases}$$
(15)

где  $K_{li} = 3\varepsilon_{1i}^{ph}$  — объемные структурные деформации образования *i*-фазы с исходной фазы «1»;  $Y(\eta_i)$  — предел текучести для исходной фазы.

Уравнение равновесия дополняется соответствующими граничными и начальными условиями:

$$\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, t_0) = \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, T_{kr}) = 0, \ \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}, t_0) = \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}, T_{kr}) = 0, \quad (16)$$

где  $T_{kr}$  — температура, принятая за начальную при генерировании напряжений в зоне плавления. Задача решается методом конечных элементов, а в процессе итерации используется модифицированный алгоритм Ньютона–Рапсона [11].

**Примеры расчетов**. Рассмотрим пример расчетов температурного поля, количества фаз и напряжений в прямоугольном образце размером 100×20×5 мм, сваренного лазерной сваркой.

В расчетах принимали значение коэффициента отражения R = 0,25, мощность источника тепла Q = 3,8 кВт, луч диаметром 2 мм, перемещаемый со скоростью 42 м/ч [1,7]. Результаты расчетов приведены на рис. 1, 2.

Исходя из рассматриваемой геометрии образца (призма), для решения напряжений и деформаций используем модифицированные условия плоской деформации, когда выполняется условие равенства нулю суммарной нормальной силы  $N|_{\Gamma}$  в по-

перечном сечении  $\Gamma_x$  образца (рис. 3). При вычислениях определены средние значения деформации, которые удовлетворяют условию [8]:

A DIOMATICHERKAR



Рис. 2. Распределение бейнита (а) и мартенсита (б) в металле ЗТВ после сварки



Рис. 3. Схема прямоугольного образца, сваренного лазерной сваркой



Рис. 4. Зависимость модуля Юнга, касательного модуля и предела текучести от температуры по [5] (штриховая) и [12] (штрихпунктирная); сплошные кривые — расчет

$$\int_{\Gamma_x} \dot{\sigma}_x d\Gamma = \dot{N} |_{\Gamma_x} = 0, \quad \int_{\Gamma_x} \sigma_x d\Gamma = N |_{\Gamma_x} = 0.$$
(17)

С помощью формулы закона Гука для продольного напряжения ( $\dot{\sigma}_{11} = \dot{\sigma}_x$ ):

$$\dot{\sigma}_{11} = \dot{\sigma}_{x} = (2\mu + \lambda)\dot{\epsilon}_{x}^{e} + \lambda \dot{\epsilon}_{\gamma\gamma}^{e} + (2\dot{\mu} + \dot{\lambda})\epsilon_{11}^{e} + \dot{\lambda} \dot{\epsilon}_{\gamma\gamma}^{e}, \ \gamma = 2,3$$
<sup>(18)</sup>

и зависимости (17) получаем следующее уравнение для определения скорости средней, суммарной продольной деформации:

$$\dot{c}_{11} = \dot{c}_{x} = \frac{\dot{N}\Big|_{\Gamma_{x}} - \int_{\Gamma_{x}} \lambda \hat{c}_{\gamma}^{e} d\Gamma - \int_{\Gamma_{x}} \left( \left(2\dot{\mu} + \dot{\lambda}\right) \hat{c}_{11}^{e} + \dot{\lambda} \hat{c}_{\gamma}^{e} \right) d\Gamma + \int_{\Gamma_{x}} (2\mu + \lambda) \left( \hat{c}_{11}^{\mu} + \dot{c}_{11}^{\mu\mu} + \dot{c}_{11}^{\mu\mu} \right) d\Gamma}{\int_{\Gamma_{x}} (2\mu + \lambda) d\Gamma}$$

где  $\lambda = \lambda(E, v), \mu = \mu(E, v)$  — постоянные Ламе; v — коэффициент Пуассона [11].

Использование модифицированной модели плоской деформации принимает суммарную нормальную силу, равную нулю в любом поперечном сечении прямоугольника.

Для низкоуглеродистой низколегированной стали (S355J2G3) принимаем следующие термофизические параметры:  $T_0 = 300$  K,  $T_{con} = 1650$  K,  $T_{лик} = 1750$  K,  $T_{\kappa p} = 0.5(T_{лик} + T_{con}), E(T_0) = 2.0 \cdot 10^5, E(T_{\kappa p}) = 10$  МПа, E'(T) = 0.05E(T). Пределы текучести для образующихся структур  $Y_0(T_0, \eta_k)$  (аустенита, бейнита, феррита, мартенсита и перлита) имеют значения соответственно: 200, 600, 320, 1200 и 320 МПа [2, 4, 5], а для  $T = T_{\kappa p}$  предел текучести  $Y_0(T_{\kappa p}, \eta_k) = 5$  МПа. В интервале температур  $T_0...T_{\kappa p}$  значения термофизических пара-

ADVOMATICHERKAR



Рис. 5. Распределение осевых  $\sigma_{11}(a)$  и нормальных  $\sigma_{22}(\delta)$  остаточных напряжений в поперечном сечении образца



Рис. 6. Распределение нормальных  $\sigma_{33}(a)$  и касательных  $\sigma_{23}(b)$  остаточных напряжений в поперечном сечении образца

LEVENAURIERAR



Рис. 7. Остаточные эффективные напряжения  $\sigma_{e\!f}$  в поперечном сечении образца



Рис. 8. Эффективная трансформационная деформация  $\varepsilon_{ef}^{tp}$  в поперечном сечении образца



Рис. 9. Распределение остаточных напряжений в приповерхностных слоях верхней (сплошная кривая) и нижней (штриховая) поверхности образца



Рис. 10. Распределение пластической деформации в слое центральной части образца (z = -2,5)



Рис. 11. Распределение остаточных напряжений в слое центральной части образца (z = -2,5) с учетом (штриховая кривая) и без учета трансформационных деформаций (сплошная)

метров аппроксимированы параболическими функциями (рис. 4).

Результаты расчета распределения остаточных напряжений и пластической деформации в металле ЗТВ и околошовной зоне приведены на рис. 5–10.

Распределение напряжений в металле ЗТВ сварного соединения, выполненного лазерной



Рис. 12. Распределение остаточных напряжений в слое центральной части образца (z = -2,5) без учета фазовых деформаций ( $\varepsilon^{Ph} = 0$ )

сваркой (рис. 5-7, 9 и 11), не является благоприятным с эксплуатационной точки зрения. Это относится как к осевым ( $\sigma_{11}$ , рис. 5, *a* и рис. 9), так и к нормальным напряжениям в перпендикулярном оси направлении ( $\sigma_{22}$ , рис. 5,  $\delta$ ). Данные напряжения являются достаточно высокими растягивающими, и кроме того, напряжения  $\sigma_{22}$  выступают в приповерхностных слоях металла (рис. 5, б и рис. 9). На уровень напряжений существенное влияние оказывает структурная деформация, при отсутствии которой результаты будут уже другие (рис. 12). Трансформационная деформация в меньшей степени влияет на уровень напряжений (рис. 11), что позволяет не учитывать ее при моделировании напряженного состояния сварного соединения для принятых параметров сварки.

- 1. Особенности сварки тонколистовых низкоуглеродистых сталей импульсно-периодическим излучением СО<sub>2</sub>-лазера / В. Ю. Хаскин, С. Ю. Павловский, В. П. Таращук и др. // Автомат. сварка. 2001. № 2. С. 42–45.
- Kyrsanidi An. K., Kermanidis Th. B., Pantelakis Sp. G. Numerical and experimental investigation of the laser forming process // J. Materials Proc. Technol. 1999. 87. P. 281–290.
- Liu Y.-N., Kannatey-Asibu E. Laser beam welding with simultaneous gaussian laser preheating // J. Heat Transfer, Trans. of the ASME. — 1993. — 115. — P. 34–41.
- Karlsson L. Thermal stresses in welding. Thermal stresses I / Ed. R. B. Hetnarski. — Elsevier Science Publ. B. V., 1986.
- Исследование влияния фазовых превращений на остаточные напряжения при сварке кольцевых стыков труб / В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, О. В. Махненко и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 5. — С. 3–8.
- Junek L., Slovacek M., Prantl A. Thermal and stress analysis of fusion welding process incorporating microstructure effect // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах / Под ред. В. И. Махненко: Сб. тр. международ. конф. 16–20 сент. 2002, Кацивели, Крым. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2002. — С. 161–170.
- Bokota A., Piekarska W. State stresses in the heat-affected zone during laser welding process // Mechanical Eng. — 2003. — № 6. — P. 27–32.
- Бокота А., Пекарска В. Напряженное состояние сварных соединений, выполненных лазерной сваркой с подогревом // Математическое моделирование и информацион-

ADVOMATICHERKAR

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

ные технологии в сварке и родственных процессах / Под ред. В. И. Махненко: Сб. тр. международ. конф. 13–17 сент. 2004, Кацивели, Крым. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2004. — С. 32–37.

- Ossenbrink R., Michailov V., Wohlfahrt H. Numerical simulation of welding stresses and distortions in consideration of temporal and local changes of srain rate // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах / Под ред. В. И. Махненко: Сб. тр. международ. конф. 13–17 сент. 2004, Кацивели, Крым. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2004. С. 144–148.
- 10. Пекарска В. Численное моделирование структуры металла в ЗТВ при сварке стали повышенной прочности // Автомат. сварка. 2007. № 4. С. 9–14.
- 11. Zienkiewicz O. C., and Taylor R. L. The finite element method. Fifth edition. Butterworth-Heinemann, 2000. Vol. 1–3.
- Coret M., Combescure A. A mesomodel for the numerical simulation of the multiphasic behavior of materials under anisothermal loading (application to two low-carbon steels) // International J. of Mechanical Sci. — 2002. — P. 1947– 1963.

- Coret M., Calloch S., Combescure A. Experimental study of the phase transformation plasticity of 16MND5 low carbon steel induced by proportional and nonproportional biaxial loading paths // European J. of Mechanics A/Solids. — 2004. — 23. — P. 823–842.
- Hougardy H. P. Calculation of the isothermal transformation into different microstructures from measurements with continuous cooling // Materials Technology, Steel Research. — 1990. — 61, № 10.
- 15. *Melander M.* Computational and experimental investigation of induction and laser hardening. Linkoeping Studies in Sc. and Techn.: Diss. 124, Linkoeping, 1985. 124 p.
- Koistinen D. P., Marburger R. E. A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels // Acta Metallurgica. 1959. 7. P. 59–60.
- Guer H. C., Tekkaya E. A. Numerical investigation of nonhomogeneous plastic deformation in quenching process // Materials Sci. and Eng. — 2001. — P. 164–169.
- Taleb L., Sidoroff F. A micromechanical modelling of the Greenwood-Johnson mechanism in transformation induced plasticity // International J. of Plasticity. — 2003. — P. 1821–1842.

Mathematical and digital models of strains and stresses formed in laser welding of steel plates are described. The heat conduction equation comprising a convection term, which is solved by the Green function method, is used to determine the temperature field. The model of phase transformations is based on the diagram of continuous cooling of the steel welded, as well as on the Avrami and Koistinen-Marburger equations. The relationship of thermal-physical parameters with temperature and phase composition of the steel is taken into account in evaluation of temporary and residual stresses, depending upon the thermal load and phase transformations. The model allows for the structural and transformation deformation.

Поступила в редакцию 23.10.2007

# МАШПРОМ — 2008

#### 8-я Международная специализированная выставка

7-10 октября

г. Днепропетровск

#### Машиностроение, металлообработка и промышленное оборудование

Организатор: ООО «Экспоцентр «МЕТЕОР» 40008, Украина, г. Днепропетровск, ул. А. М. Макарова, 27а тел.: +38(056) 373 93 71, +38(0562) 357-357 E-mail: mashprom@expometeor.com http://www.expometeor.com

ADDOMATHREEKAR

# ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ\*

**П. КОЛОДЗИЙЧАК** (Варшавский ун-т технологий, Республика Польша), **В. КАЛИТА** (Ин-т фундаментальных технологических исследований ПАН, г. Варшава, Республика Польша)

Представлены результаты математических исследований качества одно- и разнородных соединений магниевых сплавов, полученных лазерной (CO<sub>2</sub>-лазер) сваркой с использованием гелия в качестве защитного газа.

LEVONATHREEKAR

Ключевые слова: лазерная сварка, магниевые сплавы, защитный газ, качество соединений, микроструктура, распределение твердости и микронеоднородности, статическая прочность, коррозионная стойкость

В последнее время магниевые сплавы получили большое распространение в автомобильной промышленности в основном благодаря их более низкой плотности по сравнению с такими традиционными материалами, как сталь и алюминиевые сплавы. Разработка новых магниевых сплавов, обладающих механическими свойствами сравнимыми со свойствами традиционных материалов [1], расширила их применение в виде деталей, получаемых литьем под давлением [2]. Благодаря снижению массы транспортного средства и соответственно экономии топлива оказалось возможным удовлетворить строгие требования по защите окружающей среды [3] и безопасности транспортировки [4]. Тем не менее производство и обработка магниевых сплавов в виде листовых компонентов и модульных легковесных конструкций все еще находится в состоянии разработки. При этом особое внимание уделяют лазерной сварке таких сплавов [5-17]. Последняя отличается следующими уникальными характеристиками.

высокой плотностью энергии сфокусированного пучка, позволяющей соединять элементы с эффектом кинжального проплавления при сварке (глубокий и узкий шов);

количеством эффективной энергии (соотношение между мощностью излучения лазера и скоростью сварки), необходимым для получения сплошного соединения, которое намного меньше, чем в традиционных способах (достигается узкая ЗТВ);

отсутствием необходимости в присадочном материале.

Основные параметры лазерной сварки такие, как мощность излучения лазера и скорость сканирования, легко выбираются с учетом заданной толщины соединяемых деталей. Возможно применение постоянной (максимальной) мощности излучения и соответствующей скорости сварки, подходящей для достижения стабильного процесса и полного проплавления. Параметрами процесса являются также положение фокального пятна, тип защитного газа и способы его подачи. Хотя защита гелием более дорогостоящая, чем аргоном или азотом, его применение обеспечивает лучшую форму шва, качество поверхности, меньшее количество пор и более быстрое протекание процесса сварки.

Оптимальное положение фокального пятна пучка (относительно наружной поверхности) зависит от свойств материала, его толщины и длины фокуса. Для магниевых сплавов с низкой температурой плавления (~660 °C) и температурой кипения (~1100 °C) пластины толщиной до 5 мм могут быть сварены встык с положением фокуса на наружной поверхности [5].

Для оценки качества соединений, сваренных лазером, используют несколько методик. Под действием лазерного пучка и образования зоны сплавления микроструктура обработанного материала существенно меняется. Изучение микроструктуры позволяет оценить форму зоны сплавления, изменение размера зерна, появление выделений и пористости, а также образование трещин. Твердость в поперечном сечении, перпендикулярном направлению сканирования пучка, может отличаться от твердости основного металла. Облучение сфокусированным лазерным пучком может вызвать испарение материала и термокапиллярную конвекцию, а рекристаллизация может привести к изменению химического состава после сварки, т. е. для определения атомарного распределения желателен анализ с помощью рентгеновского микрозонда. Статическую прочность на растяжение и сопротивление соединений на поперечную нагрузку определяют обычно механическими испытаниями на стенде «Инстрон».

<sup>\*</sup> По материалам международной конференции «Laser technologies in welding and materials processing», 29 May–1 June, 2007, vil. Katsieveli, Crimea, Ukraine.

<sup>©</sup> П. Колодзийчак, В. Калита, 2008

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

После разрушения изделий РЭМ-изображения изломов можно сравнить с изломами основного металла.

характеристики магниевых Коррозионные сплавов существенно зависят от способа их изготовления. Разработка новых технологий позволила получить высокочистые сплавы и значительно улучшенную коррозионную стойкость [18, 19]. Изменения в сварном соединении, вызванные лазерной сваркой (модификация химического состава, металла шва и его литое состояние, возникновение интерметаллидных фаз), могут существенно сказаться на коррозионной стойкости металла шва по сравнению с основным металлом. Обычно для образцов основного материала в литом состоянии и образцов с соединениями выполняют сравнительные испытания на коррозионную стойкость с помощью простого иммерсионного испытания, а также электрохимическим способом, за которым следуют микроскопические оценки. Для более детальной оценки сваренных структурных компонентов можно использовать испытания на усталость и испытания на чувствительность деформации (для ударостойких компонентов [20]).

В данной статье представлены некоторые результаты применения перечисленных выше методик для оценки качества соединений магниевых сплавов, полученных лучом CO<sub>2</sub>-лазера с кинжальным проплавлением.

Методика эксперимента. Стыковую сварку пластин из одно- и разнородных сплавов без использования присадочного металла выполняли СО<sub>2</sub>-лазером с быстрым осевым потоком при максимальной мощности 2,5 кВт. Пучок с режимом, близким к ПЭМ, сфокусировали до диаметра 0,25 мм с помощью линз ZnSe 5". Литые магниевые сплавы AM50 (химический состав, мас. %: 5,0 Al; 0,30 Mn; < 0,2 Zn) и AZ91 (9,0 Al; 0,17 Mn; 0,7 Zn) обрабатывали из брусков в литом состоянии до пластин толщиной 2,0...4,5 мм, шириной 50 мм и длиной сварочных кромок 100 мм. В статье представлены результаты, полученные для пластин толщиной 4,5 мм.

Режимы сварки устанавливали следующие: мощность излучения лазера 2 кВт, скорость сварки 4 м/мин. После оценки влияния положения фокального пятна (относительно поверхности материала) на зону проплавления положение фокусного пучка было установлено на верхней поверхности пластин. Гелиевую защиту наружных поверхностей обеспечивали с помощью сопла диаметром 4 мм с расходом 15 л/мин, нижние поверхности защищали продувкой аргоном.

Микроструктуры и распределение твердости оценивали на поперечных сечениях, перпендикулярных направлению сканирования пучка, а также на поперечных сечениях, выполненных параллельно по отношению к наружной поверхности вдоль шва. Для определения любых изменений, появившихся в результате действия лазерного луча (например, испарение материала и конвекции), выполняли анализ элементного распределения основных элементов рентгеновским микрозондом. Механические характеристики соединений определяли с помощью испытаний на стенде «Инстрон» для статического сопротивления растяжению и на стенде для трехточечного изгиба. После разрушения изделий были получены РЭМ-изображения изломов. Сравнительные испытания на сопротивление коррозии выполняли электрохи-



Рис. 1. Макроструктура стыковых сварных соединений из одно- и разнородных сплавов: *a* — AZ91–AZ91; *б* — AM50–AM50; *в* — AZ91–AM50



#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



Рис. 2. Микроструктура в переходных зонах от основного металла (сплав AM50) до зоны сплавления (*a*) и от зоны сплавления к сплаву AZ91 (*б*) в соединении AM50–AZ91

LEROMATICHECKAE

мическим способом (измерение переменного напряжения).

Результаты и обсуждение. Макроструктура стыковых сварных соединений из одно- и разнородных сплавов приведены на рис. 1. Границы зон сплавления практически параллельны, соотношение геометрических размеров швов (толщины пластины к средней ширине зоны сплавления) свидетельствует о полученном кинжальном проплавлении с хорошим формированием соединения. На макрошлифах отсутствуют поры и трещины как в свариваемых сплавах, так и в их сварных соединениях.

В результате короткого времени (не менее 4 мс) излучения луча и быстрой кристаллизации зоны сплавления характеризируются значительным измельчением зерна. Резкие переходы от основного металла к зоне сплавления могут указывать на отсутствие ЗТВ. На рис. 2 видно, что характерное направление кристаллизации относится только к однозеренному слою со стороны сплава AM50.

Измерения распределения твердости в поперечном сечении швов (перпендикулярно направлению сварки) для однородных соединений сплавов показали значительное увеличение твердости в зонах сплавления по сравнению с основным металлом. Эти результаты могут быть связаны не только с сильным измельчением зерна в шве, но и с увеличением осаждения на границах зерна и появлением интерметаллидных соединений. В разнородных соединениях сплавов таких явлений не наблюдается (рис. 3).

Для определения изменений в химическом составе материала, вызванных влиянием действия луча, были выполнены измерения элементного распределения с помощью рентгеновского микрозонда XL-30 компании «Филипс». Установлено, что из-за очень низкой точки кипения магния (~1100 °C) по сравнению с алюминием (~2300 °C) содержание магния в соединениях было несколько снижено в результате его испарения (особенно в соединении AZ91-AZ91). Амплитуды элементного изменения в результате сильного измельчения зерна в зонах сплавления оказались намного меньше, чем на наружной стороне швов. Особенно интересным является элементное распределение разнородных соединений сплавов АМ50-АZ91. В ходе измерений, выполненных по толщине соединений, можно обнаружить влияние термокапиллярной конвекции и последующего смешивания. В действительности наиболее значительные изменения в химическом составе вдоль соединения можно наблюдать в районе наружных и нижних поверхностей, в то время как распределение на



Рис. 3. Распределение микротвердости для соединений из разнородных сплавов АZ91–АМ50, измеренное на расстоянии 1,5 мм с внешней поверхности



Рис. 4. Элементное распределение вдоль соединения из сплавов AM50 и AZ91, измеренное до половины толщины поперечного сечения



Рис. 5. Кривые напряжения-деформации при растяжении основного металла (1) и соединений (2): *а* — AZ91–AZ91; *б* — AM50–AM50



Рис. 6. Кривые напряжения-деформации при растяжении для соединений из одно- и разнородных сплавов: *1* — AZ91-AZ91; *2* — AZ91-AM50; *3* — AM50-AM50

половине толщины является достаточно гладким (рис. 4).

Как видно из рис. 5, разрушение сварных образцов для всех сплавов возникало в отдалении от границ зоны сплавления, т. е. в области основного металла. Как можно было бы ожидать,



Рис. 7. Влияние отклонения на нагрузку для сплава AZ91: *1* — соединение; 2 — основной металл

образцы со швами имеют меньшее удлинение при разрушении, чем основной металл. Однако существуют различия для напряжения при растяжении: для соединения AM50-AM50 напряжение при разрушении меньше, а для AZ91-AZ91 больше, чем для образцов основного металла. Для соединений AZ91-AM50 изделие разрушалось со стороны AZ91 также далеко от зоны сплавления. Сравнение кривых напряжения-деформация для всех соединений приведено на рис. 6. Согласно предположениям, удлинение при разрушении для разнородных соединений находилось между значениями для соединений из хрупкого сплава AZ91 и вязкого AM50. Поскольку разрушение сварных образцов возникало далеко от зон сплавления, на РЭМ-изображениях поверхностей разрушенных изделий из основного металла и образцов с соединениями не обнаружено различий.

Статическое испытание на изгиб было выполнено на стенде для трехточечного изгиба (шаг опорных роликов 70 мм, диаметр роликов 30 мм). Различия между образцами со швом и основным металлом наблюдались только у соединений из хрупкого сплава AZ91, где максимальная нагрузка



Рис. 8. Зависимость силы тока от потенциала электрода для сварного образца (1) и основного металла (2) сплавов АZ91 (а) и АМ50 (б)

AUTOMATCHECKAR

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

для основного металла ниже, чем для соединения (рис. 7).

Коррозионное поведение сварного соединения и основного металла практически одинаковой площадью (1 см<sup>2</sup>) оценивали электрохимическим методом. Измерения выполняли в аэрированном 0,9%-м растворе NaCl, с шагом потенциала в 1 мB/с (от – 100 до + 300 мB). Кривые поляризации для сварного соединения и основного металла для AZ91 и AM50 приведены на рис. 8. Сравнив кривые поляризации для сварного и основного металла, можно сделать вывод, что фактически отличия в коррозионном сопротивлении отсутствуют.

В заключение следует отметить, что сварка одно- и разнородных сплавов в одинаковых условиях обеспечивает кинжальное проплавление соединений с практически параллельными границами, отсутствие пор и трещин, а также ЗТВ.

Сильное измельчение зерна и увеличенное осаждение в зоне сплавления усиливает прочность в этих областях по сравнению с основным металлом.

Во время статических испытаний на растяжение разрушения во всех соединениях появлялись далеко от шва, т. е. в соединениях из разнородных сплавов со стороны хрупкого сплава AZ91. Пластические характеристики образцов со швами ниже, чем для основного металла. При испытаниях на изгиб различия между сварным соединением и основным материалом можно наблюдать только для соединений хрупкого сплава AZ91.

Результаты испытаний на коррозию погружением, выполненные в 0,9%-м растворе NaCl, показали, что сварка разнородных сплавов, в данном случае AZ91–AM50, увеличивает чувствительность к электрохимической коррозии, даже если разница между значениями потенциала электрода небольшая. Оценка коррозионной стойкости, выполненная электрохимическим методом, для соединений из однородных сплавов практически не отличается от данных испытаний основного металла.

- Fredrich H., Schumann S. Resarch for a «new age of magnesium» in the automotive industry // Mater. Proc. Technology. — 2001. — 117. — P. 276–281.
- 2. Longworth S. J. P. The bolting of magnesium components in car engines: Diss. for Master of Philosophy Degree to University of Cambridge, 2001.

- Aghion E., Bronfin B., Elieze D. The role of magnesium industry in protecting the environment // J. Mater. Proc. Technology. — 2001. — 117. — P. 381–385.
- Mordike B. L., Ebert T. Magnesium. Properties-applications-potential // Material Sci. and Eng. A. — 2001. — 302. — P. 37–45.
- Weisheit A., Galun R., Mordike B. L. CO<sub>2</sub> laser beam welding of magnesium-based alloys // Welding Res. Suppl. 1998. — 77. — P. 149–154.
- CO<sub>2</sub> laser weldability of WE43 magnesium alloy for aeronautic industry / M. Dhari, J. E. Masse, J. F. Mathieu et al. // Proc. of LANE, Erlangen, Germany, 28–31 Aug. 2001. — P. 297–310.
- Zhao H., Debroy T. Pore formation during laser beam welding of die-cast magnesium alloy AM60B — mechanism and remedy // Welding Res. Suppl. — 2001. — P. 204–210.
- A comparative evaluation on microstructures in TIG and laser welded AZ31 magnesium alloy / Z. Sun, J. Wei, D. Pan et al. // SIMTech Technical Report PT/01/008/JY. — 2001. — P. 1–8.
- Laser beam welding of magnesium alloys new possibilities using filler wire and arc welding / H. Hakekamp, M. Goede, A. Bormann et al. // Proc. of LANE, Erlangen, Germany, 28–31Aug. 2001. 2001. P. 333–338.
- Watkins K. G. Laser welding of magnesium alloys // Proc. of magnesium technology conf., San Diego, USA, March 2–6, 2003. — 2003. — P. 153–156.
- Stern A., Munitz A., Koln G. Application of welding technologies for joining of Mg alloys. Microstructure and mechanical properties // Ibid. — 2003. — P. 163–170.
- Welding and weldability of AZ31B by gas tungsten arc and laser beam / S. Lathabai, K. J. Barton, D. Harris et al. // Ibid. — 2003. — P. 157–162.
- Kalita W., Kolodziejczak P., Pokhmurska H. Welding of Mg-based alloy AM20 by CO<sub>2</sub> laser beam // Proc. of Intern. conf. on laser technologies in welding and materials processing, Katsiveli, Ukraine, 19–23May, 2003. — P. 214–216.
- Dasgupta A. K., Mazumder J. Laser welding of AM60 magnesium alloy // Proc. of magnesium technology conf., Charlotte, USA, 14–18 March, 2004. — P. 43–48.
- Laser welding of magnesium-based alloys of MgAlZn group / W. Kalita, P. Kolodziejczak, J. Hoffman et al. // Advances in Manufacturing Sci. and Techn. — 2004. — P. 45–53.
- Properties of the butt-welded joints of CO<sub>2</sub> laser welded Mg alloys / W. Kalita, P. Kolodziejczak, L. Kwiatkowski et al. // Proc. of LANE, Erlangen, Germany, 21–24 Sept., 2004. — Vol. 1. — P. 317–328.
- Kalita W., Kolodziejczak P., Kwiatkowski L. Properties of the CO<sub>2</sub>-laser welded joints of dissimilar magnesium alloys // Proc. of 2nd Intern. conf. on laser technologies in welding and materials processing, Katsiveli, Ukraine, 23–27 May, 2005. — P. 79–84.
- Factors affecting the corrosion resistance of cast magnesium alloys / P. Y. Li, H. J. Yu, S. C. Chen et al. // Proc. of magnesium technology conf., San Diego, USA, 2–6 March, 2003. — P. 51–58.
- Corrosion properties of the butt-welded joints of laser welded Mg alloys / L. Kwiatkowski, M. Grobelny, W. Kalita et al. // Inzynieria Powierzchni A. 2005. 11, № 2. P. 191–197.
- Abbott T., Easton M., Schmidt R. Magnesium for crashworthy components // Proc. of magnesium technology conf., San Diego, USA, 2–6 March, 2003. — P. 227–230.

Presented are the results of comprehensive investigations of the quality of similar and dissimilar magnesium alloy joints, produced by CO<sub>2</sub>-laser welding using helium as a shielding gas.

ADTOMATICHERKAR

Поступила в редакцию 22.02.2008

# ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА И ПАЙКА В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ\*

Ф. АЛЬБЕРТ, А. ГРИММ, С. КАГЕЛЕР, М. ШМИДТ (Лазерный центр Байера GmbH, г. Эрланген, Германия)

Лазерная сварка и пайка приобретают все большее значение в современном автомобилестроении. Эти высокопроизводительные способы обеспечивают получение качественных соединений материалов и минимизируют затраты на повторную обработку. Возможность управления этими процессами позволяет избежать возникновения дефектов. Указанными проблемами занимается Лазерный центр Байера. Там, в частности, решают задачу лазерной сварки оцинкованных стальных листов в конструкциях с соединением внахлестку и для лазерной пайки.

Ключевые слова: лазерные сварка и пайка, автомобилестроение, тонколистовые конструкции, оцинкованный лист, дефекты соединения, параметры модуляции мощности

Лазерная сварка тонких оцинкованных стальных листов в конструкциях с соединением внахлестку, широко используется при производстве кузовов легковых автомобилей. Однако даже с учетом результатов последних исследований и технологических усовершенствований очень трудно контролировать и прогнозировать лазерный процесс соединения таких листов при сварке с нулевым зазором. В большинстве случаев оцинкованные покрытия на поверхности стальных листов имеют температуру испарения ниже, чем температура плавления стали  $(T_{nn}^{cM} > 1800 \text{ K}; T_{ucn}^{Zn} = 1800 \text{ K}).$ При сварке с нулевым зазором, как правило, дегазация испарившегося цинка между листами невозможна. Следовательно, он испаряется через парогазовый канал, при этом нарушается баланс давления и гидродинамических процессов, происходящих в сварочной ванне, и как следствие, в сварном шве появляются повреждения и дефекты (рис. 1).

Существует несколько способов воздействия на процесс лазерной сварки и качество формирования сварного шва. Один из них, описанный в настоящей статье, основывается на модуляции мощности лазерного излучения, что должно способствовать стабильной динамике парогазового канала и создавать постоянную дегазацию испарившегося цинка через выпускное отверстие, а также исключать повреждения, появившиеся в результате разрушений парогазового канала. Взаимодействие модуляции мощности излучения с парогазовым каналом и жидким металлом анализируется с помощью высокоскоростной съемки,



Рис. 1. Вид сварного шва оцинкованных стальных листов в конструкции с соединением внахлестку с нулевым зазором

сигналов оптического процесса и результатов сварки.

Лазерная пайка является перспективным способом получения соединений при изготовлении кузовов легковых автомобилей. Но поскольку появление таких дефектов, как поры, отверстия, непровары и одностороннее расплавление стальных листов, полностью исключить невозможно, то проверка качества изделий после их изготовления является обязательной. Точность используемых роботов и изменения мощности излучения лазера и фокального положения являются определяющими факторами в процессе образования дефектов. Дорогостоящую проверку после изготовления изделий можно заменить пирометрическим контролем качества в режиме реального времени, который также рассматривается в этой статье. Использование системы контроля, основанной на измерении температуры, позволяет определять отмеченные дефекты. Более того, такой контроль лежит в основе управления процессом с обратной связью, что дает возможность регулировать положение робота, мощность излучения лазера и положение фокуса. В работе рассматриваются система-технология и результаты пирометрических сигналов и экспериментов.

Лазерная сварка стальных оцинкованных листов. На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки. С помощью сварки с глубоким проплавлением два стальных оцинкованных листа толщиной 0,6 и 0,7 мм соединяются внахлестку с нулевым зазором. Цинковое покрытие имеет среднюю толщину 10 мкм. Лазерным источником является дисковый Yb:YAG-лазер с максимальной выходной мощностью 4 кВт и дли-

<sup>\*</sup> По материалам международной конференции «Laser technologies in welding and materials processing», 29 May– 1 June, 2007, vil. Katsieveli, Crimea, Ukraine.

<sup>©</sup> Ф. Альберт, А. Гримм, С. Кагелер, М. Шмидт, 2008

#### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



Рис. 2. Схема экспериментальной установки

ной излучения 1030 нм. Качество выработки луча составляет приблизительно 9,2 мм мрад, фокусное расстояние — 450 мм.

Оптическая эмиссия процесса сварки определяется силиконовым фотодиодом со спектральным диапазоном, составляющим приблизительно 400...1000 нм, и профильтрованным полосой пропускания на 530 нм. Мощность излучения лазера, сигнал модуляции и эмиссии процесса сварки определяются одновременно с частотой выборки 50 кГц. Угол обзора фотодиода, составляющий приблизительно 80°, ориентирован на горизонтальную базисную линию.

Для того чтобы оказать влияние на колебания парогазового канала, мощность лазерного излучения модулируют в диапазоне средней мощности P = 3,6 кВт. B качестве режима модуляции, как правило, выбирают обычную синусоидальную кривую. Во избежание возникновения эффекта резонанса при модуляции в диапазоне собственной частоты динамической характеристики парогазового канала в течение длительного времени, несущая частота изменяется с помощью частотной модуляции. Несущий сигнал представляет собой пиковую мощность лазерного излучения. При изменении частотной модуляции или сдвиге можно определить диапазон мощности лазерного излучения. Типичный сигнал модуляции, который использовался в исследованиях, показан на рис. 3.





LEITOMATURIEGRAE

Для предотвращения появления дефектов при лазерной сварке с глубоким проплавлением стальных оцинкованных листов важным фактором является наличие незначительных отклонений давления парогазового канала в определенном диапазоне частот. Результаты сварки незагрязненных листов показали, что глубина сварки стабилизируется. При более низком диапазоне частот наблюдаются отклонения [1].

Для понимания этого явления необходимо принимать во внимание то, что в лазерной сварке с глубоким проплавлением сложные физические процессы накладываются друг на друга. Парогазовый канал с раскрытием по направлению лазерного луча формируется при испарении материала и окружен ванной, которая состоит из жидкой стали. Газообразный материал направляется в сторону раскрытия капилляра, что приводит к снижению давления внутри парогазового канала. Для достижения стабильности сварочного процесса эту потерю давления необходимо компенсировать за счет постоянного испарения материала. Баланс давления пара при испарении стали и давления жидкой стали ванны удерживает парогазовый канал в открытом состоянии. Баланс давления создается внешним давлением, включающим поверхностное давление  $P_{\text{пов}}$ , гидростатическое *P*<sub>гидрост</sub>, гидродинамическое *P*<sub>гидродин</sub> и внутреннее давление, состоящее из абляционного *Р*<sub>абл</sub> и газового гидродинамического давления *Р*<sub>газ</sub>. Взаимодействие внешнего и внутреннего давления приводит к специфической динамической характеристике парогазового канала. С помощью БПФ анализа оптических эмиссий при немоделированном процессе лазерной сварки оцинкованных стальных листов (конструкция с перекрытием, зазор 100 мкм) была продемонстрирована характерная частота колебаний парогазового канала (рис. 4).

Дисбаланс давления внутри и снаружи парогазового канала может возникнуть при изменении параметров процесса сварки, толщины листов цинка или геометрии (размера) зазора, а также мощности лазерного излучения и скорости сварки. При сварке стальных оцинкованных листов вокруг расплава появляется область испарения с высоким давлением. Если зазор между листами узкий, испарение не может выйти наружу, возникают отклонения в давлении парогазового канала и появляются повреждения. Взрывообразный процесс дегазации нарушает процесс сварки, и парогазовый канал разрушается вследствие дисбаланса давления (рис. 5). Большой объем жидкой стали вытесняется из ванны расплава, что приводит к образованию раковин, непроваров или пор в металле сварного шва, которые негативно влияют на механические свойства сварного шва [2-7]. Собственную частоту парогазового канала



Рис. 4. Временной сигнал оптической эмиссии при сварке внахлестку лазером непрерывного действия двух оцинкованных стальных листов толщиной 0,6 или 0,7 мм с нулевым зазором при P = 3600 Вт, скорости сварки  $v_{\rm cB} = 6$  м/мин, длине излучения  $\lambda = 1030$  нм и размере сварочной точки  $d_{spot} = 600$  мкм



Рис. 5. Спектр частот сварки внахлестку лазером непрерывного действия двух оцинкованных стальных листов толщиной 0,6 или 0,7 мм с зазором 100 мкм при P = 3600 Вт,  $v_{\rm cB} = 6$  м/мин,  $\lambda = 1030$  нм,  $d_{spot} = 600$  мкм (серым цветом обозначен диапазон частоты парогазового отверстия)

в этом случае определить невозможно, и процесс сварки является нестабильным.

В настоящей работе определяли параметры эффективной модуляции, с помощью которых можно влиять на процесс сварки при раскрытом парогазовом канале. Такое условие выполнимо, если диапазон частоты модуляции мощности излучения находиться в области собственных колебаний динамической характеристики парогазового канала. Это справедливо, если пики в диапазоне частот процесса эмиссий находятся в том же диапазоне, что и частота модуляции мощности излучения. Экспериментальным путем замедление процесса может быть определено с помощью расчета передаточной функции с информацией относительно частоты эмиссий процесса и мощности лазерного излучения.

В течение одного сварочного процесса (длина шва 300 мм) частота модуляции мощности (f = 0 и 10 кГц) зависит от оптической эмиссии и параметров модуляции, что позволяет определить передаточную функцию и требуемую частоту модуляции (рис. 6).



Рис. 6. Модель для вычисления передаточной функции и определения параметров модуляции

На рис. 7 представлена типичная передаточная функция при сварочном процессе при описанных выше условиях. Небольшое замедление процесса сварки можно наблюдать при  $f_{\text{нес}} = 4,5$  и 6,0 кГц. Несущая частота, необходимая для модуляции мощности излучения, должна находиться в том же диапазоне.



Рис. 7. Передаточная функция при лазерной сварке оцинкованных стальных листов толщиной 0,6 или 0,7 мм при P = 3,6 кВт,  $v_{cB} = 6$  м/мин,  $d_{spot} = 600$  мкм: 1 - 40; 2 - 120; 3 - 200 Вт

AUTOMATURIEGRAE

39

#### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



Рис. 8. Изображения выходного отверстия при сварке листов толщиной 0,6 или 0,7 мм с модуляцией мощности при P = 3,6 кВт,  $f_{\text{Hec}} = 4,5$  кГц,  $v_{\text{cB}} = 6$  м/мин,  $d_{spot} = 600$  мкм:  $a - \tau = 0$ ;  $\delta - 0,1$ ; s - 0,2; c - 0,3;  $\delta - 0,4$ ; e - 0,5;  $\varkappa - 0,6$ ; s - 0,7 мс

Такие факторы модуляции, как ее скважность (амплитуда), частотная модуляция, а также скорость частотной модуляции, не обнаруживаются. Эти данные можно получить путем измерений в ходе дальнейших экспериментальных исследований.

Как видно из рис. 8, модуляция мощности излучения с несущей частотой в определенном диапазоне приводит к открытию парогазового канала в течение всего сварочного процесса. Без модуляции размер парогазового канала будет изменяться. Наличие повреждений определяется с помощью высокоскоростной съемки.

Результаты экспериментов показали, что в случае применения модуляции мощности количество раковин в шве уменьшается (рис. 9). Количество повреждений можно уменьшить, но достичь их полного отсутствия пока невозможно.

Дальнейшие эксперименты показали, что повреждения могут образовываться также позади парогазового канала. Стабильность парогазового канала — это только один шаг к уменьшению количества дефектов. Для получения бездефектных сварных швов необходимо дополнительно осуществить повторную дегазацию.

Контроль качества лазерной пайки в режиме реального времени. Рассмотрим вопрос о разработке контроля для лазерной пайки с помощью высокомощного диодного лазера, который позволяет обнаружить такие недостатки, как поры, непровары и одностороннее расплавление в режиме реального времени. Более того, эта система контроля лежит в основе управления процессом с обратной связью, что дает возможность отказаться от дорогостоящего послеоперационного контроля качества.

Новым перспективным подходом для процесса управления и контроля в режиме реального времени являются локально обозначенные измерения температурного поля обеих соединяемых частей. Исследования подтвердили наличие взаимосвязи между температурой и качеством шва.



Рис. 9. Зависимость количества N впадин на шве длиной 300 мм от несущей частоты модуляции мощности (средняя мощность P = 3,6 кВт)

Новая система управления и контроля процесса в режиме реального времени, основанная на измерении температуры, дает возможность значительно уменьшить производственные затраты для лазерной пайки. Таким образом, этот процесс станет более привлекательным для автомобилестроения благодаря системе, основывающейся на пирометрах, способной выполнять измерения температуры. Целью этого исследования является определение дефектов в шве для исключения их появления при последующем процессе сварки с контролируемой обратной связью. Это можно выполнить с помощью как температурных измерений во время процесса пайки, так и детекторов инфракрасного излучения для того, чтобы получить информацию о влиянии неотрегулированного контроля температуры на процесс пайки. Следующей целью является внедрение устройств измерения температуры в паяльную головку с системой подачи проволоки для высокомощных диодных лазеров, что позволит обеспечить роботизированный и лазерный контроль.

Исследование выполняется при помощи системы, используемой для лазерной пайки, которая включает устройство подачи проволоки и волоконно-световодный высокомощный диодный ла-



Рис. 10. Основная схема системы контроля процесса: *I* — лазер; *2* — пирометр; *3* — температурные поля; *4* — проволока

LEITOMATURIEGRAE



Рис. 11. Вид очищенного сверху шва (*a*) с боковым смещением на 0,3 ( $\delta$ ) и 0,5 (*в*) мм: *a* —  $\tau = 1,8$  с;  $\Delta y = 0$ ;  $\delta = \tau = 3,8$  с;  $\Delta y = 0,3$  мм; *в* —  $\tau = 7,5$  с;  $\Delta y = 0,5$  мм

зер с максимальной выходной мощностью 2,7 кВт. Благодаря оптической системе, встроенной в паяльную головку, и световоду диаметр лазерной точки на конце проволоки составляет 3,1 мм. Наиболее важными элементами экспериментальной установки являются две встроенные пирометрические оптические системы, которые подсоединены с помощью оптоволокна к пирометрам. Используемая двухцветная технология измерения должна быть независима от фактора эмиссии, который определяет температуру от 500 до 1300 °C при длине волны 1,52 и 1,64 мкм с временем срабатывания t<sub>90</sub> до 2 мс. Измерение выполняли в монорежиме при  $\varepsilon = 0.8$ . Вследствие динамических характеристик процесса сварки и постоянного изменения соотношения между расплавленными и твердыми материалами в зоне обработки необходимо принимать во внимание тот факт, что соответствующее определение эмиссионной способности и абсолютное определение температуры невозможны. Диаметр зоны измерения может регулироваться от 1 до 5 мм.

Исследования выполняли на линейных торцевых соединениях стальных листов глубокого отпуска DX 54 D + Z100 толщиной 0,8 мм, используемых для изготовления деталей автомобильных кузовов. Скорость пайки составляла 2,1 м/мин, а мощность лазера — 2,7 кВт. Это оптимальные па-





Рис. 12. Последовательность сигнала при боковом смещении на 0,3 ( $\tau$  = 3,8 с) и 0,5 мм ( $\tau$  = 7,5 с); количество образцов n = 5



Рис. 13. Последовательность сигнала при изменениях мощности излучения лазера (средняя мощность 700 Вт) *n* = 5

раметры для получения качественной поверхности шва и необходимой степени его заполнения.

На рис. 11 показано несколько видов намеренно поврежденных деталей с линейными торцевыми соединениями. Исходя из идеального положения паяльной головки по отношению к соединению (рис. 11, a) боковое отклонение траектории постоянно увеличивается на 0,3 мм (рис. 11,  $\delta$ ). Затем паяльная головка возвращается назад в идеальное положение и снова смещается. Боковое смещение от оси в этом случае составляет до 0,5 мм (рис. 11,  $\epsilon$ ). В конце специальное отклонение от оси отсутствует.

Боковые отклонения указывают на очевидное расплавление нижнего стального листа, поскольку расплавление при отклонении от оси на 0,5 мм, естественно, превышает требуемое расплавление (рис. 11,  $\delta$ ).

С помощью системы измерения, описанной выше, фиксируется последовательность сигналов этих процессов (рис. 12), при этом обнаруживаются два отклонения от оси. Два имеющихся дефекта отличаются амплитудами своих сигналов, что можно определить по различным отклонению и расплавлению.

Изменение мощности лазера также можно определить исходя из последовательности сигналов. Оба пирометрических сигнала увеличиваются при

#### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ -

изменениях мощности  $\Delta P = 700$  Вт в периоды 3,7 и 7,6 с (рис. 13).

Следовательно, сигналы датчика позволяют установить различия между типами дефектов и их различной интенсивностью.

Результаты экспериментов подтверждают возможность системы контроля качества лазерной пайки в режиме реального времени. Исследования наилучших условий для обнаружения дефектов, а также эффективности применения системы измерения на намеренно поврежденных деталях четко показали имеющийся потенциал.

Этапы настоящего проекта включают оценку системы измерения для соединений с угловым швом и сложной геометрией шва. В будущем полученные данные должны стать основой для разработок температурного процесса с обратной связью применительно к пайке высокомощными диодными лазерами.

- 1. Otto A. Transiente Prozesse bein Laserstrahlschweissen: Diss.: Reihe Fertigungstechnik. Erlangen, 1997.
- 2. *Geisel M.* Prozesskontrolle und Steuerung beim Laserstrahlschweissen mit der nichtlinearen Methodik: Diss.: Reihe Fertigungstechnik. Bamberg: Meisenbach, 2002.
- Hohenstein R., Otto A., Geiger M. Systemanalyse des dynamischen Verhaltens beim Laserstrahlschweissen // Strahl-Stoff-Wechselwirkung bei der Laserbearbeitung. — Bremen: BIAS, 1998. — S. 125–130.
- Kaplan A. Modellrechnung und numerische Simulation von Absorption, Waermeleitung und Stroemung des Laser-Tiefschweissens. — Diss.: TU Wien, 1994.
- 5. Beck M. Modellierung der Lasertiefschweissens. Stuttgart: Teubner, 1996.
- Kroos J. Stabilitat und Dynamik der Dampfkapillare beim Schweissen von Metallen: Diss. — TU Braunschweig, 1993.
- Klein T. Freie und erzwungene Schwingungen der Dampfkapillare beim Laserstrahlschweissen von Metallen. — Aachen: Shaker, 1997.

Laser welding and brazing have an increasingly great importance in current motor car construction. Both methods provide the possibility of high-efficiency joining of materials, and minimise machining costs. Stable process control allows avoidance of defects. Two research projects performed at the Bavarian Laser Centre (Bayersches Laserzentrum) address this problem and verify solutions for laser welding of galvanised steel plates in roofed structures, and for laser brazing

Поступила в редакцию 22.02.2007

### ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ

объявляет ежегодный набор в

#### **ДОКТОРАНТУРУ** по специальностям:

- ✓ сварка и родственные технологии
- ✓ автоматизация технологических процессов
- ✓ металловедение и термическая обработка металлов
- ✓ металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

#### АСПИРАНТУРУ по специальностям:

- ✓ сварка и родственные технологии
- ✓ автоматизация технологических процессов
- ✓ металловедение и термическая обработка металлов
- ✓ металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

Прием в аспирантуру проводится в сентябре. Контактный телефон: 289-84-11

Подробная информация на сайте института (раздел аспирантура):

www: paton.kiev.ua

Документы направлять по адресу: 03680, Украина, Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 11

AUTOWATCHERKA

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ученому секретарю

## СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ ПРИПОЕВ

# И. Н. ПАШКОВ, д-р техн. наук, И. И. ИЛЬИНА, И. В. РОДИН, С. В. ШОКИН, С. А. ТАВОЛЖАНСКИЙ, кандидаты техн. наук (ЗАО «АЛАРМ», г. Москва, РФ)

Рассмотрены способы получения быстрозакаленных припоев в виде проволоки диаметром от 0,3 до 6 мм из труднодеформируемых материалов в пластическом состоянии. Композиции припоев на основе Cu–P, Cu–P–Sn, Cu–Zn–P–Ni и других в результате закалки приобретают структуру квазиэвтектики, содержащую пересыщенный твердый раствор с распределенными фазами фосфида меди. Приведены примеры применения быстрозакаленных припоев.

Ключевые слова: пайка, быстрозакаленные припои, проволока, лента, микроструктура, способы получения, применение

Процессы получения припоев методом закалки из расплава, с одной стороны, позволяют достигать высоких скоростей охлаждения, что приводит к кардинальному изменению структуры и свойств получаемого материала, с другой — получать продукцию в таком виде (например, волокна, чешуйки, иглы, фольги) и форме, которые трудно достижимы традиционными методами. В наибольшей мере приведенные преимущества проявляются в случае получения металлов и сплавов, хрупких по своей природе и труднообрабатываемых давлением. Кроме того, при обеспечении постоянства подачи расплава процесс получения материалов из расплава легко автоматизировать и сделать непрерывным или полунепрерывным.

Наиболее интересны с точки зрения получения длинномерных заготовок, полуфабрикатов и изделий литье способом жидкой прокатки, непрерывное литье и литье намораживанием.

Затвердевание расплавленного металла со сверхвысокими (более 10<sup>5</sup> К/с) скоростями охлаждения позволяет с достаточно высокой производительностью получать практически всю гамму аморфных и микрокристаллических материалов, что уже длительное время используется в зарубежной и отечественной практике. Технология быстрого затвердевания расплава на вращающемся диске-кристаллизаторе позволяет получать калиброванные АМС-припои в виде тонкой пластичной ленты толщиной 20...100 мкм и шириной 2...50 мм [1]. Производителем таких припоев в России является МИФИ-АМЕТО.

Преимуществами данного способа являются высокая химическая активность, чистота и однородность припоя, что предопределяет его высокие технологические свойства при пайке, возможность точной дозировки припоя и разнообразие его составов, получение которых исключено другими способами, обеспечение высокого качества паяного соединения и его высокого качества и др. Недостатки способа заключаются в трудоемкости выполнения технологии и высокой цене продукции, необходимости в очень точных и фиксированных зазорах при сборке паяных соединений (оптимально 0,025...0,050 мм), значительном ограничении в выборе способов и оборудования для пайки. Использование АМС-припоев обусловливает повышенные требования к механической обработке паяемых деталей. Затруднено их применение в массовом производстве паяных конструкций, когда, например, соединяются пайкой концы прессованных трубок в состоянии поставки. Так, в производстве теплообменников, бытовых и промышленных холодильников, радиаторов и др. при сборке величина зазора может колебаться в широких пределах (от близкого к нулю до 0,7 мм), что обусловлено большими допусками по диаметру трубок.

Для решения задач по обеспечению потребителей более металлоемкой продукцией, например, проволокой (диаметром от 0,3 до 3 мм) из хрупких припоев, был рассмотрен процесс закалки припоя из расплава при одностороннем отводе тепла [2–4].

В ЗАО «АЛАРМ» (г. Москва) получил развитие способ экстракции расплава, который заключается в извлечении вращающимся кристаллизатором из ванны расплава заготовки, затвердевающей на его поверхности, отделении ее с поверхности диска-кристаллизатора и смотке на специальном устройстве в виде бухты. Таким способом можно получать проволоку или ее отрезки некруглого сечения (в виде зернышка боба) с переменным диаметром 0,3...3,0 мм.

Для получения прутков с определенным диаметром (от 3 до 6 мм) был применен способ роторной разливки расплава в желоб вращающегося кристаллизатора. Увеличение времени охлаждения затвердевшего материала на поверхности

LEVONATHACKAE

<sup>©</sup> И. Н. Пашков, И. И. Ильина, И. В. Родин, С. В. Шокин, С. А. Таволжанский, 2008



LOROMATHREEKAR

кристаллизатора одновременно с фиксацией его в желобе с помощью обкатной ленты позволило за одну технологическую операцию получить заготовку медно-фосфорных припоев трапециевидного сечения. Для получения мерной продукции сразу после ее отделения с поверхности кристаллизатора осуществляется рубка с помощью летучих ножниц. Во избежание разрушения продукции и нарушения ее непрерывности главной задачей было достижение определенной температуры продукции в момент ее отделения с поверхности диска-кристаллизатора. Данная задача решалась, с одной стороны, выбором оптимальной конструкции кристаллизатора, с другой — путем увеличения времени нахождения охлаждаемой проволоки на его поверхности. Скорость охлаждения является достаточной для формирования мелкозернистой структуры. Прутки медно-фосфорных припоев крупного сечения могут быть успешно применены вместо литых в уголок прутков, обычно получаемых на предприятиях из слитков фосфористой меди, которые трудно обеспечить достаточно прочными при диаметре менее 10 мм. Высокая производительность способа и его внешняя простота, не требующая сложного аппаратурного оформления, сделали его потенциально перспективным для массового получения проволоки (прутков) труднодеформируемых материалов в пластичном состоянии [3]. На рис. 1 приведена схема затвердевания расплава на кристаллизаторе.

Использование высоких скоростей охлаждения позволяет получить высокую химическую и микроструктурную однородность в результате равномерного распределения фаз в структуре материала. При этом хрупкие фазы (фосфиды, интерметаллиды) находятся в мелкодисперсном состоянии, что обусловливает повышенную пластичность получаемой продукции и возможность дальнейшей ее обработки для придания необходимой формы, например, круглой проволоки с калиброванными геометрическими размерами. При пайке такими припоями образуется однородная микроструктура соединения без пор и раковин, что в свою очередь способствует улучшению качества паяного соединения.

По сравнению с традиционными способами обработки материалов давлением, быстрая закалка из расплава менее чувствительна к составу сплава, что позволяет получать довольно широкий спектр композиций припоев заданной геометрии.

Исследованы процессы получения проволоки из сплавов медь-фосфор, медь-фосфор-олово, медь-цинк-фосфор-никель на основе системы медь-фосфор и сплавов медь-цинк-олово, медьцинк-марганец на основе системы медь-цинк. Исследования на микроанализаторе электронного микроскопа «Jeol 6400» показали, что в результате высоких скоростей охлаждения достигается метастабильное состояние структуры с размером зерна менее 10 мкм. Металлографический анализ припоя П14 указывает на то, что структура представляет собой квазиэвтектику и состоит из пересыщенного твердого раствора с распределенными фазами фосфида меди (рис. 2).

Благодаря мелкодисперсному состоянию фосфидов и равномерному характеру их распределения проволока и лента припоев на основе этой системы имеют повышенные пластические свойства, например, проволока припоя П14 выдерживает гиб с перегибом на 180° несколько раз.

Перспективными материалами с точки зрения замены серебряных припоев в процессах пайки сталей и сталей с медью являются припои П21



Рис. 2. Микроструктура припоя П14 (медь-фосфор-олово) в литом состоянии, ×200 (*a*) и после закалки на дискекристаллизаторе, ×400 (б)

на основе системы медь-цинк-олово и припой П47 на основе системы медь-цинк-марганец. Указанные сплавы, вследствие наличия в них легирующих элементов, относятся к многофазным латуням. В литом состоянии они отличаются низкой пластичностью и трудно поддаются обработке давлением. Интерес к этим припоям обусловлен их относительно низкими температурами плавления, а следовательно, и пайки по сравнению с обычно используемыми латунями. Это важно при пайке сталей с медными сплавами, сталей, где нежелателен нагрев выше 900°С, а также при изготовлении твердосплавного инструмента.

Быстрая закалка из расплава позволила получить эти материалы в виде проволоки и ленты с повышенной пластичностью в результате образования метастабильной структуры [5]. Как видно из рис. 3 и данных рентгеноструктурного анализа, припой П21, полученный высокоскоростным затвердеванием расплава, имеет однофазную структуру β-латуни в отличие от трехфазной в литом состоянии.

Припой П21 имеет сложный состав из более чем пяти компонентов. Его основой является сплав медь–цинк–олово, который в литом состоянии имеет структуру, состоящую из трех фаз: α-, β- и γ-латуней. Основной вклад в придании хрупких свойств сплаву вносит наличие  $\gamma$ -латуни. После горячего прессования указанного припоя в процессе получения прутков диаметром 3 мм в результате термического воздействия при температурах около 600 °С и деформации материала удается получить двухфазную латунь, в которой, однако, остается присутствие хрупкой  $\gamma$ -фазы. Высокоскоростное затвердевание расплава (ВЗР) позволило зафиксировать область, в которой данный сплав имеет однофазную структуру  $\beta$ -латуни, что и определило более высокие пластические свойства припоя по сравнению с горячепрессованным и литым состоянием.

Как уже отмечалось ранее, быстрая закалка приводит к образованию неравновесной структуры с пересыщенными твердыми растворами, при этом структура отличается анизотропией роста кристаллов из-за одностороннего охлаждения в процессе получения припоя методом ВЗР. Пластифицирование проволоки припоя в этом случае возможно путем использования гомогенизирующих отжигов, которые приводят к перераспределению элементов без заметного роста зерна.

Преимущество быстрой закалки для данного типа сплавов заключается в том, что проволока или лента заданных размеров получается за одну технологическую операцию. При этом для быс-



Рис. 3. Микроструктура припоя П21 на основе системы медь–цинк–олово в литом состоянии, ×200 (*a*); горячепрессованном, ×800 (*б*) и после высокоскоростного затвердевания расплава, ×800 (*в*)

ACTOMATICHECKAR

#### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



Рис. 4. Микроструктура припоев ПМФОЦр6-4-0,03 и П14 после ВЗР, ×500

трой закалки характерно то, что поверхность продукции отличается низким содержанием оксидных пленок, а это в дальнейшем позитивно влияет на процессы пайки, особенно при предварительном внесении припоя в зону образования шва.

Продукцию, полученную методом ВЗР и отличающуюся специфичностью формы сечения, можно считать полуфабрикатом для производства калиброванной проволоки круглого сечения, а также проволоки, имеющей продольный паз по длине для заполнения флюсом или пастой на его основе. При этом деформацию проволоки можно проводить традиционными способами обработки сплавов давлением, как, например, волочением или фасонной прокаткой.

Комплекс проведенных в ЗАО «АЛАРМ» исследований позволил создать базовые прогрессивные технологии (совмещающие метод ВЗР, непрерывное и полупрерывное литье, волочение при необходимости совместно с флюсованием) и оборудование для производства прутков, лент, проволочных полуфабрикатов некруглого сечения, круглой калиброванной проволоки ( с флюсом и без флюса) широкого сортамента. Проволока поставляется диаметром 0,3...3,0 мм; прутки с приведенным диаметром 1,6...6,0 мм и лента толщиной 0,4...1,0 мм и шириной 10...40 мм.

Разнообразие марок и широкая гамма сортамента припойной продукции позволили значительно расширить возможности использования труднодеформируемых припоев в различных областях промышленности и при разных способах пайки. Возможность изготовления длинномерной пластичной продукции, в том числе и малых сечений, позволяет получать закладные элементы для автоматических и механизированных способов пайки, что значительно снижает неоправданное использование дефицитных серебряных припоев.

Уникальные возможности метода ВЗР позволили скорректировать состав припоя ПМФОЦр 6-4-0,03 системы Cu–P–Sn, легированный для обеспечения процесса горячего прессования и лучшей проработки структуры малыми добавками циркония [6].

Как показало исследование, микроструктура припоев ПМФОЦр 6-4-0,03 и П14, полученных методом ВЗР, не различается. Она представляет собой квазиэвтектику и состоит из пересыщенного твердого раствора фосфора в меди с равномерно распределенными в нем дисперсными частицами фосфида меди (рис. 4). Такая структура обусловливает повышенную пластичность получаемой продукции и возможность дальнейшей ее обработки для придания необходимой формы, в том числе для закладных элементов. Проволока и лента припоев П14 и ПМФОЦр6-4-0,03 выдерживают гиб с перегибом на 180° несколько раз, в несколько раз увеличиваются значения б при растяжении проволок, полученных методом ВЗР по сравнению с показателями прессованных прутков.

Значение  $\sigma_{\rm B}$  для припоя П14 (МФ06-4) в быстрозакаленном состоянии соответствует 670, а для прессованного припоя ПМФОЦр6-4-0,03 — 460 МПа, а значение  $\delta$  — соответственно 7,0 и 1,7 %.



Рис. 5. Микроструктура паяного соединения меди с медью (×500): прессованным прутком ПМФОЦр6-4-0,03 (медь-шов) (*a*) и быстрозакаленным припоем П14 (медь-шов-медь) (*б*)

ADVOMAULTUCKAR

#### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Высокая химическая и структурная однородность, дисперсность структуры, низкое содержание оксидных пленок на поверхности припоев, изготовленных методом ВЗР, способствуют получению однородной и мелкозернистой структуры паяного шва с меньшим количеством пор, раковин и других дефектов, что положительно сказывается на механических характеристиках соединений.

Более низкое качество поверхности литых и прессованных прутков вызывает загрязнение металла паяного шва шлаками и приводит к образованию пористости, а более грубая структура прессованных прутков — получение более грубой структуры металла шва (рис. 5, а) по сравнению со структурой, получаемой с помощью припоя, изготовленного методом ВЗР (рис. 5, б). Таким образом, как показал металлографический анализ, микроструктура паяного шва, ее дисперсность определяются при равных условиях пайки плотностью, чистотой поверхности, дисперсностью структуры припоя в состоянии поставки и не зависят от наличия в его составе циркония. Полученные нами данные хорошо согласуются с известными результатами исследований положительного влияния аморфной и микрокристаллической структуры припоев разных систем на структуру и свойства паяных соединений [1, 7].

Быстрозакаленные припои вместо серебряных припоев ПСр45, ПСр40, ПСр29,5, ПСр15, ПСрФ5-5 применяют в производстве бытовых холодильников (медные и стальные трубопроводы хо-лодильных агрегатов), теплообменной аппаратуры, инструмента, приборостроении (в том числе соединения из латуни и сочетании латуни со сталью (припой П81)), энергетическом машиностроении, электротехнической промышленности и т. д.

- Аморфные ленточные припои для высокотемпературной пайки. Опыт разработки технологии производства и применения / Б. А. Калин, В. Т. Федотов, О. Н. Севрюков и др. // Свароч. пр-во. — 1996. — № 1. — С. 15–19.
- Сверхбыстрая закалка жидких сплавов: Сб. науч. тр. / Под ред. Г. Германа. — М.: Металлургия, 1986. — 375 с.
- Научные предпосылки и практика производства метастабильных материалов / В. А. Васильев, А. А. Лозован, И. Н. Пашков и др. — М.: РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2002. — 204 с.
- Высокоскоростное затвердевание расплава / В. А. Васильев, Б. С. Митин, И. Н. Пашков и др. — М.: СП «Интермет Инжиниринг», 1998. — 395 с.
- 5. Быстрозакаленные проволока и лента бессеребряных припоев: новые аспекты производства и применения. Роль процессов пайки в создании новой техники. Ч. 2 / И. Н. Пашков, И. И. Ильина, С. В. Шокин и др. М.: ЦРДЗ, 1996. С. 46–57.
- 6. Влияние микролегирования цирконием системы медьфосфор-олово и технологии производства на структуру и свойства припоев ПМФОЦр6-4-0,03 и П14, а также паяных ими соединений / И. Н. Пашков, И. И. Ильина, С. В. Шокин, И. В. Родин // Пайка, современные технологии, материалы, конструкции, опыт эксплуатации паяных конструкций: Материалы конф. — М.: ЦРДЗ, 2003. — С. 86–92.
- 7. Влияние структурного состояния припоя на физико-механические свойства паяных соединений / Б. А. Калин, А. Н. Плющев, В. Т. Федотов и др. // Свароч. пр-во. — 2001. — № 8. — С. 38–41.

Methods for production of rapidly quenched brazing filler metals in the form of 0.3...6.0 mm diameter wires of hard-to-deform materials in a plastic state are considered. As a result of quenching, the compositions of brazing filler metals based on Cu-P, Cu-P-Sn, Cu-Zn-P-Ni, etc. acquire a quasi-eutectic structure consisting of oversaturated solid solution with distributed copper phosphide phases. Examples of application of the rapidly quenched brazing filler metals are given.

LEVENERALE

Поступила в редакцию 17.01.2008

## ХАРАКТЕРНЫЕ ДЕФЕКТЫ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ТОНКОЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ И ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

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

Рассмотрены характерные дефекты, образующиеся в швах при сварке трением с перемешиванием тонколистовых (1,8...2,5 мм) алюминиевых сплавов. Исследовано влияние основных параметров процесса сварки и различных технологических факторов на образование этих дефектов. Установлены основные причины возникновения несплавления, грата и перегрева металла на лицевой поверхности металла швов, образования несплавления в корневой части швов и формирования дефектов в виде несплошностей в центральной их части. Разработана конструкция инструментов и определены диапазоны изменения основных параметров процесса, позволяющие получать сваркой трением с перемешиванием качественные сварные соединения тонколистовых алюминиевых сплавов.

ADDOMATHREERAE

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, алюминиевые сплавы малой толщины, сварное соединение, дефекты швов, несплавление, перегрев, грат, несплошности, предотвращение дефектов

Сварка трением с перемешиванием (СТП) широко применяется во многих странах мира для изготовления различных конструкций из алюминиевых сплавов [1–5]. Получение неразъемных соединений при СТП происходит в твердой фазе без расплавления основного металла, что позволяет избежать образования горячих трещин в швах, снизить степень разупрочнения сварных соединений и уменьшить уровень остаточных напряжений и деформаций в сварных узлах, тем самым повышая их эксплуатационные характеристики и ресурс [6–9].

Однако условия формирования и качество швов существенно зависят от параметров процесса сварки и различных технологических факторов. К основным параметрам (рис. 1) относят: радиус бурта  $r_6$  и конструктивные особенности рабочих поверхностей бурта и наконечника инструмента; угол наклона инструмента Q относительно вертикальной оси; усилие прижатия F рабочего инструмента к поверхностям свариваемых деталей; глубину погружения t бурта инструмента в свариваемый металл толщиной  $\delta$  и проникновения наконечника  $l_{\rm H}$  в стык; частоту вращения  $\omega$  инструмента вокруг вертикальной оси; скорость сварки  $v_{\rm cn}$ .

Стабильность процесса формирования швов и качество сварных соединений существенно зависят также от надежности фиксации свариваемых кромок, точности их подгонки и сборки, протяженности швов, конфигурации соединений и др. Эти технологические факторы могут приводить к возникновению чрезмерно больших зазоров в стыке, депланации кромок, смещению оси стыка относительно инструмента, а также к изменению некоторых параметров процесса сварки (усилия прижатия инструмента, глубины погружения бурта или проникновения наконечника). Вследствие неправильного выбора параметров СТП или их отклонения в процессе получения соединений, а также нарушения условий сборки и фиксации кромок в швах, как правило, образуются дефекты.

Цель настоящей работы — определить основные причины появления характерных дефектов в швах при СТП тонколистовых алюминиевых сплавов, а также найти эффективные способы их предотвращения, обеспечивающие получение качественных сварных соединений.

Исследования проводили на экспериментальной лабораторной установке для СТП, позволяющей плавно регулировать скорость сварки в пределах 4...40 м/ч при частоте вращения инструмента 1420 или 2880 об/мин. Влияние параметров процесса и технологических факторов на образование дефектов в швах оценивали при сварке стыковых соединений тонколистовых алюминиевых сплавов АД31, АМцН, АМг2М, АМг6М, 1420, 1201 и 1460. Дефектность швов определяли визуально, а также с помощью металлографических исследований, выполняемых на оптическом



Рис. 1. Схема процесса СТП и его основные параметры

48

#### - ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



Рис. 2. Вид (×2) лицевой поверхности шва с дефектом типа несплавление, выполненного СТП на алюминиевом сплаве АМг6М толщиной 2 мм

микроскопе МИМ-8. Установлено, что при СТП тонколистовых (1,8...2,5 мм) алюминиевых сплавов можно выделить несколько видов характерных дефектов, возникающих по разным причинам.

Несплавление на лицевой поверхности шва. К основным причинам возникновения таких дефектов можно отнести малый диаметр бурта инструмента; большой диаметр наконечника инструмента; значительное углубление на рабочей (торцевой) поверхности бурта инструмента; недостаточное заглубление бурта инструмента в свариваемый металл; недостаточное усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей в процессе сварки; малая частота вращения инструмента; значительная скорость сварки; большие зазор в стыке и смещение оси стыка относительно инструмента; ненадежная фиксация свариваемых кромок.

Формирование шва при СТП происходит при избыточном давлении в объеме, ограниченном рабочими поверхностями инструмента и подкладкой. Металл нагревается за счет сил трения до пластического состояния и выдавливается наконечником, который вращается и перемещается вдоль стыка инструмента в освобождающийся за ним объем. В связи с этим при использовании инструмента с малым диаметром бурта или большим диаметром наконечника объема пластифицированного металла может быть недостаточно для полного заполнения освобождающегося за инструментом пространства, в результате чего на лицевой поверхности шва образуется дефект в виде несплавления (рис. 2).

Для стабилизации процесса сварки на торцевой поверхности бурта инструмента делают небольшое кольцевое углубление, обеспечивающее плавное и непрерывное перемещение пластифицированного металла и формирование качественной лицевой поверхности шва. Размер этой канавки должен быть таким, чтобы при небольшом заглублении бурта инструмента перемещающийся пластифицированный металл постоянно находился под избыточным давлением. Недостаточные заглубления бурта инструмента в свариваемый металл или усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей при сварке приводят к увеличению объема, заполняемого пластифицированным металлом при формировании шва, а следовательно, к снижению избыточного давления и образованию несплавления на лицевой поверхности шва.

Скорость сварки и частота вращения инструмента существенно влияют на тепловыделение в зоне сварки. При определенных соотношениях частоты оборотов инструмента и скорости его перемещения по стыку выделяемого при трении тепла может оказаться недостаточно для пластификации объема металла, необходимого для заполнения образуемой наконечником инструмента полости. Повысить степень пластификации металла можно за счет уменьшения скорости сварки или повышения частоты вращения инструмента.

Наличие зазора в стыке также приводит к несплавлению, поскольку объема пластифицированного металла недостаточно для заполнения дополнительного пространства между свариваемыми кромками.

При смещении инструмента относительно оси стыка формирование шва происходит в стороне. Вдоль оси стыка располагается зона термодеформационного влияния, в которой кромки сплавляются лишь на незначительную глубину или возникает дефект в виде несплавления.

Недостаточная фиксация свариваемых кромок способствует возникновению зазора между ними, смещению оси стыка, депланации кромок и нарушению условий заглубления и прижатия бурта инструмента, в результате чего на лицевой поверхности швов образуются такие дефекты.

Перегрев металла на лицевой поверхности шва. Основные причины образования этого дефекта следующие: большой радиус бурта инструмента; чрезмерное усилие прижатия инструмента; большой угол наклона инструмента относительно вертикальной оси; значительная частота вращения инструмента; малая скорость сварки; недостаточная чистота обработки рабочей поверхности бурта инструмента; загрязнение поверхностей свариваемых деталей.

Основное количество тепла, необходимое для пластификации металла в зоне сварки, выделяется при трении рабочей поверхности бурта инструмента с поверхностями свариваемых деталей и определяется из выражения [10]

$$Q = 3/4\pi (r_{\rm f})^3 F \omega \mu / v_{\rm cB},$$

где µ — коэффициент трения.

Экспериментальные исследования показали, что при использовании инструмента с большим диаметром бурта избыток выделяемого тепла может приводить к перегреву металла в зоне сварки и ухудшению качества лицевой поверхности шва (рис. 3). Образование такого дефекта возможно

#### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



Рис. 3. Вид (*a*, *e*,  $\times$ 1,25) и микроструктура (*б*, *e*,  $\times$ 125) лицевой поверхности шва, выполненного СТП на сплаве 1420 толщиной 2 мм с перегревом (*a*, *б*) и без него (*b*, *c*)

также в случае чрезмерного прижатия бурта инструмента к поверхностям свариваемых деталей и заглубления его в металл. При этом, помимо увеличения тепловыделения, приводящего к перегреву металла, на его поверхности образуются надрывы.

К нарушениям стабильности перемещающегося потока пластифицированного металла может привести увеличение угла наклона инструмента. Чрезмерное погружение бурта инструмента в задней части шва вызывает локальный перегрев металла, периодически изменяет траекторию его перемещения, способствуя формированию неравномерной лицевой поверхности шва с выступами, заглублениями и надрывами.

Соотношение скорости сварки и частоты вращения инструмента также существенно влияет на степень нагрева и уровень пластификации металла. Поэтому уменьшение скорости сварки или повышение частоты вращения инструмента могут привести к перегреву металла и ухудшить качество лицевой поверхности шва.

Для обеспечения равномерной мелкочешуйчатости на лицевой поверхности шва рабочую поверхность бурта инструмента, как правило, шлифуют или полируют. Высокая чистота ее обработки способствует плавному и равномерному перемещению пластифицированного металла. Любые заусенцы, выступы или вмятины на ней будут вызывать периодические изменения траектории перемещения металла, скорости его движения, а также объема. При этом нарушается подвижное тепловое равновесие и непрерывность течения металла, а на лицевой поверхности шва образуются дефекты в виде локальных участков перегретого металла и отдельных надрывов. К таким же последствиям приводят различные загрязнения в виде твердых частиц на поверхностях свариваемых деталей, которые, попадая под рабочую поверхность бурта инструмента, перемещаются вместе с пластифицированным металлом и вызывают в нем локальный перегрев, нарушая непрерывность его течения. В результате лицевая поверхность шва формируется неравномерно, местами возникают надрывы, вмятины, заусенцы.

Грат на лицевой поверхности шва. Такой дефект при СТП возникает вследствие наличия следующих причин: чрезмерного заглубления бурта инструмента в свариваемый металл; большого угла наклона инструмента относительно вертикальной оси; чрезмерного завышения (депланации) кромки со стороны отхода инструмента; отклонения инструмента от вертикальной оси влево или вправо относительно стыка; ненадежной фиксации свариваемых кромок.

При СТП для обеспечения качественного формирования шва рабочая поверхность бурта погружается в свариваемый металл на незначительную глубину. Чрезмерное ее заглубление приводит к вытеснению части пластифицированного металла на лицевой поверхности шва со стороны отхода инструмента (где векторы направления вращения инструмента и скорости сварки ориентированы в противоположных направлениях) в виде грата (рис. 4). Такой же дефект может возникнуть в швах при большом угле наклона инструмента относительно вертикальной оси, когда металл выдавливается буртом инструмента в задней части шва. Как правило, к образованию грата склонны пластичные материалы (АДЗ1, АМцН, АМг2М), тогда как при сварке высокопрочных алюминиевых сплавов (1420, 1201 и 1460) может одновременно происходить перегрев металла, образование надрывов и вытеснение металла на лицевой поверхности шва.

Депланация кромок также способствует образованию грата на лицевой поверхности шва. Но при завышении кромки со стороны набегания инструмента (где векторы направления вращения инструмента и скорости сварки совпадают) лишний металл срезается буртом, а грат остается толь-



Рис. 4. Вид (X1,25) лицевой поверхности шва с дефектом типа грата, выполненного СТП на алюминиевом сплаве АМцН толщиной 2 мм

ADVOMATICHERAR



#### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

ко при завышении кромки со стороны отхода инструмента.

При СТП инструмент должен быть расположен таким образом, чтобы в процессе формирования шва не происходило отклонения его от вертикальной оси влево или вправо относительно стыка, иначе при наклоне его к кромке со стороны набегания инструмента пластифицированный металл будет частично вытесняться из-под бурта и формировать грат.

Тонколистовые алюминиевые сплавы очень склонны к короблению в результате нагрева при сварке. Поэтому в случае ненадежного закрепления или фиксации кромок далеко от зоны сварки может произойти их смещение на определенном участке стыка в вертикальной плоскости. В таком случае оттесняемый буртом инструмента металл образует дефект в виде грата.

Несплавление в корневой части шва. Причинами возникновения в швах таких дефектов являются недостаточные для данной толщины свариваемого металла длина наконечника, погружение бурта инструмента в свариваемый металл и усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей в процессе сварки; большое смещение оси стыка относительно инструмента; износ наконечника инструмента в процессе сварки.

Для обеспечения надежного перемешивания металла по всей толщине свариваемых кромок и формирования качественных швов наконечник инструмента должен иметь определенную для каждой толщины свариваемого металла длину. Если наконечник инструмента проникает практически на всю толщину кромок, то выделяемого при СТП тепла и прикладываемого силового воздействия достаточно, чтобы границы раздела поверхностей свариваемых деталей приближались по размеру к межзеренным границам. Иначе в корневой части шва возникает дефект в виде несплавления (рис. 5).

Однако даже при правильном выборе длины наконечника инструмента при СТП необходимо обеспечить требуемое погружение бурта инструмента в свариваемый металл и постоянное усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей, поскольку при сварке тонколистовых материалов даже незначительные перемещения инструмента в вертикальной плоскости могут привести к несплавлению в корневой части швов. Возникновение таких дефектов возможно также при большом смещении стыка относительно инструмента. Это обусловлено очень небольшим (около 3 мм) диаметром наконечников конусообразной формы, применяемых при СТП тонколистовых материалов.

В процессе эксплуатации наконечник инструмента может изнашиваться (чаще всего в результате касания к подкладке), поэтому инструменты необ-



Рис. 5. Поперечный макрошлиф сварного соединения с несплавлением в корневой части шва (a,  $\times$ 25), полученного СТП на сплаве АМг2М толщиной 2 мм, и микроструктура ( $\times$ 300) участка шва ( $\delta$ ) в месте расположения дефекта

ходимо изготавливать из прочных и стойких к износу материалов. Оснастка должна обеспечивать высокую точность сборки стыка и перемещения вдоль него инструмента, а также надежность фиксации кромок и стабильность прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей.

Внутренние дефекты в виде несплошностей. Как показали результаты экспериментов, такие дефекты могут возникать в швах в случае перегрева свариваемого металла или при недостаточном тепловыделении для пластификации в зоне сварки необходимого для формирования шва объема металла (рис. 6).

Чрезмерный нагрев металла в зоне сварки, приводящий к оплавлению межзеренных границ со скапливающимися там легкоплавкими эвтектиками, происходит в основном по тем же причинам, что и вследствие перегрева лицевой поверхности шва металла и образования грата. Только степень перегрева металла при этом более высокая.

В случае недостаточного тепловыделения в зоне сварки не обеспечивается требуемая пластичность необходимого для формирования шва объема металла, который беспрерывно перемещается по сложной траектории в ограниченном пространстве. В результате нарушается непрерывность потока пластифицированного металла, а в шве образуются внутренние, не заполненные металлом полости. Причины их появления практически такие же, как указано выше. Они приводят к несплавлению металла на лицевой поверхности шва,



Рис. 6. Макрошлиф сварного соединения с внутренними дефектами в шве (*a*, ×25) и микроструктура металла шва в зоне дефекта, обусловленного перегревом металла (*б*, ×500) или недостаточным объемом пластифицированного металла (*в*, ×300), полученного СТП на сплаве АМг6М толщиной 2 мм

но поскольку при этом объем пластифицированного металла несколько больше, дефект наружу не выходит, а остается внутри шва.

Таким образом, в результате проведения комплекса научно-экспериментальных исследований, а также на основе данных зарубежных публикаций определены диапазоны изменения основных параметров процесса, позволяющие получать способом СТП качественные сварные соединения тонколистовых алюминиевых сплавов. Разработана конструкция инструментов с наконечниками в виде усеченного конуса. Диаметр основания наконечников должен составлять 3,2...3,6 мм, а вершины — 2,4...2,6 мм. Во избежание несплавления в корневой части шва длина наконечника должна быть равна (0,90...0,95)б, оптимальный диаметр бурта инструментов — 10...12 мм. Для обеспечения стабильности формирования швов на рабочей поверхности бурта необходимо делать коническую или полусферическую канавку. Изготавливать инструменты для СТП тонколистовых алюминиевых сплавов рекомендуется из инструментальных сталей типа Р6М5. Сварку осуществляют углом вперед при наклоне инструмента относительно вертикальной оси на 2...3°. Сила прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей составляет 5...10 кН и зависит от марки свариваемого сплава.

Смещение оси стыка относительно инструмента при сварке тонколистовых алюминиевых сплавов не должно превышать 0,5 мм. Зазор между кромками допускается не более 0,3 мм. Завышение кромки со стороны набегания инструмента не должно составлять более 25 %, а со стороны его отхода — 5 % толщины свариваемого металла. В связи с этим в процессе сварки необходимо обеспечивать надежную фиксацию свариваемых деталей поближе к стыку, а впереди инструмента размещать прижимной ролик, препятствующий короблению кромок при сварке.

Получить качественные сварные соединения при соблюдении всех выше перечисленных условий можно только в определенных диапазонах изменения частоты вращения и скорости перемещения инструмента, которые могут быть довольно широкими для пластичных низколегированных сплавов или более узкими для высокопрочных сложнолегированных сплавов. Как правило, для исследованматериалов частота толщин вращения ных инструмента составляет 1000...3000 об/мин, а скорость сварки — 4...40 м/ч. В зависимости от марки свариваемого сплава и предъявляемых к сварному соединению требований необходимо экспериментальным путем определять оптимальные частоту вращения и скорость перемещения инструмента вдоль стыка.

- 1. Norlin A. A century of aluminium a product of the future // Svetsaren. — 2000. — № 2. — P. 31–33.
- Weman K. Equipment for aluminium welding // Ibid. P. 11–13.
- Kallee S. W., Devenport J., Nicholas E. D. Railway manufacturers implement friction stir welding // Welding J. 2002. — № 10. — P. 47–50.
- Arbegast W. Friction stir welding after a decade of development // Ibid. — P. 28–35.
- Friction stir welding flies high at NASA / J. Ding, R. Carter, K. Lawless et al. // Ibid. — 2006. — № 3. — P. 54–59.
- Defalco J. Friction stir welding VS. Fusion welding // Ibid. — P. 42–44.
- Okamura H., Aota K., Ezumi M. Friction stir welding of aluminum alloy and application to structure // J. Jap. Institute of Light Metals. 2000. № 4. P. 166–172.
- Lanciotti A., Vitali F. Characterisation of friction stir welded joints in aluminium alloy 6082-T6 plates // Welding Intern. — 2003. — № 8. — P. 624–630.
- 9. *Ericsson M., Sandstrom R.* Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds and comparison with MIG and TIG // Intern. J. Fatigue. 2003. № 25. P. 1379–1387.
- Okamura H. Point of application for FSW // Welding Techn. — 2003. — № 15. — P. 60–69.

Characteristic defects formed in friction stir welds on aluminium alloy sheets are considered. The effect of main welding process parameters and different technological factors on formation of these defects was studied. Basic causes of lacks of fusion, formation of flash and overheating of metal on the top surface of the weld metal, as well as lacks of fusion in the root part of the welds and formation of defects in the form of discontinuities in their central part were established. Designs of the tools were developed, and ranges of variations in the main process parameters were determined, providing sound friction stir welded joints on aluminium alloy sheets.

LEROMATHREEKAE

Поступила в редакцию 26.01.2008

# МОДЕРНИЗИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АУЗК КОНЦЕВЫХ УЧАСТКОВ ТРУБ

В. Л. НАЙДА, А. А. МОЗЖУХИН, О. Ф. ЛОБАНОВ, В. А. ИГНАТЕНКО, Ю. А. ОЛЕЙНИК, инженеры (ГП «ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины»), И. В. ЕФИМОВ, А. П. КОПЫЛОВ, А. Ф. ЗАХАРОВ, инженеры

(ОАО «Выксунский металлургический завод», РФ)

Описаны направления совершенствования технологии автоматизации ультразвукового контроля (АУЗК) концевых участков труб большого диаметра на действующем поточном производстве. Модернизация установок для АУЗК НК 362М выполнена с использованием нового дефектоскопа типа НК 363, разработанного в ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона на базе промышленного компьютера серии АСР 4000 и пяти восьмиканальных ультразвуковых мультиплексоров USPC 3108 MBA (фирма «Socomate», Франция).

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, трубы, поточное производство, дефектоскоп, установка

В 2004 г. в ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона были разработаны, изготовлены и поставлены на ОАО «Выксунский металлургический завод» два комплекса установок НК 362 (рис. 1) для автоматизированного ультразвукового контроля концевых участков сварных труб диаметром 508...1420 мм с толщиной стенки 7...50 мм. В 2007 г. на ОАО «Выксунский металлургический завод» был поставлен модернизированный вариант этой установки НК 362М.

Установка НК 362М по сравнению с НК 362 имеет следующие отличия:

повышена жесткость монтажа блоков акустических преобразователей;

акустические блоки *А* и *Б* (рис. 2) имеют самостоятельные пневмоприводы;

возможно увеличение ширины контролируемого концевого участка до 300 мм;

изменена акустическая схема контроля и алгоритм его проведения, при котором акустические блоки всегда находятся в зените трубы, а преобразователи для контроля на наличие продольных дефектов и расслоений вынесены в отдельные блоки, щелевой способ создания акустического контакта заменен на иммерсионный;

многоканальный УЗ дефектоскоп производства НИИНК (г. Кишинев, Молдова) заменен дефектоскопом собственной разработки, выполненным с применением многоканальных УЗ плат (фирма «Socomate», Франция).

Схема контроля и пространственное расположение УЗ преобразователей показаны на рис. 2. При УЗ контроле на наличие расслоений работает только акустический блок Б. При проведении контроля на наличие расслоения и продольных трещин контроль осуществляется последовательно: контроль на наличие расслоений в течение первого оборота трубы; перемещение акустических блоков вдоль сварного шва; контроль на наличие



тоскопом собственной разработ- Рис. 1. Установка НК 362М в ТЭСЦ-4 ОАО «Выксунский металлургический завод»

© В. Л. Найда, А. А. Мозжухин, О. Ф. Лобанов, В. А. Игнатенко, Ю. А. Олейник, И. В. Ефимов, А. П. Копылов, А. Ф. Захаров, 2008

ABROMATICHERAR



Рис. 2. Схема контроля и пространственное расположение ультразвуковых (УЗ) преобразователей: *1* — пленочные широкозахватные пьезоэлектронные преобразователи (ПЭП) фирмы «Krautkramer», зона контроля 60 мм; *2* — иммерсионная ванна; *3* — наклонные ПЭП с углом ввода 45°, зона контроля 30 мм; *A*, *Б* — акустические блоки для контроля наличия соответственно продольных дефектов и расслоений

продольных дефектов в течение второго оборота трубы (акустические блоки всегда находятся в зените трубы). При обнаружении дефектов акустические блоки *А* и *Б* перемещаются на смежное кольцо и цикл контроля повторяется.

Кабина оператора установок НК 362М показана на рис. 3.

Основные преимущества нового дефектоскопа состоят в универсальности УЗ плат, позволяющей легко перенастраиваться на новую схему контроля; высокой скорости сбора и обработки данных контроля; повышенном уровне помехозащиты; высокой надежности и стабильности работы; гибком и отвечающем современным требованиям программном обеспечении.

Используемые в дефектоскопе универсальные УЗ платы фирмы «Socomate» представляют собой PCI-платы полного размера для установки в шасси промышленного компьютера и предназначены для создания УЗ дефектоскопов различной слож-



Рис. 3. Кабина оператора установок НК 362М

ности и реализации различных схем контроля. Непосредственно плата осуществляет усиление, фильтрацию и оцифровку сигнала, цифровую обработку и предварительное хранение его в памяти самой платы для дальнейшей передачи пакетами в запоминающее устройство компьютера с использованием режима DMA.

Платы серии USPC бывают следующих типов: одноканальные с генератором на борту и вынесенным генератором; многоканальные (8 мультиплексированных каналов) с общими и независимыми параметрами. Благодаря своим функциональным возможностям они позволяют осуществлять высокоскоростной сбор данных в режиме А- и С-скана и нескоростной сбор — в режиме С-скана.

Directions of improvement of the technology of automation of ultrasonic testing of end pieces on large-diameter pipes in operating mass line production are described. Upgrading is performed using a new flaw detector of NK 363 type developed at PWI EDTB based on an industrial computer of ACP 4000 series and five eight channel ultrasonic multiplexers USPC 3108 MBA «Socomate», France.

LEVOMAULTUGERAE

Поступила в редакцию 05.03.2008

### ИЗОБРЕТЕНИЯ СТРАН МИРА\*

Установка пайки волной припоя. Установка содержит устройство, вдувающее инертный газ в направлении вершины волны припоя, которая направляется соплом против движения паяемых печатных плат. Установка, кроме того, содержит ванну с расплавленным припоем и насос, нагнетающий расплавленный припой в сопло. Одна или несколько стенок сопла изготовлена из материала, смачиваемого припоем, в то время как остальные стенки изготовлены из материала, который не смачивается припоем, в результате чего волна припоя течет вдоль смачиваемых стенок в заданном направлении. Рядом с соплом может быть закреплена направляющая полоса из смачиваемого материала, выполняющая те же функции. С помощью электроэлемента производится подогрев инертного газа, который подается в виде прерывистой струи в направлении вершины волны припоя. Благодаря этому предотвращается охлаждение волны припоя инертным газом. Патент Великобритании 2418881 A1. W. Lambertus, P. Christiaan (Vitronics Soltec B. V.).

Способ и устройство для контактной сварки. Предложен способ контактной сварки с помощью устройства, содержащего управляемый источник тока, сварочные клещи с двумя электродами, которые получают электрическую энергию от источника тока, а также средства, с помощью которых электрические характеристики используют для определения полного сопротивления на электродах, причем с помощью блока управления задают по меньшей мере одну испытательную фазу. Способ отличается тем, что для определения полного сопротивления используют соотношение электрической величины, соответствующей сварочному напряжению, и электрической величины, соответствующей сварочному току, что установленное во время испытательной фазы полное сопротивление сравнивают с заданным полным сопротивлением, что при значении, которое меньше заданной величины полного сопротивления, непосредственно после этого осуществляют точечную сварку и что при превышении заданной величины дополнительно вводят фазу нагрева, которую продолжают до тех пор, пока соп-ротивление не станет ниже заданного значения, причем сварку осуществляют непосредственно после этого. Патент Германии 10334478B4. G. Koelzer, P. Puschner, D. Regner et al. (Adam Opel Ag).

Машина ультразвуковой сварки плоских деталей, проволоки или переплетенной проволочной сетки содержит волновод, передающий ультразвуковые колебания; упор и боковую деталь, которые ограничивают камеру сжатия и/или деформирования свариваемых деталей. Упор и боковая деталь синхронно перемещаются навстречу, причем вектор движения приводной детали, которая перемещает упор и боковую деталь, направлен перпендикулярно вектору перемещения упора. Патент Германии 102004028788 В4. К.-Е. Dobernecker (Stado Praezisionsteehnik Gmbh).

Способ контактной стыковой сварки оплавлением стальных рельсов. Способ включает оплавление и осадку на заданный припуск с определением усилия сдавливания при осадке. При осадке вычисляют удельное усилие сдавливания как частное от деления усилия сдавливания на площадь поперечного сечения рельса, по которому судят о тепловложении в свариваемые детали при оплавлении. Сравнивают вычисленное значение удельного усилия сдавливания с пороговым значением удельного усилия сдавливания, определенным опытным путем. При равенстве вычисленного и порогового значения удельного усилия сдавливания цикл сварки завершают. При превышении вычисленным значением удельного усилия сдавливания, порогового значения удельного усилия сдавливания определяют разность между ними, которую используют и качестве количественного показателя электрической энергии, требуемой для дополнительного ввода в сварное соединение. Вычисляют произведение указанной разности на константу С, лежащую в пределах от 0,7 до 0.85 кВт·ч·мм<sup>2</sup>/кг в зависимости от марки стали рельсов. Подают на сварное соединение напряжение и контролируют количество дополнительно вложенной электрической энергии. При достижении указанной энергией значения, определяемого произведением разности усилий сдавливания на константу С, напряжение отключают и цикл сварки завершают. Это позволит повысить качество сварного соединения за счет стабилизации нагрева деталей. Патент России 2296652С2. Д. И. Беляев, А. В. Бондарук, А. В. Гудков и др.

Способ нанесения наплавки лучом лазера. Изобретение относится к технологии нанесения наплавки лазерным лучом и может быть использовано в химическом и судовом машиностроении для увеличения коррозионной стойкости и износостойкости деталей машин и узлов, в частности судовой арматуры. Способ включает предварительный нагрев детали, формирование подслоя, получение слоя наплавки путем подачи порошка на обрабатываемую поверхность и облучения ее лучом лазера в течение 0,005...2,0 с. Предварительный нагрев детали проводят до 300...400 °С. Формирование подслоя осуществляют путем подачи на обрабатываемую поверхность металлического порошка из материала с твердостью менее HRC 30 и облучения ее лучом лазера. При получении слоя наплавки в качестве порошка используют смесь порошков материала с твердостью более HRC 60 и металлического материала с твердостью менее HRC 30 в соотношении (3-4):1 соответственно. Последующее облучение проводят лучом лазера с плотностью мощности излучения 10<sup>4</sup>...10<sup>6</sup> Вт/см<sup>2</sup> таким образом, чтобы глубина проплавления подслоя составляла 0,3...0,7 его толщины, при этом отношение толщины слоя наплавки к толщине подслоя выдерживают пределах (1-3):1. Отпуск осуществляют при температуре 300±20 °C с выдержкой в течение 1±0,2 ч с последующим охлаждением на воздухе. Техническим результатом изобретения является нанесение бездефектной износостойкой наплавки лазерным лучом на чугун и высокоуглеродистые стали. Патент России 2297310С2. А. В. Баранов, В. О. Попов, Л. П. Розовская, И. П. Попова (ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»).

Способ и машина для дуговой сварки двумя последовательно перемещаемыми электродами. Машина содержит первый и второй плавящиеся электроды, которые одновременно перемещаются вдоль разделки кромок свариваемых плит, шлифованных в сборе; первый источник питания, который подает первый ток первой низкой частоты на первый электрод и плиты, а также второй источник питания, который подает ток второй низкой частоты на второй электрод и свариваемые плиты. Каждый источник питания имеет трехфазный вход напряжения, имеющего частоту сети; выпрямитель, преобразующий входное напряжение в напряжение постоянного тока; высокочастотный инвертор, преобразующий напряжение постоянного тока в ток высокой частоты; выходной выпрямитель, имеющий положительный



<sup>\*</sup>Приведены сведения о патентах, опубликованных в реферативном журнале «Изобретения стран мира», № 4 за 2007 г.

#### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

и отрицательный контакты; связанную с контактами выпрямителя выходную переключающую сеть, которая образует пульсирующий ток низкой частоты и направляет его на сварочные электроды и свариваемые плиты, а также цепь, которая независимо регулирует частоту тока, подаваемого на первый и второй электроды, образуя токи, имеющие первую и вторую различные частоты. Патент США 7022942BB. Stava Elliot K., Peters Steven R. (Lincoln, Clobal, Inc.).

Машина для сварки трением вращающимся инструментом заготовок из высокопрочных материалов содержит вращающийся инструмент, изготовленный из жаростойкого сплава на основе вольфрама, легированного рением, позволяющим термообрабатывать сплав на твердый раствор; молибденом; танталом и ниобием. Инструмент может также содержать тугоплавкий карбид. Инструмент может быть изготовлен путем спекания порошков перечисленных металлов; путем спекания и прессования; путем спекания и горячего изостатического прессования или способом литья и прессования. Машина с таким инструментом может применяться для сварки трением высокопрочных материалов, например, сплавов никеля и титана. Патент США 7032800BB. S. P. Rawanathan, B. B. Patrick, H. E. Claude, T. T. Joseph (General Electric Company).

Способ сварки листовых заготовок из алюминия или его сплава путем сквозного проплавления лазерным лучом повышенной мощности в среде защитного газа. На листовые заготовки, установленные внахлестку, направляют излучение мощного лазера, проплавляющего заготовки на всю толщину. При этом в зоне сварки создают давление инертного газа, действующего с верхней и нижней сторон листовой сборки. Способ позволяет предотвратить образование больших сварных валиков с двух сторон сквозного сварного шва. Патент США 7022939ВВ. Ү. Takanori, Т. Masato, S. Hirobuni et al. (Honda Ginen Kogyo Kabushiki Kaisha).

Способ изготовления пленки для пайки из алюминиевого сплава и пайка узлов теплообменника. Предлагаемый способ относится к изготовлению пленки для пайки легких элементов теплообменника. Такая пленка легка в изготовлении, не склонна к проникновению базового металла в состоянии черновой стадии процесса и удобна на всех этапах процесса, включая вытяжку, придание формы и пайку. Сначала производится отливка металла на основе Al-Mn, далее осуществляется гомогенизация, плакирование этого базового металла сплавом Al-Si, предназначенным для пайки, раскатка в горячем, а затем в холодном состояниях, прокаливание посредством рекристаллизации, отверждение, изменение толщины посредством деформации, достигающей 10...40 % и последнее прокаливание такой пленки для пайки в течение 1...10 ч при 250...420 °С для того, чтобы этот продукт, подвергшийся последнему прокаливанию, не рекристаллизовался и чтобы средний размер зерен после прокаливания рекристаллизацией выдерживался в пределах 60 мкм. Патент Франции 2876606А1. S. W. Haller, G. Laliberte, A. Burger (Corus Aluminium Walzprodukte Gmbh).

Способ наплавки твердого покрытия. Твердый сплав с высоким содержанием углерода и хрома наплавляют на поверхность основы, изготовленной из высокохромистого литейного чугуна с повышенной чувствительностью к образованию трещин. Наплавку производят в два этапа. На первом этапе на поверхность основы наплавляют параллельные валики твердого сплава, находящиеся на некотором расстоянии друг от друга. На втором этапе наплавляют вторые валики, которые расположены в зазорах между первыми валиками, и перекрывают боковые стороны этих валиков. Способ позволяет уменьшить подвод тепла и снизить уровень сварочных напряжений, в результате чего предотвращается развитие мелких случайных трещин в наплавленном слое и проникновение их в металл основы. Патент Японии 3763089B2. М. Koichi, U. Keiji (Babcocu Hitachi Kk).

Порошковая проволока для сварки нержавеющей стали. Проволока диаметром 0,8...1,6 мм состоит из стальной оболочки, которая изготовлена из аустенитной нержавеющей стали, и флюса, заполняющего оболочку. Флюс, составляющий 17...26 % от массы оболочки, содержит 0,1...1,6 % (от массы проволоки) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,2...3,5 % ZrO<sub>2</sub>; 0,04...0,15 % фторида металла (в пересчете на фтор) и 0,04...0,2 % соединения калия (в пересчете на калий). Химсостав флюса определяют с помощью формулы  $X = ([F] + + [K])/[Al_2O_3 +$ ZrO<sub>2</sub>], где X — величина, удовлетворяющая неравенству  $0,025 \le X \le 0,47$ . Содержание карбоната металла  $\le 0,01$  %; суммарное содержание азота в составе флюса и оболочки ≤ 0,04 %. Проволока позволяет снизить разбрызгивание расплавленного металла в процессе сварки; хорошо сваривается на больших токах и улучшает удаление шлака после сварки. Патент Японии 3767796B2. W. Daisune, H. Hajime, M. Manabu (Nippon Steel Weld Prod).

Способ и устройство для восстановления электродов точечной сварки. Для восстановления изношенной головки электрода из меди или медного сплава используют форму, состоящую из матрицы и опорного кольца, которое окружает матрицу. В матрице вырезано отверстие, имеющее форму головки электрода. Конец электрода вставляют в отверстие матрицы и прилагают к электрода вставляют в отверстие матрицы и прилагают к электрода осевое усилие, в результате чего головка электрода принимает форму отверстия матрицы. Простой и дешевый способ позволяет многократно использовать электроды точечной сварки без снятия стружки. Патент Японии 3763813В2. Н. Nobuo, Н. Morio (Hoshi Seisaku Sho Kk).



BULETINUL INSTITUTULUI IN SUDURA SI INCERCARI DE MATERIALE -BID ISIM (Румыния) 2007. — № 4 (рум. яз.)

Cioclov D. D. Прочность и усталость наноматериалов. Ч. 3, с. 3-18.

Starke P. et al. Измерение гистерезиса, температуры и прочности для определения усталостных характеристик металлов, с. 19-30.

Grimberg R. et. al. Токовихревой метод для определения характеристик труб под давлением тяжеловодного ядерного уранового реактора, с. 31-37.

Savu S., Savu D. Новые датчики для сварочных технологий, с. 39-45.

Hiroo K. Современные требования к рельсовой стали,

Nobuhisa S., Takahiro K., Satoshi I. Требования к дефор-

мационным характеристикам трубных сталей в современном

Курс лекций по монокристаллическим материалам Sachio Shi. et al. Разработка технологий ремонта мо-

нокристаллических лопастей летательных аппаратов, с. 32-

тотных микроэлектронных механических систем, с. 38-42.

Kiyoto N. Способ соединения с применением радиочас-

Лекции для практикующих инженеров

JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY (Япония) 2007. — Vol. 76, № 6 (яп. яз.)

c. 24-27.

трубопроводостроении, с. 28-31.

Техническая спецификация

Itsuhiko S. Сварочные материалы из высокопрочной 2,25Cr-1Мо-0,25V стали, с. 3-5.

Специальный выпуск

Перспективные концепции проектирования крупногабаритных конструкций и требования к применяемым материалам

Tetsuya F., Tadao N. Стальные строительные конструкции и требования к характеристикам сварных соединений, с. 7-10.

Koutarou I. Проектирование мостов и требования к применяемым материалам, с. 11-15.

Hiroshi Shi., Kazuhiro H. Проектирование корпусов в судостроении и требования к материалам и сварным швам, c. 16–23.

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

Zech F. et. al. Новые возможности неразрушающего контроля для защиты стальных конструкций от коррозии, с. 106-110

Schmidt J. Защита стальных конструкций от коррозии предписания DIN EN ISO 14713 и DIN EN ISO 1461 по проектированию конструкций, с. 113-121.

37.

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

Springfeld P. Эргономический поворот улучшенной детали с помощью пневматического манипулятора, с. 126-129

DER PRAKTIKER (Германия) 2007. — № 11 (нем. яз.)

Schmidt J. Защита стальных конструкций от коррозии сварка оцинкованных конструкций и исправление дефектов, с. 336-340.

Zwatz R. Существенные возражения немецкой стороны против prEN ISO/DIS 9606-1:2007-05, с. 342-344. Klier R. Дуговая приварка шпилек. Ч. 1, с. 346-354.



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



Tatter U., Schmidt J. Риск при использовании некоторых сварочных спреев — не только из-за горючего рабочего газа, с. 356–358.

DER PRAKTIKER (Германия) 2007. — № 12 (нем. яз.)

Защита от сварочных брызг без нежелательных побочных влияний, с. 366–368.

Weinreich M. Встреча специалистов в 2007 г. в Базеле, с. 370–379.

Волоконный лазер — Сварка и резка от 10 Вт до 20 кВт Лазерная сварка в аппаратостроении

**Применение** импульсного Nd:YAG-лазера для соединения материалов и комбинаций материалов с особыми свойствами

**Процесс** переноса холодного металла — преимущества в промышленном применении

Расширение границ применения гибридной сварки (лазер+дуга) за счет применения подкладки под ванну и колебания дуги

Ручная лазерная сварка инструментальных сталей

Центры автоматической ЭЛС в производстве деталей автомобилей и машин

DZECLAD SDAWALNICTWA (Hornwa) 2009 No 1 (non go)

Szefner Z. Усовершенствование неразрушающих испытаний с учетом контроля качества сварных конструкций, с. 4–8.

Szymlek K., Cwiek J. Зависимость между параметрами проникновения водорода и поглощением и микроструктурой стали S355 и ее сварных соединений, с. 9–13.

**Nowacki J., Wypych A.** Ручное и роботизированное восстановление головок цилиндров судовых двигателей, с. 14–24.

RIVISTA ITALIANA DELLA SALDATURA (Италия) 2007. — Ап. LiI. — № 5 (итал. яз.)

Fersini M., Demofonti G., Sorrentino S., Mecozzi E. Кольцевая сварка газопроводов с помощью гибридной сварки волоконным лазером, с. 627–635.

**Pandolfo A.** Европейские стандарты для аттестации сварщиков и сертификации технологии подводной сварки сухим и мокрым способом, с. 637–647.

Сарраbianca С., Marracino F. Цифровой радиографический контроль, с. 649–662.

Rosellini C., Russo R., Costa L., Caruggi M., Niberto A. Вентилируемый шлем сварщика, разработанный в рамках

SCHWEISS-& PRUEFTECHNIK (Австрия) 2007. — Dezember (нем. яз.)

Giebler S., Wihsbeck M. Плазменная сварка боковых деталей рельсовых транспортных средств, с. 179–182.

SCHWEISS-& PRUEFTECHNIK (Австрия) 2008. — Janner (нем. яз.)

Fiedler M. et. al. Источник опасности «водород» при сварке нелегированных сталей, с. 3–6.

Орбитальная сварка в аппаратостроении, с. 8-9.

SCHWEISSEN UND SCHNEIDEN (Германия) 2007. — № 11 (нем. яз.)

ADVOMATICHERAR

**Hartmann Gert F.** Еврозона увеличивает свои инвестиции, с. 582–583.

Выставка роботов в Базеле 18 сентября 2007, с. 583–584. Ограниченные, но очень важные задачи специалиста по

обновлению предприятия, с. 584–585. Варка и резка в автоматизированной поточной линии

производства, с. 586–587.

ЭЛС в атмосфере смешанных соединений алюминийсталь

Значение ЭЛС для крупных литых и кованых изделий Соединение турбинных лопаток пайкой в защитном газе Резка струей воды

Сварка трением с перемешиванием тонких алюминиевых и стальных листов.

Vollrath K. Резка водяной струей больших толщин, с. 380–384.

**Klier R**. Приварка шпилек. Ч. 2. Факторы, влияние и их воздействие на результаты соединения, с. 386–390.

**Polrolniczak P., Aretz W.** Дефекты при контактной сварке и их снижение, с. 392–397.

Janssen A. Соединение пластмасс — доклады на конференции в Базеле, с. 400–406.

#### PRZEGLAD SPAWALNICTWA (Польша) 2008. — № 1 (пол. яз.)

**Zwierzchowski M.** Структура, свойства и износостойкость покрытий, нанесенных на кобальтовую основу, с. 25–30.

**Masek R.** Физические и химические свойства, а также прочность композиционных материалов BELZONA, с. 31–35.

**Olejnik G.** Резать быстро — резать дешево; режущая струя Jetex для кислородной резки, с. 36–38.

европейского проекта ECONWELD (COLL-CT-2005 516336), с. 665-671.

Cristofori A., Livieri P., Tovo R. Специальная методика цифрового трехмерного моделирования и анализа напряжений для оценки усталости сварных соединений, с. 673–680.

**Matsuyama K.** Тенденции развития автомобильной промышленности и технологий соединения, с. 683–693.

Области применения контактной сварки, с. 695–707.

Использование вихревых токов для слежения за стыком при лазерной сварке, с. 587–588.

Schaumann P. et al. Цифровое определение внутренних напряжений в однослойном стыковом шве с последующей ультразвуковой ударной обработкой, с. 590–599.

Wielage B. et al. Исследование высокоскоростного газопламенного напыления проволокой, с. 600–607.

Li J. et al. Улучшение структуры наплавленного металла при гибридно (Nd:YAG-лазер + MSG) сварке алюминиевых сплавов, с. 608-612.

SCHWEISSEN UND SCHNEIDEN (Германия) 2007. — № 12 (нем. яз.)

Hartmann Gert F. Положительный промежуточный баланс в станкостроении, с. 650-652.

Основан «Форум будущего нанотехнологий», с. 652.

Шланг для подачи проволоки «Rolliner» уменьшает трение и износ, с. 656-657.

Новое оборудование для нанесения покрытий кафедры обработки поверхности в аахенском университете, с. 658-659.

Holthaus M. et al. Применение сплющенной электродной проволоки при механизированной сварке высокопрочных мелкозернистых строительных сталей в защитном газе, c. 662-666.

Alaluss K. et al. Моделирование плазменного МИГ-процесса с целью применения на практике, с. 668-677.

Tikhomirov D. et al. Методы моделирования сварочных деформаций для автомобильной промышленности, с. 678-680.

Schambach B. Заседание комитета стандартизации МИС в июле в Дубровнике 2007 г., с. 687.

Конференция DVS, сентябрь 2007 г. Базель Швейцария:

TWI CONNECT (Англия) 2007. — Issue 151 November–December (англ. яз.)

Назад в прошлое — совсем другой сварной шов для возрожденного катера «Bluebird», с. 1-2.

Команда Британского института сварки выиграла приз за лучшие материалы и инновационные разработки, с. 2.

Волоконный лазер для сварки и резки от 10 Вт до 20 кВт Лазерные сварные соединения труба-трубная доска

Импульсный Nd: YAG-лазер для соединения материалов и комбинаций материалов с особыми свойствами

Процесс переноса холодного металла — преимущества при промышленном применении и перспективы

Горячая правка в судостроении, вагоностроении и пр.

Усовершенствование гибридного способа лазерной сварки путем применения подкладки под ванну и колебания дуги

Ручная лазерная сварка инструментальных сталей

Автоматизированное производство компонентов в автомобилестроении и машиностроении с применением ЭЛС

ЭЛС смешанных соединений алюминий-сталь в атмосфере

Значение ЭЛС для решения проблем с крупногабаритными литыми и коваными деталями

Соединение рабочих колес турбин пайкой в защитном газе, с. 689-701.

Срочный осмотр повреждения, вызванного пожаром, успокаивает заказчика, с. 3.

Проектирование. Ч. 2, с. 4-5.

WELDING and CUTTING (Германия) 2007. — № 6 (англ. яз.)

Сварка и пайка в автоматизированных производственных циклах, с. 310.

Фирма Sulzer Metco объявила о своих возможностях экспериментального распыления газом, с. 311-313.

Маленькая деталь с большим эффектом — защитное устройство от противотока газа и обратного удара пламени, c. 314–318.

Опытно-конструкторская разработка концепции внедорожника, с. 319-321.

Johnsen M. R. Строительство нового завода по изготовлению цистерн в Александрии, Луизина, с. 32-37.

Cannell G. R. Безопасные контейнеры для радиоактивных материалов, с. 38-40.

Steadham D. Принятие необходимых решений перед автоматизацией, с. 43-44.

Crockett D. D. Американское сварочное общество добавляет два варианта к классификации для дуговой сварки под флюсом, с. 46-48.

Yang Y. K., Kou S. Макросегрегация на границе сплавления сварных швов Al-Cu с использованием разнородных металлов, с. 331-339.

Alves de Oliveira M., Dutra J. С. Электрическая модель процесса гибридной сварки плазма-МИГ, с. 324-328.

Xueqin L. et al. Контроль мобильного робота для автоматического нахождения сварного соединения, с. 334-338.

Cramer H. et al. Расчет и измерения остаточных напряжений в алюминиевых сварных соединениях, с. 342-347.

Vollner G. et al. Потенциальные возможности сварки трением с перемешиванием с использованием примера из авиационной промышленности, с. 348-351.

WELDING JOURNAL (США) 2007. — Vol. 86, № 11 (англ. яз.)

Sigler D. R. et al. Сульфидная коррозия паяных соединений медь-серебро-фосфор в сварочных трансформаторах, с. 340-348.

Malene S. H. et al. Реакция на экзотермическую добавку в электрод для дуговой сварки порошковой проволокой. Ч. 2, c. 349-359.

Nguyen T. C. et al. Прерывистый дефект валиков швов, наплавленных высокоскоростной дуговой сваркой плавящимся электродом, в среде защитного газа, с. 360-372.

ZVARANIE — SVAROVANI (Словакия) 2007. — Roc. 56, № 9 (словац. яз.)

ADVOMAULTUCKAR

Hobbacher A. F. et al. Уровни качества сварных швов согласно ISO и их влияние на пригодность к эксплуатации сварных компонентов, с. 243-249.

Kalna K. Требования к качеству сварных соединений в соответствии со стандартами и оценка дефектов с помощью подхода «пригодности к эксплуатации», с. 250-259.

Galazzi G. et al. Применение технологии наплавки лентой фирмы ЭСАБ, с. 254-259.



### ПОЗДРАВЛЯЕМ ЛАУРЕАТОВ ПРЕМИИ им. Е. О. ПАТОНА!

На Общем собрании НАН Украины 17 апреля 2008 г. были подведены итоги по оценке результатов научных достижений за 2007 г. Там же состоялось торжественное вручение наград и премий имени выдающихся ученых Украины. В частности, Премии имени Е. О. Патона был удостоен коллектив сотрудников отдела физико-химических процессов пайки ИЭС им. Е. О. Патона: чл.-кор. НАН Украины, д-р техн. наук, проф., заведующий отделом В. Ф. Хорунов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ведущий научный сотрудник С. В. Максимова, мл. научный сотрудник О. М. Сабадаш за цикл работ «Припои и технологические процессы пайки перспективных материалов».

Известно, что пайка является одним из способов соединения материалов, который наиболее динамично развивается в последние годы. Это обусловлено, с одной стороны, стремительным развитием отраслей промышленности, в которых пайка доминирует (электроника, авиа- и ракето-, газотурбостроение, производство теплообменной аппаратуры и др.). С другой, введением в промышленное использование новых материалов, которые, как правило, не могут быть соединены с помощью сварки плавлением, и пайка является основным способом получения неразъемных соединений.

Авторы представили результаты фундаментальных и прикладных исследований по созданию припоев и технологии пайки перспективных сплавов на основе интерметаллидных соединений, высоколеги-



рованных жаропрочных никелевых и дисперсно-упрочненных сплавов и др., а также узлов и конструкций из традиционных материалов для работы в экстремальных условиях эксплуатации (установка термоядерного синтеза, газотурбинные двигатели, криогеника, теплообменная аппаратура различного назначения и др.). На основе полученных результатов выбраны оптимальные составы сплавов для пайки перспективных материалов, разработана технология получения ответственных конструкций. Оригинальность разработок и эффективность достигнутых результатов проведенных исследований подтверждается полученным патентом США и испытаниями узлов и изделий в сложных условиях эксплуатации.

Редколлегия и редакция журнала

УДК 621.791:061.2/.4

### МЕЖДУНАРОДНЫЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВЫСТАВКИ «СВАРКА И РЕЗКА» И «ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ. ПОКРЫТИЯ»

A BROMATHINGRAD

25–28 марта 2008 г. в Минске (Республика Беларусь) на территории выставочного комплекса «Белэкспо» были проведены 8-я Международная специализированная выставка «Сварка и резка» и международный специализированный салон «Защита от коррозии. Покрытия». Организатор выставок — ЗАО «Минскэкспо» при поддержке Национальной академии наук Беларуси, ГНПО порошковой металлургии и ОХП «Институт сварки и защитных покрытий». Информационную поддержку оказывали специализированные журналы «Сварщик в Белоруссии», «Сварщик» (Украина), «МеталлИнфо», «Материально-техническое снабжение», «РИТМ» (Россия), «Бизнес-Мост» (Украина), «Цены и товары сегодня», «Оптом и в

розницу», «Бизнес-Инфо», газеты «Международный клуб», «Бизнес-регионы», «Бриг Экспо» (Россия), «Коммерсант Белоруссии», «КоммерсантЭкспо», «Белорусы и рынок».

В экспозиции были представлены 80 организаций, предприятий и фирм из Республики Беларусь, Российской Федерации, Украины, Китая, Литвы, Турции, Финляндии, Франции, ФРГ, Швейцарии. От Республики Беларусь экспозиции имели: ООО «Оливер», ЧПТУП «ВнешИТС», ОДО «БелСваМо», ЧТУП «Алви-Торг», ПТЧУП «ЛДМ», ЗАО «Объединенная сварочная компания», ОДО «Атлас-Инвест», УП НПО «Центр», ЗАО «НГК Силовые компоненты», ЗАО «Машагропром», ЧУП «Плазматехинструмент», ОДО «Техносварка», СООО «АДВ-Гарант», СП ООО «Белфин» и др. С фундаментальными и прикладными исследованиями в области сварки и защитных покрытий можно было ознакомиться на стенде ГНПО порошковой металлургии. Среди постоянных зарубежных участников представители Украины: ОАО «Каховский завод электросварочного оборудования», ОАО «Зонт», ОАО «ПлазмаТек», НПП «Техмаш»; российские компании: ООО Торговый Дом «ЛЭЗ», Торговый Дом «Межгосметиз», ОАО «Металлургический завод «Электросталь», Государственный Рязанский приборостроительный завод, Санкт-Петербургский электродный завод и другие; ведущие компании из Литвы: «ВМТС» и «Atotex-Chemeta». Сварочное оборудование финской фирмы «Кетррі ОУ» представлял их партнер ОДО «Кемфин». Сварочное оборудование экспонировали также и две китайские фирмы: «Advanced Technology & Materials Co.Ltd.», «Wuxi Hanshen Electric Co.Ltd.».

Специализированный салон «Защита от коррозии. Покрытия» был проведен во второй раз. Участие в нем приняли производственные и торговые предприятия, а также научные учреждения и инновационные ассоциации. Этот выставочный салон дал возможность сконцентрировать в одном месте экспозиции материалов, технологий и оборудования для комплексного решения проблем защиты от коррозии, повышения надежности и срока службы механизмов и сооружений, придания им специальных свойств, таких, как, например, повышенная прочность, износостойкость, термостойкость, электробезопасность и пр.

В рамках выставки были проведены: республиканское совещание главных сварщиков и специалистов министерств и предприятий «Состояние и пути развития сварки в Республике Беларусь» (было представлено 18 докладов), международный симпозиум «Сварка и родственные технологии» (было представлено 20 докладов). Организатором этих форумов выступил Институт сварки и защитных покрытий ГНПО порошковой металлургии.

В третий раз был проведен конкурс «Мисс Сварка-2008». Победительницей стала Ольга Шут (фирма «БассантТорг», Минск).

К выставке был проявлен большой интерес со стороны специалистов машиностроения, строительной индустрии и учебных заведений. По сравнению с предыдущей выставкой и участников, и посетителей на этой выставке было больше. Контингент посетителей составляли в основном ведущие специалисты и руководящий состав предприятий и организаций среднего возраста. Прослеживался интерес посетителей к высоконадежному сварочному и резательному оборудованию, к сложным и эффективным технологиям сварки, реновации и упрочнения, к высококачественным сварочным и наплавочным материалам общего и специального применения, новым методикам подготовки высококвалифицированных инженеров-сварщиков и практиковсварщиков, к специализированной литературе по сварке и родственным технологиям (книгам и журналам).

В целом выставка была хорошо организована и получила положительную оценку посетителей и экспонентов.

А. А. Кайдалов, д-р техн. наук

УДК 621.791:061.2/.4

### ВЫСТАВКА «СВАРКА. РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — 2008» В КИЕВЕ

7-9 апреля 2008 г. в выставочном центре «КиевЭкспоПлаза» прошли выставки ПА-ТОН ЭКСПО, объединившие такие экспозиции, как «Сварка. Родственные технологии», «Трубопроводный транспорт», «Неразрушающий контроль», «Защита от коррозии». «Промышленная экология». «Крепления и инструменты», «Измерения. Лабораторное оборудование», организатором которых выступил Центр трансфера технологий ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины при поддержке Общества сварщиков Украины, НАК «Нефтегаз Украины», Ассоциации «ОКО», Ассоциации промышленного арматуростроения Украины, Ассоциации Открытие выставки











Фрагменты рабочих моментов выставки

производителей и строителей полимерных трубопроводов Украины.

Всего в рамках выставки свои достижения экспонировали 48 участников из Украины, России, Литвы, Италии, Чехии. Среди них ИЭС им. Е. О. Патона, ОКТБ Института, два опытных завода (ОЗ-СО и ОЗСМ), НТЦ «СЕПРОЗ», Межотраслевой учебно-аттестационный центр, известные производители оборудования для сварки, резки и пайки — «КЗЭСО» — (г. Каховка), фирма «СЭЛМА» (г. Симферополь), «Фрониус-Украина» (Киевская обл.), «Коммунар» (г. Харьков), «СиМЗ» (г. Сим-



ферополь), «ДОНМЕТ» (г. Новокраматорск), «ГРПЗ» (г. Рязань), «Зонт» (г. Одесса), производители сварочных материалов «Опытный завод сварочных материалов» ИЭС (г. Киев), «Лосиноостровский электродный завод» (г. Москва), «Торговый дом Межгосметиз» (г. Мценск), «Плазматек» (г. Винница), «Anykscin Varis» (г. Аникщяй). Значительную долю экспозиций выставки занимали представительства известных мировых брендов в области сварочного производства (ESAB, Lincoln Electric, Kemppi, Boehler, Abicor Binzel, Weldoterm и др.) — ООО «ЭСАБ» в Украине, «Бинцель Ук-





«ДОНМЕТ» традиционно демонстрирует свою продукцию на открытой площадке

раина», «Велдотерм-Украина», «Интерхим-БТВ», «Вистек» и др. Еще большее количество стендов занимали торгующие организации — «Абпланалп Украина», «Авдекс», «АВЦентр», «Дары природы», «Девелд», «Идель», «Индустриальный метизный союз», «Линкольн Электрик Европа», «Мигатех», «Русо», «Сварком» и др. Отрадным является факт, что впервые на специализированных выставках Украины сразу четыре фирмы — «НАВКО-ТЕХ», «Фрониус Украина» и «АББ – АВВ» (все г. Киев и Киевская обл.) демонстрировали роботехнические сварочные комплексы, включающие роботы таких известных фирм, как «Фанук», «Кавасаки», «ПА-НАСОНИК». Это несомненно обусловлено возрастающим интересом промышленности Украины к вопросам автоматизации производственных процессов.

Достижения итальянских предприятий были представлены на стенде «Міра Italy» (производство оборудования для дуговой сварки и термической резки, нержавеющей и алюминиевой сварочных проволок и прутков, а также порошковых проволок).

Чехия была представлена компанией «MGM» — производителем плазменных и газокислородных машин термической резки. Характерно, что все они комплектуются системами удаления обработанных газов. Она же демонстрировала свою новую разработку — ультразвуковую установку для сварки солнечных элементов.

В период работы выставки состоялась конференция Общества сварщиков Украины на тему «Пути развития сварочного производства Украины в связи с вступлением во Всемирную Торговую Организа-



Директор КЗЭСО Я. И. Микитин знакомит посетителей выставки с производимым на заводе оборудованием

цию», а также прошли заседания ряда секций конференции по неразрушающему контролю.

В рамках ПАТОН ЭКСПО представительной (15 стендов) выглядела экспозиция фирм и компаний, работающих в области неразрушающего контроля и технической диагностики. Среди них «Изотоп», «Научно-производственный диагностический центр», Ассоциация «ОКО», «Ультракон», представительство америанской фирмы «National Instumints» (г. Киев), «Интрон» (г. Одесса), «Машиностроение» (г. Днепропетровск), «Оlympus Moskow» (г. Москва), а также торгующие организации — «Киевпроминвест», «Онико», «Пергам», «Твема» (г. Киев), «Сперанца» (г. Желтые воды).

В целом выставка продемонстрировала современное состояние сварочного производства и тенденции в разработке и производстве широкого спектра оборудования и материалов различного назначения. В одном из ближайших номеров журнала «Автоматическая сварка» планируется опубликовать аналитический обзор состояния разработок и производства источников питания для дуговой сварки, в представленных и в экспозициях настоящей выставки.

В заключение следует отметить, что ежегодная выставка «Сварка. Родственные технологии» уже традиционно является основной профильной выставкой в Украине. За три дня работы наблюдалось активное ее посещение многочисленными специалистами подразделений, ведомств, институтов и компаний из многих регионов Украины.

LEROMATICHECKAE

В. Н. Липодаев, д-р техн. наук, А. Т. Зельниченко, физ.-мат. наук хроника

### ПАМЯТИ В. М. КАРПЕНКО

LOROMATHRECKAR



2 мая 2008 г. ушел из жизни известный ученый в области наплавки и разработки сварочных материалов, заведующий кафедрой сварочного производства Донбасской государственной машиностроительной академии, профессор, академик Академии инженерных наук Украины Владимир Михайлович Карпенко.

В. М. Карпенко родился 27 января 1935 г. в селе Новопарофеевка, Кегичевского района, Харьковской области. В 1947 г. семья переехала в Краматорск, где он закончил школу. В 1953 г. поступил в Харьковский государственный университет, после окончания которого с отличием в 1958 г. был направлен на работу в НИИПТМаш г. Краматорска. С 1958 по 1967 гг., работая в этом институте, прошел путь от рядового инженера до старшего научного сотрудника отдела сварки, занимаясь исследованиями остаточных деформаций сварных конструкций и разработкой сварочных материалов. В 1967 г. поступил в аспирантуру, а в 1970 г. после досрочной защиты был оставлен на кафедре сварочного производства в должности старшего преподавателя, а с 1971 г. — доцента Краматорского индустриального института (ныне ДГМА). С 1977 г. с небольшим перерывом возглавлял кафедру сварочного производства. Научная школа, созданная под его руководством, позволила подготовить восемь кандидатов технических наук, а два его ученика защитили докторские диссертации. Им лично и в соавторстве опубликовано более 120 статей, получено свыше 230 авторских свидетельств СССР и 11 патентов Украины.

В 1981 г. В. М. Карпенко назначается проректором по научной работе, а в 1989 г. первым проректором и проректором по учебной работе ДГМА. На проректорских должностях он проработал до 1997 г., после чего все силы и кипучую энергию отдает любимой кафедре. В 2004 г. решением ВАК Украины ему присвоено звание профессора.

За многолетнюю плодотворную работу он был награжден Орденом «Знак Почета», бронзовой медалью участника ВДНХ СССР и выставки достижений народного хозяйства Украины, грамотами и знаками отличия Министерства образования и науки Украины.

Светлая память о Владимире Михайловиче надолго сохранится в сердцах его учеников, в сердцах тех, кто знал и работал с ним.

> Институт электросварки им. Е. О. Патона, редколлегия журнала «Автоматическая сварка», коллектив Донбасской государственной машиностроительной академии



# OAO "3OHT"

ПРОИЗВОДСТВО: машин филурной газокислородной резки «АСШ-70М» машин для пикроплазменной резки «Комета М; машин для гидроабразивной резки «Марина; машин для сидроабразивной резки «Марина; машин для сидроабразивной резки турз; переносных газорежущих машин «Радуга; насосов, теплообменников и запасных частей для кристенной техники. ПОСТАВКА источников плазменной резки КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТИ МОЛЕРНИЗАЦИЯ машин для термической резки металла.

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

Ф. +38 (048) 715-69-50 WWW.AUTOGENMASH.COM

ОАО "ЗАПОРОЖСТЕКЛОФЛЮС"

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

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

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

Продукция завода сертифицировния в УкрСЕПРО, Системе Российского Морского регистра судоход, ства, Госстандартом России, TUV Nord.

> Фаюсы сварочные • ГОСТ 9087-81 • ТУ У 05416923.049-99 • ГОСТ Р 52222-2004 •

◊ АН-348А ◊ АН-348АМ ◊ АН-348АП ◊ АН-348АД ◊ • АН-47 ◊ АН-47Д ◊ АН-47АП ◊ ОСЦ 45 • АНЦ-1А ◊ АН-60 ◊

ADDOMATINGCERAE

0

Г

E

H

Μ

А

#### ИНФОРМАЦИЯ ·



### 000 «ЦЕНТР ПРОМЫШЛЕННОЙ Диагностики и контроля»

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

- контроль качества сварных соединений РГК, УЗК, ВИК. ЦД. МПД. герметичность, стилоскопирование, замер твердости, механические испытания и лабораторные исследования;
- термообработка сварных соединений радиационным и индукционным методом;
- → геодезическое обеспечение монтажно-строительных работ;
- аттестация персонала по контролю качества сварных соединений на АЗС.

«Центр» имеет все разрешительные документы и лицензии, необходимые для предоставления данных услуг на объектах НАЗК — Знергоатом и Госнадзорохрантруда.



# вамрытовакимонернововщество

### производство:

Флюсы сварочные

Проволоки порошковые аля внелечной

обработки металлургических расплавов

Проволоки порошковые для сварки, наплавки,

ппровальнотока в внионитон

Электроды наплавочные, специального назначения,

для сварки чугуна презки

Ферросплавы п плгатуры

Хром металлический

Комплексные раскислители и модификаторы

ул. Курсантская, 1 г. Днепропетровск 49051, Украина Тел.: (380562) 35-50-25 Тел./факс: (380562) 35-19-41 6-mail: sp@spetssplav.dp.ua

ADDOMANTIMERIAL

# **МЕСАГІІ** стабильность формы

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

MEGAFIL<sup>®</sup>: Продукция компании Дратцуг Штайн — наша серия бесшовных изделий, включая также высококачественные порошковые проволоки TOPCORE<sup>®</sup>н MECUFIL<sup>®</sup>.



Drahtzug Stein D-67317 Altleiningen Tel: +49(0) 6356 966-0 Fax: +49(0) 6356 966-114 E-mail:postmaster@drahtzug.de; www.drahtzug.de Официальный представитель в Украине АРКСЭЛ 83017, г. Довецк, пер. Вятский, 2а Тел.: (062) 332-2650(52) Тел./филе: 382-9449, 332-2651 Е-mail: info@arcsel.dn.ua; www.arcsel.dn.ua





2



Подписано к печати 06.05.2008. Формат 60×84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 9,04. Усл. кр.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24 + 2 цв. вклейки. Цена договорная. Печать ООО «Фирма «Эссе». 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

ABIOMMINECKAS