

# АВТОМАТИЧЕСКАЯ ВАРКА

[www.nas.gov.ua/pwj](http://www.nas.gov.ua/pwj)

СВАРКА • РЕЗКА • НАПЛАВКА • ПАЙКА • НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ

Издается с 1948 года

МАРТ 2008

**Оборудование**  
**MIG/MAG**  
**TIG**  
**MMA**  
**PLASMA**  
**Аксессуары**

**ESAB®**



**Дистрибьюторы ООО «ЭСАБ» в Украине:**

ООО «Экотехнология», Киев +38 044 200 8056

ООО ТД «УкрЭнергоРесурс», Киев +38 044 529 4310

ООО «ТД НИСА», Киев +38 044 242 1777

ООО «Грик», Киев +38 044 516 9841

ЧПКП «СЕВИД», Херсон +38 0552 373 458

**Представительство ООО «ЭСАБ» в Украине:**

02140, г. Киев, ул. Вишняковская, 9А

+38 044 501 23 24

E-mail: [info@esab.com.ua](mailto:info@esab.com.ua)

[www.esab.ru](http://www.esab.ru)

[www.esab.com](http://www.esab.com)



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

*Ковальчук В. С.* Учет влияния высокочастотной  
механической проковки на циклическую долговечность  
сварных соединений при двухчастотном нагружении ..... 9  
*Махненко О. В., Зайффарт П.* Расчетное прогнозирование  
общих деформаций сварных балок при лазерной сварке ..... 14  
*Размышляев А. Д., Миронова М. В., Дели А. А.* Влияние  
продольного магнитного поля на характеристики дуги при  
сварке неплавящимся электродом в аргоне ..... 21  
*Хорунов В. Ф., Максимова С. В.* Выбор припоев для пайки  
тонкостенных теплообменных устройств ..... 26  
*Григоренко Г. М., Костин В. А., Орловский В. Ю.*  
Современные возможности моделирования превращений  
аустенита в сварных швах низколегированных сталей ..... 31

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

*Барвинко А. Ю.* Повышение эксплуатационной надежности  
сварных резервуаров с двойной стенкой ..... 35  
*Дмитрик В. В., Царюк А. К., Коньк А. И.* Карбидные фазы  
и повреждаемость сварных соединений паропроводов в  
условиях ползучести ..... 39

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

*Давыдов Е. А.* Определение размеров трещин в сварных  
соединениях с помощью ультразвуковых волн дифракции ..... 44

ИЗ ИСТОРИИ СВАРКИ

*Корниенко А. Н., Литвинов А. П.* Переход к комплексному  
развитию сварочного производства ..... 49

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

*Назаренко О. К.* Сокращение времени откочки крупногаба-  
ритных вакуумных камер электронно-лучевых сварочных  
установок ..... 54  
Изобретения стран мира ..... 55  
По зарубежным журналам ..... 58  
Новая книга ..... 61

ХРОНИКА

Ежегодная конференция и выставка Американского  
сварочного общества ..... 62  
Международная научно-техническая конференция в  
Египте ..... 62  
Украинско-российский семинар по атомной энергетике ..... 64

ИНФОРМАЦИЯ ..... 65

# Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)

WELDING — CUTTING — SURFACING — BRAZING — COATING

№ 3 (659)  
March 2008  
Published since 1948

EDITORIAL BOARD:

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

THE INTERNATIONAL  
EDITORIAL COUNCIL:

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

FOUNDERS:

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

PUBLISHER:

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

Editors:

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

State Registration Certificate  
KV 4788 of 09.01.2001

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

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

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

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

## CONTENTS

NEWS .....	3
<b>SCIENTIFIC AND TECHNICAL</b>	
<i>Kovalchuk V. S.</i> Account of effect of high-frequency mechanical peening on cyclic life of welded joints at two-frequency loading .....	9
<i>Makhnenko O. V., Seyffarth P.</i> Calculated prediction of general deformations of welded beams in laser welding .....	14
<i>Razmyshlyayev A. D., Mironova M. V., Deli A. A.</i> Effect of longitudinal magnetic field on arc characteristics in non-consumable electrode argon arc welding .....	21
<i>Khorunov V. F., Maksimova S. V.</i> Selection of brazing alloys for brazing thin-walled heat-exchanging devices .....	26
<i>Grigorenko G. M., Kostin V. A., Orlovsky V. Yu.</i> Present opportunities of modeling austenite transformations in welds of low-alloy steels .....	31
<b>INDUSTRIAL</b>	
<i>Barvinko A. Yu.</i> Increase in service reliability of welded tanks with a double wall .....	35
<i>Dmitrik V. V., Tsaryuk A. K., Konyk A. I.</i> Carbide phases and damage of welded joints of steam pipelines under creep conditions .....	39
<b>NON-DESTRUCTIVE TESTING</b>	
<i>Davydov E. A.</i> Determination of crack sizes in welded joints using diffraction of ultrasonic waves .....	44
<b>FROM HISTORY OF WELDING</b>	
<i>Kornienko A. N., Litvinov A. P.</i> Transition to integrated development of welding production .....	49
<b>BRIEF INFORMATION</b>	
<i>Nazarenko O. K.</i> Reduction in time of pumping out of large-sized vacuum chambers of electron beam welding installations .....	54
Inventings of countries all over the world .....	55
Review of foreign journals .....	58
New book .....	61
<b>NEWS</b>	
Annual Conference and Show of American Welding Society .....	62
International Scientific-Technical Conference in Egypt .....	62
Ukrainian-Russian seminar on nuclear engineering .....	64
INFORMATION .....	65

**The Paton**  
**WELDING JOURNAL**

# ЖУРНАЛУ «АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА» – 60

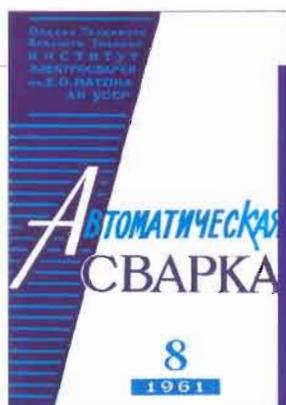
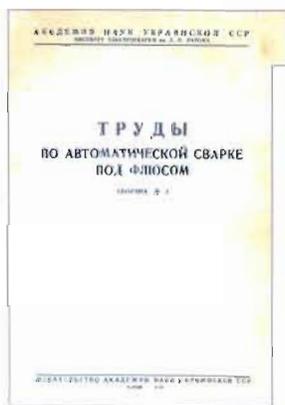


Журнал был основан по инициативе академика Е.О. Патона в марте 1948 г. С 1953 г. по настоящее время главным редактором журнала является академик Б.Е. Патон. За истекший период в нем было опубликовано свыше 12000 статей по различным проблемам сварочного производства. Довольно быстро и на многие годы журнал завоевал широкую читательскую аудиторию. Этому способствовало прежде всего то, что в нем впервые освещались многие выдающиеся разработки и затем прослеживалось их развитие. Среди них:



дуговая сварка с принудительным формированием металла шва, электрошлаковая сварка, технология изготовления листовых конструкций методом рулонирования, дуговая сварка по бескислородному флюсу, многослойные конструкции, сварнокованные и сварнолитые конструкции, сварка в углекислом газе проволокой малого диаметра, сварка по активированному флюсу, импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом, многоэлектродная дуговая сварка в общую ванну, контактная сварка непрерывным оплавлением рельсов и труб, электронно-лучевая сварка, парофазные технологии, микроплазменная сварка, механизированная мокрая сварка под водой, плазменная резка, сварка и резка взрывом, технология изготовления криогенной техники, сварка и напыление в космосе, сварка композитов, плазменное и газотермическое напыление, прогнозирование остаточного ресурса конструкций, создание технологий для оценки технического состояния и продления сроков эксплуатации техногенных и экологически опасных объектов и многое другое.

По ширине охвата и глубине освещения опубликованных материалов подшивки журнала часто называют сварочной энциклопедией. Он помог становлению не одного поколения сварщиков, для которых является настольным пособием. Журнал «Автоматическая сварка» популярен в среде ученых, преподавателей, руководителей и специалистов различных рангов многих предприятий и фирм Украины, стран СНГ и дальнего зарубежья. В последние годы он претерпел заметные изменения. Они определяются прежде всего существенным расширением спектра публикуемой информации, включающей новости техники и технологий, изобретения стран мира, хронику важнейших событий в области сварочного производства, анонсы периодики стран мира и многое другое.



## ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Институт электросварки им. Е. О. Патона разработал технологию и оборудование для упрочняющей высокочастотной механической проковки (ВМП) сварных соединений, которая является развитием технологий поверхностного пластического деформирования металлов и применяется для повышения служебных характеристик сварных соединений конструкций различного назначения и прежде всего для повышения их сопротивления усталости. Поверхностное пластическое деформирование металла при ВМП осуществляется в результате механического импульсного действия ударных элементов ручного инструмента, возбуждаемых ультразвуковым генератором. Для упрочнения сварных соединений с целью повышения сопротивления усталости при ВМП пластическому деформированию подвергается только зона сплавления шва с основным металлом шириной 4...7 мм.

ВМП зоны сплавления соединений, выполненная в соответствии с рекомендациями, приводит к

- формированию характерной канавки глубиной до 0,5 мм, образование которой устраняет острые подрезы вдоль шва и уменьшает коэффициент концентрации напряжений, обусловленный геометрией сварного соединения;

- деформационному упрочнению пластически деформированного металла;

- образованию остаточных напряжений сжатия в приповерхностных слоях наклепанного металла на глубину до 1мм;

- изменению структуры металла этой зоны до мелкозернистой.

В зависимости от меха-

нических свойств металла, типа сварного соединения, характеристик цикла переменного нагружения, уровня остаточных сварочных напряжений ВМП повышает циклическую долговечность соединений в 7...10 раз, а неограниченный предел выносливости — на 30...200 %.

Ультразвуковая установка для выполнения ВМП состоит из таких основных частей: источника питания и УЗ генератора 1, ручного ударного инструмента с пьезокерамическим преобразователем 2, съемной головки с различным количеством бойков 3.



По сравнению с другими способами поверхностного пластического деформирования сварных соединений ВМП характеризуется высокой производительностью и экономичностью; компактностью и мобильностью оборудования; значительной площадью обработки (зона перехода от металла шва к основному металлу); возможностью обработки в произвольном пространственном положении; возможностью прогнозирования эффективности обработки; используется на стадиях производства и эксплуатации конструкций.

## ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ, ГИБКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Индивидуальные нестандартные схемы резания, уменьшение необходимости повторной обработки поверхностей



Эксперты по демонтажу компании Bombardier положительно отзываются о системе плазменной резки TransCut за легкий вес, практичность и неограниченную мобильность оборудования

резания, отсутствие стружки — это только некоторые преимущества, которыми TransCut с их новым режущим инструментом обеспечивает пользователей Bombardier. Петре Хемпел, глава центра Bombardier Refurbishment в Хеннигсдорфе близ Берлина, рассказывает об опыте некоторых из его коллег: «Надрез устанавливается быстрее, можно выполнять резку более точно и разрезать листы толщиной до 10 мм из стали, алюминия или хромистой стали. Этот пароплазменный инструмент, разработанный компанией Gropius, безопасен для здоровья и окружающей среды по сравнению с плазменными режущими инструментами.

Принцип действия, который обеспечивает успех технологии TransCut, — это вода, а не сжатый воздух или плазменный газ. Стационарные и переносные воздушные компрессоры, тяжелые и объемные газовые контейнеры уже в прошлом. На их место приходят встроенные минирезервуары на 1,5 л и компактные



TransCut обеспечивает гладкие резы и возможность выполнения резки по нестандартным схемам

резервные картриджи. В результате получается практичная, легкая приспособляемая и полностью мобильная режущая система. Резку можно эффективно выполнить на строительных площадках, в местах с ограниченным пространством или в труднодоступных местах. Это каждый день демонстрируется на ремонтном заводе в Берлине, где разбирают списанные автомобили.

Режущим веществом при TransCut является жидкость на основе воды, а парообразное плазменное вещество, извлекаемое из него, имеет низкий уровень выделений по сравнению со сжатым воздухом и плазменным газом. Экстракционные приборы, необходимые для утилизации отработанных газов и металлического порошка, больше не используются. При резке стали снижается уровень вдыхаемых выделений в 5 и более раз, а выделений закиси азота — в 10 раз, для нержавеющей стали — в 1,8...3,0 раза.

При массе 14,6 кг TransCut 300 легок и прост в маневрировании. Высококачественные резы можно выполнить на листах из стали, алюминия или высоколегированной стали; можно разрезать листы толщиной до 10 мм. Все чего требует прибор — это подключение к сети 230 В и генераторную совместимость. При выполнении сварных швов после резки риск образования пор уменьшается. С режущим веществом, не содержащим азота, процесс TransCut предотвращает «склеивание» разрезаемых частей.

Специалисты по ремонту из Хеннингсдорфа очень рады переходу на TransCut. Это касается и других пользователей этой инновационной режущей системы.

## УВЕЛИЧЕНИЕ СКОРОСТИ СВАРКИ С ПОВЫШЕНИЕМ КАЧЕСТВА

В дополнении к максимальной производительности наплавки при высоких скоростях сварки пользователи высокоэффективных сварочных систем ожидают высококачественных результатов и легко настраиваемых параметров применения. Судостроительный завод Reenewerft практически удвоил свою производительность после внедрения процесса Time Twin Digital 5000 от компании Fronius. Кроме того, он позволил исключить критические места в производственной цепочке и увеличить качество сварочных результатов.

Судостроительная компания выполняет соединение 90% всех панелей длиной 70 м на производственной линии в доке Reenewerft в Волгасте (Балтийское море). Эти изготовленные заводским способом панели для секций контейнерного судна состоят из лис-



Система Time Twin Digital автоматически соединяет обе стороны: ребра жесткости и нижней поверхности

тов размером 12x12 м с толщиной 5...20 мм. Для их усиления пластины проходят через платформу с высокоэффективной сварочной системой, состоящей из двух систем, которые сваривают по методу тандем МИГ/МАГ одновременно с двух сторон левый и правые угловые швы на ребре жесткости. Главный инженер по сварке Клаус-Петер Франк сообщает: «Пре-



Две системы — одна справа и одна слева — выполняют угловой шов между ребром жесткости и нижней поверхностью по методу тандем МИГ/МАГ

дыдущая однопроволочная сварочная система с максимальной скоростью сварки 1,0 м/мин больше просто не подходила для работы. Сейчас мы используем Time Twin Digital 5000, которая состоит в общем из четырех систем TransPuls Synergic 5000. Основная часть углового шва имеет катет 3,5...4 мм. Достигается скорость сварки от 1,60 до 1,70 м/мин — практически на метр больше чем ранее! И соответственно более высокое качество, чем ранее». Об это можно судить по низким уровням деформации панели. В процессе Time Twin количество энергии, которое вводится на единицу длины, составляет приблизительно на 40 % меньше, чем ранее для однопроволочных процессов.

В отличие от двухпроводочной сварки электроды управляют отдельно и электрически изолируются в процессе тандем. Это приводит к увеличению возможностей применения процесса как для соединительной сварки, так и плакирования и специальных применений, например, пайки и сварки в сочетании с импульсной или стандартной дугой.

Система сварки Time Twin Digital состоит из двух авто-

номных систем MIG/МАГ TransPlus Synergic 4000 или 5000, которые объединяются на контрольной панели через скоростной цифровой интерфейс данных. Результаты впечатляющие при стабильной дуге, максимальных скоростях наплавки, высоких сварочных скоростях и низком количестве подводимого тепла. Преимуществом сварки с использованием двух проволок в объединенной сварочной ванне является то, что вторая дуга улучшает циркуляцию сварочной ванны. Проволочные электроды, размещаемые вдоль посредством вращения горелки, повышают перекрытие зазора и способствуют образованию верхнего слоя без колебаний. Работа с программами, сохраненными в виде определенных заданий, обеспечивает однородные характеристики по всей длине шва.

### НОВАЯ ВЫСОКОТОЧНАЯ СИСТЕМА ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ С ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ ULTRACUT200

Фирма «Thermal Dynamics» (Нидерланды) продолжает программу развития автоматизированных плазменных технологий и объявила о производстве новой высокоточной системы плазменной резки UltraCut200.

Новая система резки, которая заменит UltraCut150, имеет следующие характеристики:

- максимальный режущий ток 200 А;
- толщина изделия (резки) от 0,5 до 25 мм;
- максимальная толщина проникновения 40 мм;
- резка мягкой стали с помощью технологии XtremeLife™ для продления срока службы деталей и высоких скоростей резки;
- резка нержавеющей стали с помощью технологии WMS™ (используя азот и воду) при

выполнении резов в три раза быстрее;

- маркировка и резка с помощью одних и тех же расходных материалов;
- хорошее качество реза по всей толщине и для всех классов материалов.

Высокие рабочие характеристики UltraCut200 гарантируют максимальную продуктивность и гибкость для любого промышленного применения мягкой нержавеющей стали.

Новый источник питания вместе с UltraCut100 и UltraCut300 дополнит систему высокочастотной плазменной резки, предлагаемую Thermal Dynamics.

Более подробную информацию можно получить на сайте [www.thermal-dynamics.com](http://www.thermal-dynamics.com)

### ЗАЛ НОВИНОК СВАРОЧНОЙ ТЕХНИКИ

Компания «Шторм-ИТС» (г. Екатеринбург, Россия) открыла демонстрационный зал новинок сварочной техники, а также наиболее востребованных образцов импортного сварочного оборудования класса HI-TECH, которые уже успели себя хорошо зарекомендовать на российском рынке.

«Шторм-ИТС» — одна из ведущих фирм в Уральском регионе, занимающаяся комплексными поставками оборудования для сварки и резки, а также обеспечивающая его наладку, гарантийное и послегарантийное обслуживание.

Опытный инструктор по сварке продемонстрирует интересное оборудование в работе, а также проведет экспериментальные работы по сварке и резке на образцах заказчика.

В демзале представлены:

- большой номенклатурный ряд механизмов для перемещения горелок сварочных полуавтоматов серии «Noborder». Данное оборудование яв-



Рис. 1

ляется средством механизации процесса полуавтоматической сварки, его применяют при выполнении сварных швов в различных пространственных положениях. Оно позволяет получать высокое и стабильное качество сварного шва существенно с меньшими трудозатратами, чем при ручном способе (рис. 1);

- современные инверторные сварочные аппараты для ручной дуговой, полуавтоматической, аргодуговой и плазменной сварки с цифровой обработкой данных (производство — Германия). Эргономичная конструкция, простота в эксплуатации этого оборудования позволяет получать качественные сварные соединения даже сварщику невысокой квалификации (рис. 2);



Рис. 2

• весь ассортимент газовой аппаратуры «Messerg» от редукторов и резаков до малогабаритных машин термической резки. Это оборудование зарекомендовало себя как качественное, предельно простое в использовании, надежное и долговечное (рис. 3);

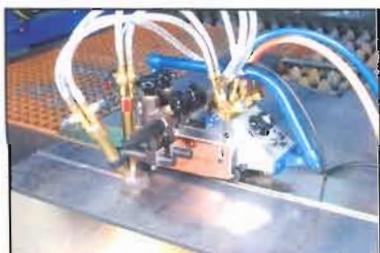


Рис. 3

• сварочные вращатели, средства индивидуальной защиты органов зрения и дыхания сварщика, фильтровентиляционное оборудование для удаления сварочных дымов из зоны сварки (рис. 4).



Рис. 4

Открытие демонстрационного зала в Екатеринбурге позволило улучшить качество работы «Шторм-ИТС» с клиентами, сделать новое и высокотехнологичное оборудование более доступным для ознакомления и апробации.

Теперь не стоит ждать до очередной встречи на выставке, двери демонстрационного зала компании «Шторм-ИТС» всегда открыты для желающих убедиться на практике в качестве поставляемого оборудования!

## ДЕФЕКТОСКОПИЯ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ СВЫШЕ 900 °С

В ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины проведена экспериментальная проверка возможности дефектоскопии металла при температуре выше 900 °С с помощью лазерного акустомагнитного метода. Проверка осуществлялась на двух образцах с искусственным и естественным дефектами. Первый образец представлял собой стальной параллелепипед размером 80x100x320 мм с обработанной поверхностью и нанесенным искусственным дефектом в виде прямоугольного паза размерами 1x1x30 мм. Вторым образцом представлял собой фрагмент размером 54x220x240 мм непрерывно-литого сляба прямоугольного сечения с естественным дефектом. Предварительно наличие естественного дефекта было подтверждено магнитно-порошковым методом. Дефект представлял собой трещину в приреберной зоне во впадине волнообразного профиля поверхности (волнообразный профиль образуется вследствие качаний кристаллизатора при разливке).

Образцы разогревали до температуры 1000 °С и устанавливали на дефектоскопический стенд, на котором датчиком акустомагнитного дефектоскопа производилось сканирование поверхности образцов. Воздушный зазор между поверхностью датчика и сканируемой поверхностью об-



разцов был не менее 10 мм.

Сигналы от искусственного и естественного дефектов были зарегистрированы с соотношением сигнал/шум не менее 20 дБ. По результатам экспериментальной проверки было рекомендовано применение лазерного акустомагнитного метода для on-line дефектоскопии непрерывного металла на выходе УНРС.

## СИМОНА — НОВАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ И СОСУДОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Система, разработанная ООО «НПФ Диагностика» (г. Минск) и Институтом прикладной физики НАН Беларуси, предназначена для регистрации, сбора, передачи, индикации в реальном масштабе времени и хранения многоканальной информации об изменении в процессе эксплуатации локальных деформаций и напряжений в элементах сосудов под давлением, нагруженных металлоконструкций газокompрессорных станций и магистральных трубопроводов, а также других конструкций.

В основе оригинальных тензOMETрических датчиков лежит принцип изменения частоты собственных колебаний струны в зависимости от ее натяжения. Блок сопряжения управляет по линии связи считыванием информации с группы датчиков и передачей ее на диспетчерский терминал. От группы блоков сопряжения, расположенных в контрольно-измерительных колонках, данные локальных деформаций в местах установки датчиков поступают на диспетчерский терминал, где проводится их анализ.

По поступающим на терминал данным судят о возможности возникновения в элементах конструкций крити-



ческих деформаций и напряжений в результате подвижки грунтов, коррозионных потерь металла, недопустимом развитии трещин, возникновении пиковых перегрузок и т. п.

В отличие от существующих систем контроля напряженно-деформированного состояния СИМОНА обеспечивает непрерывный мониторинг состояния конструкции на протяжении всего цикла ее эксплуатации.

### «ИНТРОСКАН-М» — АНАЛИЗАТОР НАПРЯЖЕНИЙ И СТРУКТУРЫ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ООО «МПФ Диагностика» и Институтом прикладной физики НАН Беларуси (г. Минск) на основе использования магнитного эффекта Бракгаузена разработан прибор ИНТРОСКАН. Он является четвертым поколением магнитошумовых анализаторов напряжений и структуры металлов, дополняющим возможности ранее выпущенных приборов РМША, ИНТРОМЕТ и ИНТРОМАТ.

Благодаря оригинальным техническим решениям и наличию встроенного компьютера с операционной системой Windows CE прибор предоставляет новые возможности и

не имеет аналогов в СНГ и за рубежом.

Он обеспечивает:

- автоматическое построение и запоминание неограниченного количества градуировочных кривых;
- независимость результатов измерений от изменения в широких пределах зазора между полюсами датчика и контролируемой поверхностью, а также от состояния поверхности;
- представление информации в относительных и в истинных единицах;
- построение диаграммы напряжений в секторе 180° (при использовании 4-полюсного датчика);



- автоматический выбор оптимальных режимов контроля;
- диалоговый режим работы, удобный пользовательский интерфейс, наглядное представление результатов сканирования в виде линейных или круговых диаграмм;
- простоту расширения возможностей прибора и адаптации к конкретным задачам потребителя за счет применения новых пользовательских программ.

Может быть использован для

- контроля и измерения остаточных и приложенных напряжений с использованием специальной методики оценки напряженно-деформированного состояния;
- контроля поверхностной пластической деформации;
- определения толщины упрочненного слоя;
- оценки напряжений в поверхностных слоях на разных глубинах до 1 мм;
- контроля толщины, ширины и профиля переходной зоны поверхностных слоев, упрочненных лазерной, плазменной и другими видами обработок;

рины и профиля переходной зоны поверхностных слоев, упрочненных лазерной, плазменной и другими видами обработок;

- контроля и выявления шлифовочных прижогов;
- контроля твердости углеродистых и легированных сталей.

### КАРКАСНО-МОДУЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

Фирма «Lincoln Electric» реализовала новый подход к созданию мощных сварочно-технологических комплексов. В качестве составляющих комплексов используются сварочные инверторы производства «Lincoln Electric» типа V-350-PRO и V275-S. Модули могут комплектоваться из четырех инверторов V350-PRO (комплекс K2667-1), шести инверторов (комплекс K2667-2) либо из четырех инверторов (комплекс K266761), восьми инверторов (комплекс K2666-2). Комплексы с различной комбинацией инверторов могут использоваться при многопос-



товой дуговой сварке, резке и наплавке с различными токовыми нагрузками на посту в диапазонах 200...800 и 200...1200 А.

Комплексы снабжены индивидуальными гибкими водонепроницаемыми водоводами. Благодаря наличию двух подъемных серьг сверху и пазов снизу комплексы легко транспортируются с помощью подъемного крана или вилочного погрузчика.

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКИ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ДВУХЧАСТОТНОМ НАГРУЖЕНИИ

В. С. КОВАЛЬЧУК, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложены методика, аналитические зависимости и номограммы для определения области эффективного применения упрочнения сварных соединений стали 09Г2С высокочастотной механической проковкой и оценки ее влияния на повышение циклической долговечности при двухчастотном нагружении.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, сварные стальные конструкции, двухчастотное нагружение, сварные соединения, повышение циклической долговечности, высокочастотная механическая проковка

Повышение циклической долговечности сварных металлоконструкций на стадии изготовления, а также после ремонта и восстановления соединений с помощью сварки является важной и актуальной задачей. Существуют различные способы повышения сопротивления усталости сварных соединений. Как правило, они основаны на снятии растягивающих или искусственном наведении благоприятных сжимающих остаточных напряжений в зоне перехода сварного шва к основному металлу. Одним из наиболее эффективных, производительных и экономичных способов создания остаточных напряжений сжатия, снижения концентрации напряжений и поверхностного упрочнения металла шва или зоны перехода сварного шва к основному металлу является механическая высокочастотная проковка с использованием ультразвуковых преобразователей [1–3]. При одночастотном нагружении такая дополнительная обработка может повысить циклическую долговечность сварных соединений конструкционных сталей в зависимости от типа соединений, класса прочности материала и асимметрии цикла в 2...10 раз. Однако реальный спектр нагружения многих элементов конструкций состоит из двух и более одновременно действующих разных по амплитуде и частоте переменных составляющих. Полученные ранее результаты экспериментальных исследований показали, что циклическая долговечность материалов и сварных соединений при двухчастотном нагружении зависит от амплитудных и частотных отношений напряжений, а также механических характеристик металлов [4]. При этом с повышением последних долговечность существенно снижается. Поскольку при механической проковке в результате упругопластического деформирования происходит поверхностное упроч-

нение металла [3], то можно ожидать снижения эффективности такой обработки изделий, которые эксплуатируются в условиях переменного нагружения с дополнительными напряжениями от вибраций.

Для оценки влияния высокочастотной механической проковки на повышение сопротивления усталости сварных соединений в условиях двухчастотного нагружения проведены экспериментальные исследования крупномасштабных образцов из низколегированной стали 09Г2С с продольными ребрами (рис. 1), имеющих высокие значения концентрации напряжений и уровня растягивающих остаточных сварочных напряжений в исходном состоянии, соизмеримые с таковыми в реальных конструкциях. Сварные швы продольных ребер образцов были выполнены ручной дуговой сваркой штучными электродами УОНИ-13/55 с полным проваром. Для получения исходных данных о сопротивлении усталости соединений при одно- и двухчастотном нагружении образцы испытывали в состоянии после сварки. Для оценки влияния упрочнения на повышение долговечности соединений в аналогичных условиях испытаний зоны перехода швов к основному металлу на длине 70 мм от края ребер образцов дополнительно обрабатывали высокочастотной

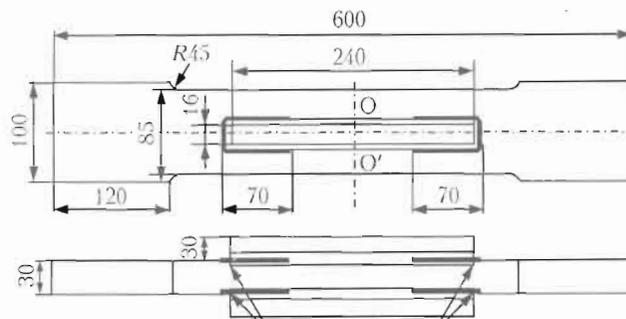


Рис. 1. Вид образца для оценки эффективности высокочастотной механической проковки в повышении сопротивления усталости сварных соединений при циклах нагружения простой и сложной формы (стрелками показано расположение зон, обработанных проковкой)

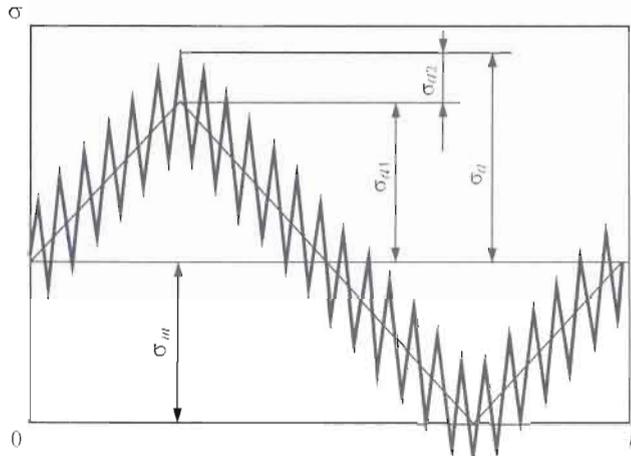


Рис. 2. Форма цикла нагружения:  $\sigma_{a2}/\sigma_{a1}$  — амплитуды соответственно низко- и высокочастотного напряжения;  $\sigma_a$  — суммарная амплитуда напряжений;  $\sigma_m$  — среднее напряжение цикла;  $t$  — время

механической проковкой. На образцах в исходном состоянии после испытаний при двухчастотном нагружении до образования усталостных трещин критических размеров роль проковки определяли на отремонтированных сваркой швах. С этой целью металл вокруг трещин удаляли пальцевой фрезой, углубления заваривали электродами УО-НИ-13/55, а зону перехода от шва к основному металлу обрабатывали высокочастотной механической проковкой. Усталостные испытания продолжали на тех же режимах нагружения до образования новых трещин таких же размеров. Усталостные испытания образцов выполняли при мягком режиме отнулевого одно- и двухчастотного осевого растяжения на сервогидравлической машине УРС 200/20. В процессе испытаний усталостные трещины, как правило, зарождались по линии сплавления лобового шва с основным металлом. Критерием завершения испытаний принимали развивающуюся усталостную трещину длиной 20 мм. Усталостные испытания при одночастотном нагружении выполняли на частоте  $f_1 = 5$  Гц, частота дополнительных вибраций в условиях двухчастотного нагружения (рис. 2) составляла  $f_2 = 10$  Гц. Низкочастотная составляющая двухчастотного нагружения с соотношением частот  $f_2/f_1 = 100$  составляла  $f_1 = 0,1$  Гц. Испытания при двухчастотном нагружении выполняли при соотношениях амплитуд напряжений высоко- и низкочастотной составляющих  $\sigma_{a2}/\sigma_{a1} \approx 0,2$  и  $0,4$ .

Полученные результаты усталостных испытаний при одночастотном нагружении образцов в исходном состоянии 1 и после высокочастотной механической проковки 2 представлены на рис. 3. Сопоставление этих данных показывает, что высокочастотная механическая проковка сварных соединений стали 09Г2С с продольными ребрами жесткости повышает циклическую долговечность при одночастотной нагрузке в 5 раз:

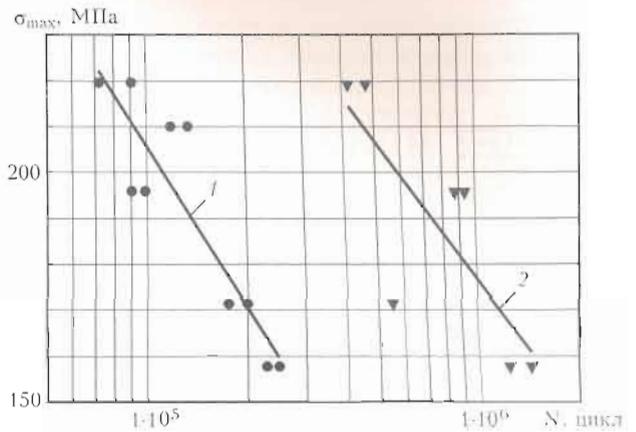


Рис. 3. Сопротивление усталости сварных соединений стали 09Г2С с продольными ребрами жесткости при отнулевом одночастотном растяжении в исходном состоянии (1) и после высокочастотной механической проковки (2)

$$K_{1п.д} = N_{1у}/N_{1и} \quad (1)$$

где  $K_{1п.д}$  — коэффициент повышения долговечности при одночастотном нагружении после проковки соединения;  $N_{1у}$ ,  $N_{1и}$  — циклическая долговечность (количество циклов) при одночастотном нагружении сварного соединения соответственно упрочненного проковкой и в исходном состоянии.

Результаты исследований сопротивления усталости при двухчастотном нагружении аналогичных образцов стали 09Г2С в исходном состоянии, а также после высокочастотной механической проковки зон перехода от шва к основному металлу соединений в исходном состоянии и после ремонта сваркой представлены в таблице.

Коэффициент снижения циклической долговечности сварных соединений при двухчастотном нагружении в исходном после сварки состоянии и после высокочастотной проковки определяли с помощью полученной ранее для сталей различных классов прочности и типов соединений аналитической зависимости, инвариантной к концентрации напряжений, остаточной напряженности, температуре, характеристике цикла, виду и уровню нагружения, а также к ряду других факторов [5]:

$$\alpha = (f_2/f_1)^{\beta(\sigma_{a2}/\sigma_{a1})} \quad (2)$$

где  $\alpha = N_1/N_2$  — коэффициент снижения циклической долговечности при двухчастотном нагружении, определяемый отношением долговечностей в условиях одно- и двухчастотного нагружения при одинаковых уровнях низкочастотного напряжения, коэффициенте асимметрии цикла, остаточных напряжениях, температуре и других параметрах;  $N_1$  — долговечность (количество циклов) сварного соединения при одночастотном нагружении;  $N_2$  — то же при двухчастотном нагружении, исчисляемая количеством циклов низкочас-

Сопротивление усталости сварных соединений стали 09Г2С с продольными ребрами жесткости в условиях осевого отнулевого двухчастотного растяжения

Состояние образца	Максимальное напряжение $\sigma_{1max}$ , МПа	$\sigma_{a2}/\sigma_{a1}$	Количество циклов нагружения		$\alpha$ (экспериментальное)	$\vartheta$ (расчетное)	$\vartheta$ (среднее)
			$N_2 \cdot 10^{-3}$	$N_1 \cdot 10^{-3}$			
Исходное после сварки	202,8	0,177	25,396	97	3,82	1,6	1,4
	206,0	0,193	22,492	90	4,00	1,53	
	203,6	0,380	8,700	95	10,92	1,37	
	210,3	0,430	7,105	76	10,70	1,19	
После проковки в исходном состоянии	230,0	0,220	36,646	300	8,19	2,1	2,1
	206,0	0,193	79,916	500	6,26	2,0	
	222,5	0,190	26,200	340	13,0	2,8	
	203,6	0,380	17,270	530	30,68	1,96	
После ремонта сваркой и проковки	230,0	0,200	37,250	300	8,1	2,20	2,0
	206,0	0,193	71,400	500	7,0	2,18	
	203,6	0,380	19,890	530	26,6	1,87	
	210,3	0,430	15,330	430	28,1	1,67	

тотной составляющей;  $\vartheta$  — поправочный коэффициент, зависящий от механических свойств материала. Как видно из табл. 1, значения  $\vartheta$  для упрочненных проковкой сварных соединений выше, чем для соединений в исходном состоянии. На основе этих данных по зависимости (2) построены номограммы для определения коэффициентов снижения долговечности сварных соединений стали 09Г2С при двухчастотном нагружении в исходном состоянии (рис. 4, а) в виде отношения долговечностей

$$\alpha_y = N_{1и} / N_{2и} \quad (3)$$

и после упрочнения высокочастотной механической проковкой соединений в исходном состоянии или после ремонта сваркой (рис. 4, б):

$$\alpha_{и} = N_{1у} / N_{2у} \quad (4)$$

где  $N_{2и}$  и  $N_{2у}$  — соответственно долговечность при двухчастотном нагружении сварного соединения, исчисляемая по количеству циклов низкочастотной составляющей в исходном состоянии и упрочненного высокочастотной проковкой.

Как видно из рис. 4, при фиксированных значениях отношений амплитуд и частот значения коэффициента снижения долговечности сварных соединений  $\alpha_y$  упрочненных высокочастотной проковкой, в исходном состоянии или после ремонта сваркой больше, чем коэффициента  $\alpha_{и}$  сварных соединений в исходном состоянии без упрочнения. Поскольку коэффициенты снижения долговечности при двухчастотном нагружении  $\alpha_y$  и  $\alpha_{и}$  в рассматриваемых случаях определяются аналитической зависимостью (2) и отличаются лишь значениями коэффициента  $\vartheta$ , то коэффи-

циент  $K_{20.c.d}$  относительного снижения долговечности при двухчастотном нагружении сварных соединений после упрочнения высокочастотной механической проковкой можно представить в следующем виде:

$$K_{20.c.d} = \alpha_y / \alpha_{и} = (f_2 / f_1)^{(\sigma_{a2} / \sigma_{a1}) (\vartheta_y - \vartheta_{и})} \quad (5)$$

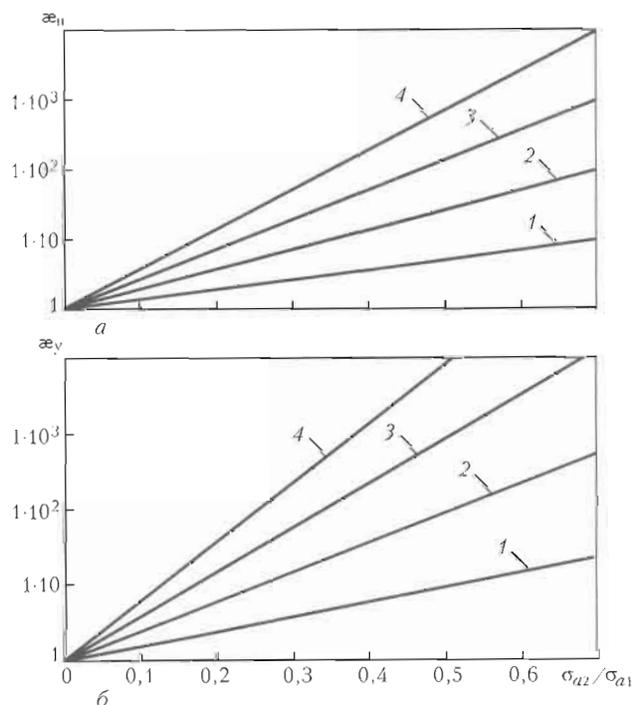


Рис. 4. Номограммы для определения коэффициента снижения циклической долговечности сварных соединений стали 09Г2С при двухчастотном нагружении в исходном состоянии (а) и упрочненных высокочастотной механической проковкой в исходном состоянии и после ремонта сваркой (б), полученные при различном соотношении частот: 1 —  $f_2/f_1 = 1 \cdot 10$ ; 2 —  $1 \cdot 10^2$ ; 3 —  $1 \cdot 10^3$ ; 4 —  $1 \cdot 10^4$

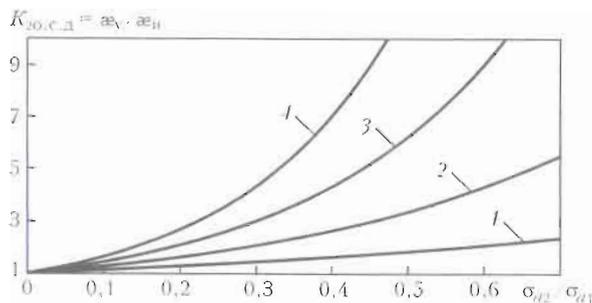


Рис. 5. Номограмма для определения коэффициента  $K_{20,c,d}$  относительного снижения долговечности при двухчастотном нагружении упрочненных проковкой сварных соединений (1-4 — см. рис. 4)

С учетом полученных значений  $\vartheta_y$  и  $\vartheta_n$  эта аналитическая зависимость в графическом виде представлена на рис. 5. Из этого рисунка видно, что с ростом амплитудных и частотных отношений составляющих двухчастотного нагружения циклическая долговечность сварных соединений стали 09Г2С, обработанных высокочастотной механической проковкой, снижается более интенсивно, чем соединений в исходном состоянии. В результате эффективность проковки уменьшается и, начиная с некоторых значений параметров двухчастотного нагружения, механическая высокочастотная проковка может стать бесполезной или даже вредной.

Очевидно, что при двухчастотном нагружении дополнительная проковка эффективна в случае, если значения коэффициента  $K_{1,n,d}$  повышения долговечности в условиях одночастотного нагружения будут больше, чем коэффициента относительного снижения долговечности в условиях двухчастотного нагружения  $K_{20,c,d}$ .

Реальные значения эффективного коэффициента повышения циклической долговечности при двухчастотном нагружении  $K_{23,n,d}$  упрочненных высокочастотной механической проковкой сварных соединений стали 09Г2С можно найти из зависимости

$$K_{23,n,d} = K_{1,n,d} / K_{20,c,d} \quad (6)$$

подставив в нее фактические значения из выражений (1) и (5). Для исследуемых сварных соединений стали 09Г2С экспериментально определены  $\vartheta_y = 2,1$ ,  $\vartheta_n = 1,4$  и  $K_{1,n,d} = 5$ . После подстановки этих данных в выражение (5) эффективный коэффициент повышения долговечности высокочастотной механической проковкой сварных соединений стали 09Г2С при двухчастотном нагружении определяется из аналитического выражения

$$K_{23,n,d} = 5 / (f_2/f_1)^{0,7(\sigma_{a2}/\sigma_{a1})} \quad (7)$$

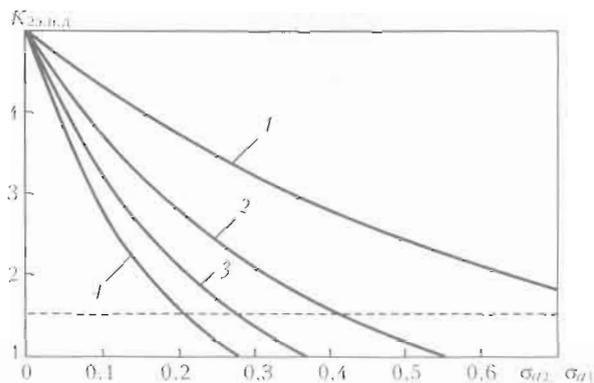


Рис. 6. Номограмма для определения области эффективного использования механической высокочастотной проковки с целью повышения долговечности сварных соединений стали 09Г2С при различных параметрах двухчастотного нагружения (1-4 — см. рис. 4)

или из его зависимостей, представленных на рис. 6.

Очевидно, что дополнительная высокочастотная проковка сварных соединений при двухчастотном нагружении целесообразна, если значение  $K_{23,n,d}$  существенно превышает 1. Однако исходя из технических и экономических соображений можно рекомендовать принять его минимальное значение на уровне  $K_{23,n,d} = 1,5$  (на рис. 6 этот уровень обозначен штриховой линией).

При значениях эффективного коэффициента повышения долговечности  $K_{23,n,d} = 1,5 \div 1,0$  высокочастотная механическая проковка становится малоэффективной, а при  $K_{23,n,d} < 1$  — вредной. Как видно из рис. 6, в этом случае в области эффективного применения высокочастотной механической проковки с целью повышения долговечности сварных соединений стали 09Г2С при увеличении соотношения  $f_2/f_1$  от  $1 \cdot 10$  до  $1 \cdot 10^4$  максимальное значение  $\sigma_{a2}/\sigma_{a1}$  снижается от 0,9 до 0,2.

На основе полученных результатов исследований для повышения циклической долговечности при двухчастотном нагружении можно рекомендовать следующий порядок определения необходимости и учета упрочнения высокочастотной механической проковкой сварных соединений стали 09Г2С в исходном состоянии или после ремонта сваркой.

1. Исходя из заданных параметров двухчастотного нагружения по аналитической зависимости (7) либо номограмме, представленной на рис. 6, для исследованного типа соединения или с учетом значения  $K_{1,n,d}$  для других типов соединений и асимметрии цикла нагружения определяют значения эффективного коэффициента  $K_{23,n,d}$  повышения долговечности высокочастотной проковки сварных соединений стали 09Г2С.

2. Определяют целесообразность применения механической высокочастотной проковки при условии, что коэффициент повышения циклической



долговечности высокочастотной проковки  $K_{2\text{э.п.д}} = 1,5$  или более.

3. По кривой усталости  $I$  (см. рис. 3) для исследованного типа соединения или по соответствующим зависимостям или кривым усталости для других типов соединений и асимметрии цикла напряжений находят количество циклов  $N_{1и}$  при одночастотном нагружении по уровню напряжений, соответствующему низкочастотной составляющей двухчастотного нагружения.

4. Вычисляют коэффициент снижения циклической долговечности  $\alpha_y$  по формуле (2) или номограмме (см. рис. 4, б), где коэффициент, зависящий от свойств материала для сварных соединений стали 09Г2С после механической высокочастотной проковки, составляет  $\vartheta = 2,1$ .

5. Находят расчетное число циклов напряжений низкочастотной составляющей двухчастотного нагружения сварного соединения, упрочненного высокочастотной проковкой с учетом влияния высокочастотной составляющей из выражения  $N_{2y} = N_{1и} / \alpha_y$ .

#### Выводы

1. Коэффициент снижения циклической долговечности при двухчастотном нагружении сварных соединений стали 09Г2С после механической высокочастотной проковки определяется тем же аналитическим выражением, что и без проковки, но с разными значениями поправочных коэффициентов  $\vartheta$ .

2. В аналитическом выражении коэффициента снижения циклической долговечности показатель степени для обработанных проковкой соединений в 1,5 раза выше, чем для необработанных. В результате этого циклическая долговечность свар-

ных соединений стали 09Г2С, упрочненных высокочастотной механической проковкой, в условиях двухчастотного нагружения снижается в большей степени, чем без проковки; с увеличением соотношений амплитуд и частот это различие возрастает.

3. В зависимости от соотношения частот составляющих двухчастотного нагружения  $f_2/f_1$  (от  $1 \cdot 10$  до  $1 \cdot 10^4$ ) область эффективного применения высокочастотной проковки с целью повышения долговечности сварных соединений стали 09Г2С ограничивается соотношением напряжений  $\sigma_{a2}/\sigma_{a1}$  соответственно от 0,9 до 0,2.

4. Чтобы дополнительная высокочастотная проковка сварных соединений стали 09Г2С была оправданной, рекомендуемое минимальное значение эффективного коэффициента повышения долговечности  $K_{2\text{э.п.д}}$  должно составлять не менее 1,5.

1. Михеев П. П. Повышение сопротивления усталости сварных соединений конструкций ультразвуковой ударной обработкой // Пробл. сварки и специальной электроталлургии: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 41–47.
2. Книш В. В., Кузьменко А. З. Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой // Сварщик. — 2005. — № 2. — С. 19–21.
3. Лобанов Л. М., Кир'ян В. І., Книш В. В. Підвищення ресурсу зварних металоконструкцій високочастотною механічною проковкою // Фізико-хім. механіка матеріала. — 2006. — № 1. — С. 56–61.
4. Труфяков В. И., Ковальчук В. С. Определение долговечности при двухчастотном нагружении: Сообщ. 2. (Методика) // Пробл. прочности. — 1982. — № 10. — С. 15–20.
5. Ковальчук В. С. Сопротивление усталости соединений при двухчастотном нагружении // Сварные строительные конструкции / Под ред. Л. М. Лобанова: В 3 т. Т. 1: Основы проектирования конструкций. — Киев: Наук. думка, 1993. — С. 356–361.

A procedure, analytical dependencies and nomograms are proposed for determination of the field of effective application of strengthening of 09G2S steel welded joints by high-frequency mechnical peening and for evaluation of its influence on improvement of cyclic fatigue life at bifrequency loading.

Поступила в редакцию 27.06.2007.  
в окончательном варианте 12.09.2007



## РАСЧЕТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБЩИХ ДЕФОРМАЦИЙ СВАРНЫХ БАЛОК ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ

О. В. МАХНЕНКО, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
П. ЗАЙФФАРТ (д-р-инж., IMG, Германия)

Описана разработанная математическая модель для прогнозирования общих сварочных деформаций изгиба длинных балок при лазерной сварке с целью оптимизации расстояния между опорами закреплений, при котором отклонение лазерного луча от места соединения не превышает допустимого значения.

*Ключевые слова:* лазерная сварка, сварные балки, общие деформации изгиба, система закрепления, численное исследование

Интенсивно расширяющееся применение лазерных технологий, в частности при производстве сварных конструкций, вызвало необходимость решения новых задач, одной из которых является обеспечение высокой точности позиционирования сварного шва. В процессе сварки балка деформируется и отклонение лазерного луча, который движется по заданной траектории от места соединения, может превысить допустимое значение. Допуск на отклонение лазерного луча при сварке балок с толщиной стенок 4...19 мм составляет приблизительно  $\pm 0,3$  мм. Для ограничения деформации балки в процессе сварки используют закрепления. При сварке длинных балок (до 6000 мм) большое количество закреплений повышает трудоемкость и соответственно снижает производительность технологического процесса. В условиях современного гибкого производства сварных балок различных профилей мелкими сериями (по требованию заказчика) назначение оптимальных расстояний между закреплениями экспериментальным путем нерентабельно. Поэтому возникла необходимость в разработке математической модели, которая позволяла бы прогнозировать временные и остаточные сварочные деформации изгиба балок различных профилей и оптимизировать расстояние между закреплениями по длине балки при заданном допуске на отклонение лазерного луча.

Применение общего подхода трехмерного моделирования методом конечных элементов для определения общих деформаций длинных балок требует длительного времени расчета и значительных компьютерных ресурсов. Поэтому в используемой расчетной модели было принято ряд следующих допущений.

При расчете температурных полей используется допущение о быстро движущемся источнике

тепла, при котором трехмерная задача сводится к совокупности двухмерных задач методом конечных элементов для рассматриваемых поперечных сечений по длине балки.

Механическая задача по определению напряжений и деформаций в рассматриваемых поперечных сечениях при заданном температурном поле решается методом конечных элементов в рамках балочной гипотезы плоских сечений с использованием методов теории термопластичности [1]. Известно, что применение балочных гипотез или гипотез плоских сечений для определения деформаций и напряжений в длинных сварных балках позволяет достичь удовлетворительных результатов по сравнению с результатами, полученными путем трехмерного моделирования [2]. Некоторое расхождение в результатах может быть в районе начала и конца балки. При этом расчетная модель значительно упрощается. Решение ищется путем последовательного прослеживания развития упругопластических деформаций в каждом сечении балки. На каждом этапе прослеживания физическая нелинейность, связанная с пластическими деформациями, реализуется с помощью итерационного процесса относительно функции состояния материала  $\psi(x, y, z, t)$  в каждой рассматриваемой точке балки в момент времени  $t$ . Таким образом, нелинейная задача на каждом этапе прослеживания заменяется совокупностью последовательно решаемых линеаризованных задач.

При определении «функции усадки» для случая изгибных деформаций при сварке балок шарнирно опирающихся по концам либо при заданных на кромках осевых усилиях и изгибных моментах, обычно достаточно рассмотреть характерное сечение  $x = \text{const}$ , в пределах которого известно температурное поле нагрева и охлаждения  $T(x, y, z, t)$ , а также внешнее осевое усилие  $N_{xx}(t)$  и моменты  $M_{yy}(t)$  и  $M_{zz}(t)$ . Это статически определенная задача, когда на каждом шаге прослеживания приращение кривизны  $\Delta\kappa_{yy}(t)$  и  $\Delta\kappa_{zz}(t)$  и продольного укорочения  $\Delta\varepsilon_{xx}^0(t) = \Delta\varepsilon_{xx}(0, 0, t)$

определяются в рамках балочных гипотез из уравнений равновесия [1]

$$\Delta \varepsilon_{xx}^0 L_{j1} + \Delta \kappa_{zz} L_{jz} + \Delta \kappa_{yy} L_{jy} + P_j = \bar{M}_j \quad (j = 1, z, y), \quad (1)$$

где  $L_{iq} = \int \frac{iq}{B_1} dF$  ( $i, q = 1, z, y$ );  $P_j = \int \frac{dF}{B_1} j$  ( $j = 1, z, y$ );

$F$  — площадь сечения балки;  $\bar{M}_j$  — внешняя нагрузка, т. е. при  $j = 1$  — это усилие  $N_{xx}(t)$ , а при  $j = z, y$  — соответственно моменты  $M_{zz}(t)$  и  $M_{yy}(t)$ , действующие в данном сечении в момент времени  $t$ ;  $B_1 = \frac{2\psi + K}{3}$ ;  $\psi$  — функция состояния материала;

$K = \frac{1 - 2\nu}{E}$  — модуль объемного сжатия для плоского напряженного состояния.

При отличных от нуля нормальных напряжениях  $\sigma_{xx}$  также соответствует плоскому напряженному состоянию, т. е.

$$b_{xx} = \left( \frac{\sigma_{xx} - \frac{1}{3}\sigma_{xx}}{2G} + K \frac{\sigma_{xx}}{3} \right)_{t-\Delta t} - \Delta \varphi = \left( \frac{\sigma_{xx}}{E} \right)_{t-\Delta t} - \Delta \varphi. \quad (2)$$

Напряжения  $\sigma_{xx}(y, z, t)$  определяются зависимостью:

$$\sigma_{xx}(y, z, t) = \frac{1}{B_1} [\Delta \varepsilon_{xx}^0(t) + \Delta \kappa_{zz}(t)z + \Delta \kappa_{yy}(t)y - b_{xx}]. \quad (3)$$

Функция состояния  $\psi(y, z, t)$  находится итерационным путем по известному алгоритму [1]. На каждой итерации по  $\psi$  необходимо решать систему уравнений равновесия (1), матрица которой симметричная и положительно определенная, что является достаточным условием для существования и единственности решения этой системы при заданных  $\bar{M}_j$ .

В случае многоопорной балки (рис. 1) усилия на опорах  $Q_{ji}(t)$  ( $j = y, z; i = 0, 1, 2, \dots, N$ ) зависят от напряженного состояния из условий, что на опорах приращения перемещений

$$\Delta U_{ji} = 0 \quad (j = y, z; i = 0, 1, \dots, N). \quad (4)$$

Поскольку на каждой итерации по  $\psi$  решение относительно функции  $\Delta U_j(x, t)$  определяется при заданных значениях  $\psi(x, y, z, t)$ , то его удобнее искать в виде суммы

$$\Delta U_j(x, t) = \Delta U_j^{(T)}(x, t) + \Delta U_j^{(Q)}(x, t) \quad (j = z, y). \quad (5)$$

Соответственно и приращение кривизны  $\Delta \kappa_{ij}(x, t)$  представляется суммой

$$\Delta \kappa_{ij}(x, t) = \Delta \kappa_{ij}^{(T)}(x, t) + \Delta \kappa_{ij}^{(Q)}(x, t). \quad (6)$$

При этом  $\Delta \kappa_{ij}^{(T)}(x, t)$  удовлетворяют уравнениям равновесия в сечении  $x = \text{const}$  при  $\bar{M}_j \equiv 0$ , а  $\Delta \kappa_{ij}^{(Q)}(x, t)$  соответственно определяются из уравнений (1) в виде

$$\Delta \kappa_{zz}^{(Q)} L_{jz} + \Delta \kappa_{yy}^{(Q)} L_{jy} = \bar{M}_j(Q_j) \quad (j = y, z), \quad (7)$$

т. е.

$$\Delta \kappa_{yy}^{(Q)} = \frac{L_{zz} \bar{M}_y - \bar{M}_z L_{zy}}{L_{zz} L_{yy} - L_{zy}^2} = \bar{M}_y A_y - \bar{M}_z D, \\ \Delta \kappa_{zz}^{(Q)} = \frac{L_{yy} \bar{M}_z - \bar{M}_y L_{zy}}{L_{zz} L_{yy} - L_{zy}^2} = \bar{M}_z A_z - \bar{M}_y D, \quad (8)$$

где  $\bar{M}_y, \bar{M}_z$  — изгибающие моменты в сечении  $x = \text{const}$  от искомых сил  $Q_{yi}(t), Q_{zi}(t)$  ( $i = 0, 1, \dots, N$ ) на опорах

$$A_y = \frac{L_{zz}}{\Delta}, \quad D = \frac{L_{zy}}{\Delta}, \quad A_z = \frac{L_{yy}}{\Delta}, \quad \Delta = L_{zz} L_{yy} - L_{zy}^2.$$

Учитывая уравнения статики для сил  $Q_{ji}(t)$ , т. е.

$$\sum_{i=0}^N Q_{ji} = 0, \quad \sum_{i=0}^N Q_{ji} l_i = 0, \quad (9)$$

где  $l_i$  — расстояние от  $i$ -й опоры до нулевой, можно записать

$$\bar{M}_j(x) = Q_0 l_1 + Q_1 (x - l_1) \quad \text{для } l_1 < x < l_2,$$

$$\bar{M}_j(x) = Q_0 x + Q_1 (x - l_1) + Q_2 (x - l_2) \quad \text{для } l_2 < x < l_3$$

и т. д., т. е. для  $l_i < x < l_{i+1}$

$$\bar{M}_j(x, t) = \sum_{n=0}^i Q_{nj}(t) (x - l_n) \quad (10)$$

при  $j = y, z; i = 1, 2, \dots, N-1; l_0 = 0$ .

Используя условие (4), а также зависимости  $\Delta \kappa_{ij} = -(\partial^2 \Delta U_j) / (\partial x^2)$ , после интегрирования с учетом выражений (1) и (7), (8) получаем систему из двух  $(N-1)$  уравнений относительно известных  $Q_{ji}$  и постоянной интегрирования  $C_0$

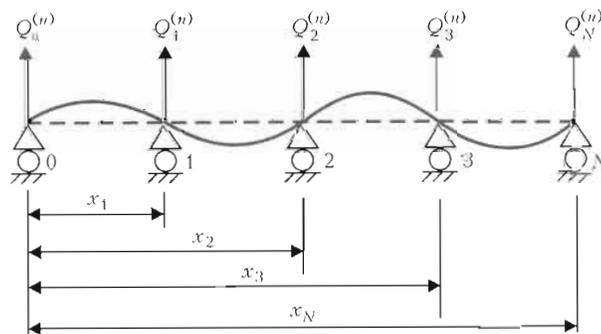


Рис. 1. Условия закрепления многоопорной балки ( $n = (y, z)$ )

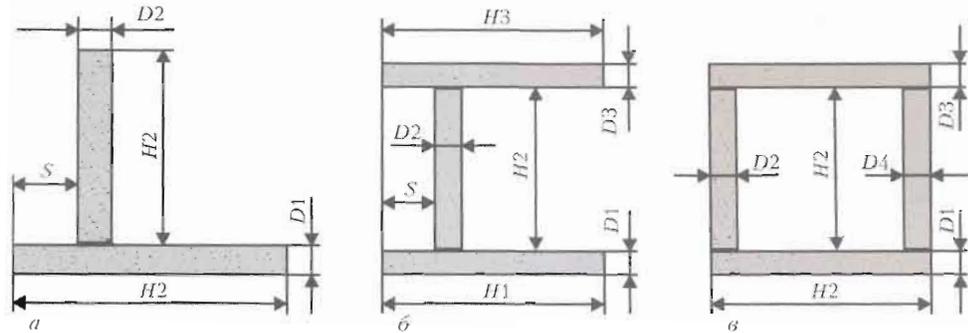


Рис. 2. Схемы различных профилей сварных балок: а, б — соответственно Т- и Н-образный; в — коробчатое сечение

$$C_{0y}l_i + \int_0^{l_i} \int_0^x \Delta \kappa_{ij}^{(j)}(t, x) dx dx + \sum_{n=0}^i [Q_{ny}(t) \Phi_{in}^{(y)} - Q_{nz} R_{in}] = 0,$$

$$C_{0z}l_i + \int_0^{l_i} \int_0^x \Delta \kappa_{iz}^{(z)}(t, x) dx dx + \sum_{n=0}^i [Q_{nz}(t) \Phi_{in}^{(z)} - Q_{ny} R_{in}] = 0, \quad (11)$$

где

$$\Phi_{in}^{(j)} = \int_{l_{i-1}}^{l_i} \int_{l_{i-1}}^x A_j(x, t) (x - l_{i-1}) dx dx,$$

$$R_{in} = \int_{l_{i-1}}^{l_i} \int_{l_{i-1}}^x D(x, t) (x - l_{i-1}) dx dx.$$

Остальные четыре уравнения дают зависимости статики (9).

Определив величины  $Q_j(t)$  по (11) с учетом (9) при заданных  $\psi(z, y, t)$ , вычислим по (10) моменты  $\bar{M}_j$ , затем по (1) с учетом  $\bar{M}_j, \Delta \epsilon_{xx}^0, \Delta \kappa_{xx}, \Delta \kappa_{yy}$ . После этого по выражению (3) вычисляются напряжения  $\sigma_{xx}(t, x, y, z)$ , функция состояния  $\psi(t, x, y, z)$  уточняется из условия текучести. Если условие сходимости не выполняется по  $\psi$  хотя бы в одной точке, то итерационный процесс для момента времени  $t$  продолжается, т. е. вычисляются интегралы  $L_{jq}, P_j$  (1) и т. д. Параметры функции усадки в виде  $\Delta \epsilon_{xx}^0(x, y), \Delta \kappa_{yy}(x, t), \Delta \kappa_{zz}(x, t)$  после окончания итерационного процесса по  $\psi$  используются для вычисления переменных  $\Delta U_y(x, t), \Delta U_z(x, t), \Delta U_x(x, t)$ , интегрирование которых по времени, начиная с  $t = 0$ , дает полную информацию относительно перемещений  $U_y(x, t), U_z(x, t), U_x(x, t)$  точек  $x = \text{const}$  на оси балки в процессе нагрева и охлаждения.

Описанный расчетный алгоритм использовали для определения перемещений  $U_z$  и  $U_y$  точек осевой линии балки, проходящей через центр тяжести сечений, при лазерной сварке продольных швов. Рассматривали сварные балки из нержавеющей стали длиной 4000 мм различных профилей (рис. 2): Т-образного, Н-образного и коробчатого сечения при различных расстояниях между опорами

закрепления. Эффективная мощность лазерного источника составляла 8,5 кВт, скорость сварки — 1,3 м/мин.

Исследовали максимальное перемещение точек осевой линии балки в моменты прохождения источника, что важно для оптимизации расстояний между опорами закрепления по длине балки при заданном допуске на отклонение лазерного луча. Изучали также влияние расстояний между опорами закрепления, скорости сварки и жесткости балки на остаточные деформации балки после снятия закрепления. Определяли максимальные усилия, возникающие в опорах закрепления, в зависимости от расстояния между опорами и жесткости балки.

Расчетный алгоритм был дополнен возможностью учета влияния предварительного выгиба и выгиба после сварки, созданных с помощью опор закрепления. Это позволило провести исследование влияния предварительного выгиба и выгиба после сварки на остаточные общие деформации балки.

На рис. 3 в качестве примера представлены расчетные результаты кинетики перемещений  $U_y$  точек осевой линии балки, проходящей через центр тяжести сечений, при лазерной сварке продольного шва. Расчет выполнен для балки Т-образного профиля ( $H1, H2 = 80$  мм,  $D1, D2 = 8$  мм,  $S = 36$  мм). Профиль балки и сварочный нагрев симметричны относительно оси  $Y$ , поэтому перемещения  $U_z$  равны нулю. Выбрано пять опор закрепления, что соответствует расстоянию 1000 мм между ними. Результаты расчета показали, что максимальное перемещение точек осевой линии балки в моменты прохождения источника нагрева  $U_{y \max}$  составляет  $-0,34$  мм, что немного превышает требования допуска на отклонение лазерного луча ( $\pm 0,30$  мм) и потребует увеличения количества опор закрепления. Остаточный прогиб балки после снятия опор закрепления составил 25,8 мм на длине 4000 мм. Очевидно, что для снижения прогиба балки требуется выполнить ее правку.

На рис. 4 представлены расчетные значения максимального перемещения  $U_y$  балки длиной 4000 мм в моменты прохождения источника наг-

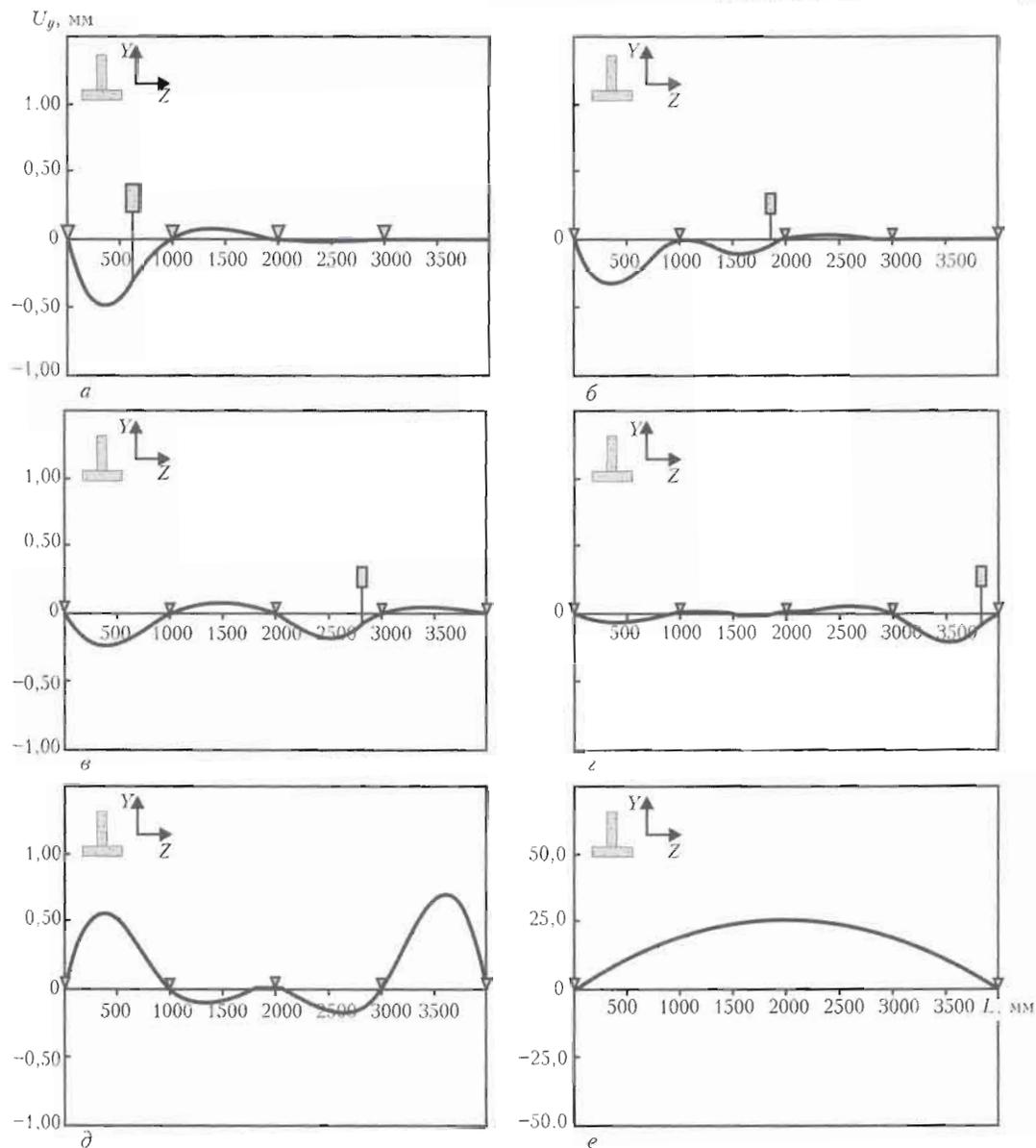


Рис. 3. Расчетные результаты кинетики перемещений  $U_y$  точек осевой линии балки Т-образного профиля при лазерной сварке продольного шва: а —  $t = 28$ ; б — 85; в — 130; г — 176 с; д — после полного остывания; е — после снятия опор закрепления

рева при различных расстояниях между опорами закрепления. Для сравнения результаты получены для пяти Т-образных балок с одним продольным швом и различными соотношениями ширины полки  $H1$  и высоты стенки  $H2$ :  $80 \times 160$ ,  $80 \times 80$ ,  $80 \times 40$ ,  $80 \times 25$ ,  $40 \times 40$  мм, а также для трех Н-образных балок с двумя продольными швами:  $80 \times 160 \times 80$ ,  $80 \times 80 \times 80$  и  $80 \times 40 \times 80$  мм. Толщины всех элементов балок равны  $D1 = D2 = D3 = 8$  мм. Режим сварки и материал балок одинаковые. Результаты показывают, что с уменьшением расстояния между опорами закрепления также значительно уменьшается максимальное перемещение балки в моменты прохождения источника нагрева. При расстоянии между опорами закрепления 500 мм максимальные перемещения всех рассмотренных балок не превысили допуск 0,3 мм. Для балок с профилями  $80 \times 80$  и  $80 \times 40$  мм требо-

вания допуска удовлетворяются при расстоянии между опорами закрепления 800 мм, а для балок с профилем  $80 \times 160$ ,  $80 \times 160 \times 80$  мм — при 1000 мм. Таким образом, чем выше жесткость балки, тем ниже максимальное перемещение в момент прохождения источника нагрева.

На рис. 5 приведены расчетные значения максимального перемещения  $U_y$  балки длиной 4000 мм в моменты прохождения источника нагрева при различных скоростях сварки  $v_w$  и сохранении постоянной погонной энергии. Результаты получены для Т-образной балки ( $H1 = H2 = 80$  мм,  $B1 = B2 = 8$  мм) с одним продольным швом, а также для Н-образной балки ( $H1 = H2 = H3 = 80$  мм,  $B1 = B2 = B3 = 8$  мм) с двумя продольными швами. Результаты для Т-образной балки показывают, что с увеличением скорости сварки незначительно уменьшается максимальное

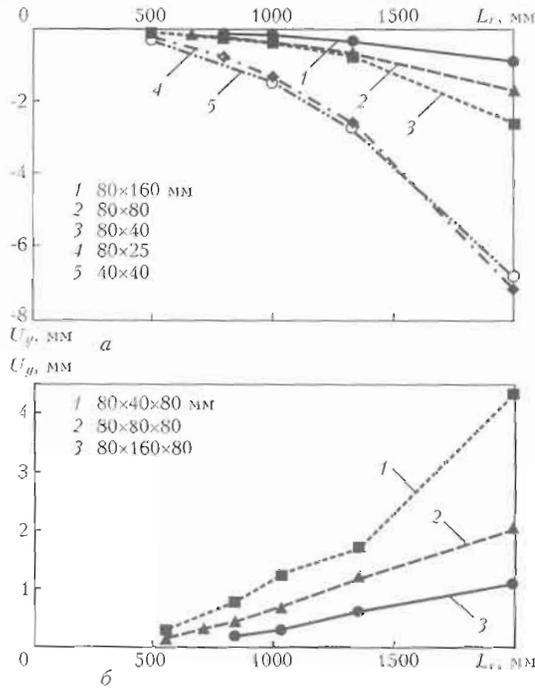


Рис. 4. Зависимость максимального перемещения балки в моменты прохождения источника нагрева от расстояний между опорами закрепления: а, б — соответственно Т- и Н-образные балки

перемещение балки в моменты прохождения источника нагрева. Для Н-образной балки влияние скорости сварки на максимальное перемещение балки в моменты прохождения источника нагрева практически отсутствует, поскольку второй свар-

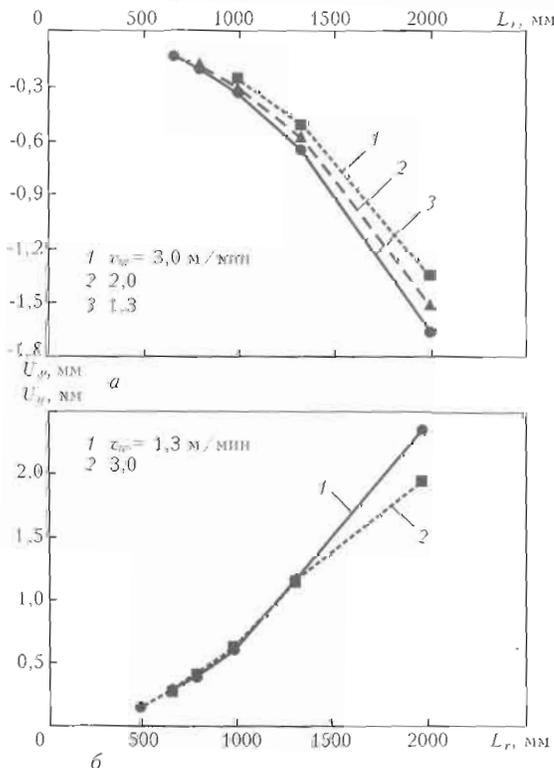


Рис. 5. Зависимость максимального перемещения балки в моменты прохождения источника нагрева от скорости сварки при  $Q_{\text{г}} = 388 \text{ Дж/мм}$ : а — Т-образные балки 80x80 мм; б — Н-образные балки 80x80x80 мм

ной шов выполняется, когда балка приобрела остаточные сварочные деформации от первого шва, которые и определяют максимальные перемещения балки.

На рис. 6 представлены расчетные значения максимального остаточного прогиба  $U_y$  балки длиной 4000 мм после снятия опор закрепления при различных расстояниях между ними в процессе сварки. Результаты получены для тех же Т- и Н-образных балок. Для Т-образных балок с профилями 80x80, 80x40 мм значения максимального остаточного прогиба практически не зависят от расстояния между опорами закрепления. Однако для остальных балок влияние расстояния между опорами на максимальный остаточный прогиб более значительное. Так, для Т-образной балки с профилем 80x25 мм и всех Н-образных балок с уменьшением расстояния между опорами максимальный остаточный прогиб сначала уменьшается, а затем увеличивается. Для балки с профилем 40x40 мм максимальный остаточный прогиб увеличивается при уменьшении расстояния между опорами закрепления. Таким образом, подтверждается известный из практики факт, что закрепление балки в процессе сварки является неэффективным технологическим мероприятием для снижения остаточного прогиба балки. Причем для Н-образных балок сварка в закреплении вызывает резкое возрастание остаточного прогиба в сравнении со сваркой в свободном состоянии (две оп-

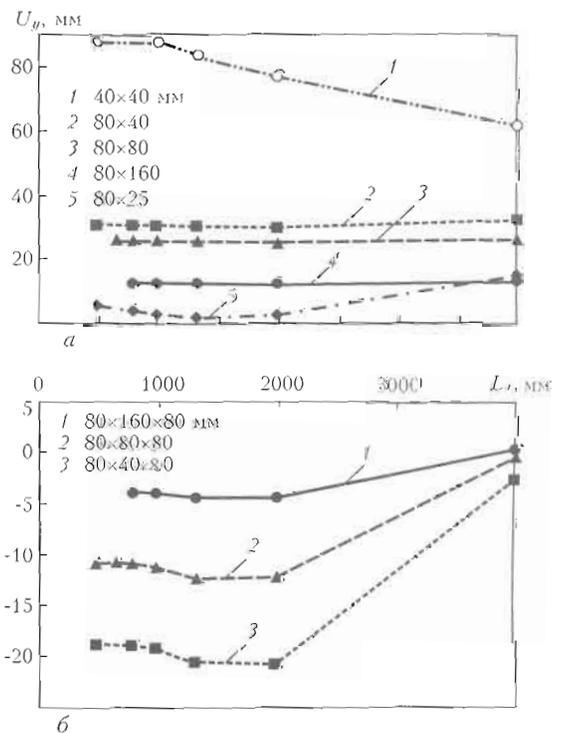


Рис. 6. Зависимость максимального остаточного прогиба  $U_y$  балки длиной 4000 мм после снятия опор закрепления от различного расстояния между ними в процессе сварки: а, б — соответственно Т- и Н-образные балки

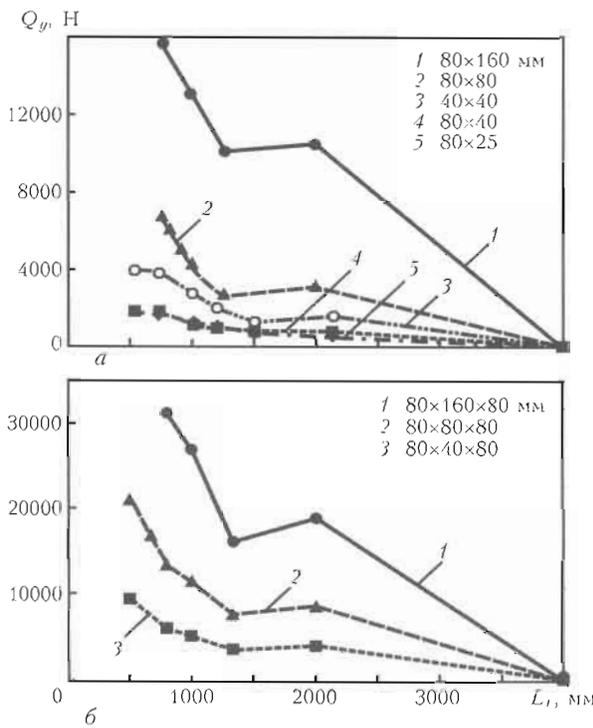


Рис. 7. Зависимость максимальных усилий  $Q_y$  в опорах закрепления в процессе сварки и остывания балки от различного расстояния между опорами: а, б — соответственно Т- и Н-образные балки

ры закрепления и  $L_r = 4000$  мм). Видно также, что жесткость балки способствует снижению максимального остаточного прогиба. Однако большее влияние на остаточный прогиб имеет расстояние между центром тяжести профиля балки и сварным швом. Так, в случае Т-образной балки с профилем 80x25 мм центр тяжести профиля близок к сварному шву, поэтому несмотря на малую жесткость балки в направлении  $Y$  остаточный прогиб  $U_y$  имеет малое значение.

На рис. 7 представлены расчетные значения максимальных усилий в опорах закрепления в процессе сварки и остывания балки при различных расстояниях между опорами для различных по жесткости балок. Результаты показывают, что максимальные усилия в опорах закрепления име-

ют тенденцию к увеличению при уменьшении расстояния между опорами и повышении жесткости балки. Следует отметить, что по абсолютной величине усилия в опорах закрепления при сварке балок могут достигать высоких значений и это необходимо учитывать при разработке устройств закрепления.

В дополнение к основным функциям математическая модель позволяет оценить влияние предварительного выгиба и выгиба после сварки, созданного с помощью закреплений, на остаточные общие деформации балки. Выгиб балки после сварки имитирует процесс механической правки. Причем оптимальные значения предварительного выгиба и выгиба после сварки определяются автоматически методом последовательных приближений при заданном допуске на продольный прогиб. На рис. 8 приведен пример расчетного определения оптимального предварительного выгиба, созданного с помощью пяти опор закреплений, при котором остаточные деформации изгиба Т-образной балки ( $H1 = H2 = 80$  мм,  $D1 = D2 = 8$  мм) длиной 4000 мм минимальны при таком количестве опор. Сварка и остывание балки в таком изогнутом состоянии, когда прогиб составляет  $-62$  мм, приводит к тому, что после снятия закрепления максимальный остаточный прогиб балки составляет приблизительно 1,4 мм. Для сравнения в случае сварки без предварительного выгиба (см. рис. 3) стрелка прогиба балки значительно больше, а именно 26 мм. На рис. 9 представлен пример расчетного определения оптимального послесварочного выгиба, созданного с помощью пяти закреплений, при котором остаточные деформации изгиба Т-образной балки минимальны ( $H1 = H2 = 80$  мм,  $D1 = D2 = 8$  мм). Выгиб до  $-68$  мм снижает остаточный максимальный прогиб балки до 1,15 мм.

Надо отметить, что такие изгибы балок, вызывающие образование пластических деформаций, требуют приложения в опорах закреплений высоких усилий, что усложняет устройство закреплений. Однако в отдельных случаях мелкосе-

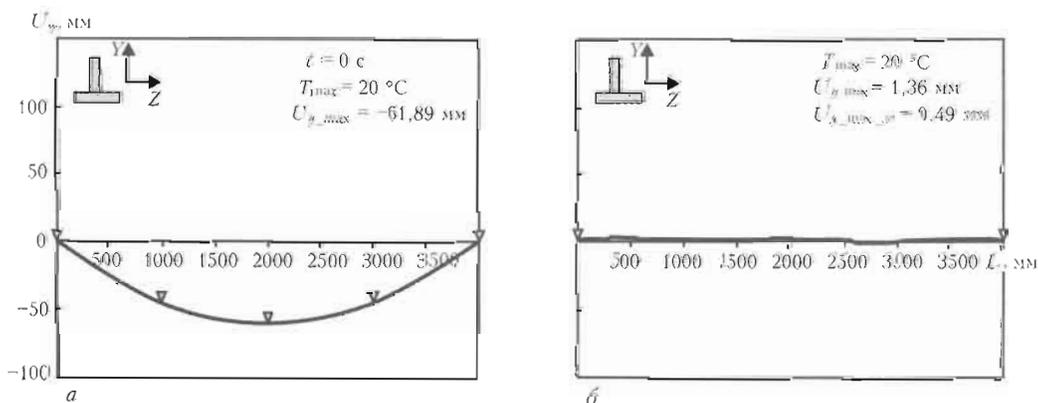


Рис. 8. Оптимальный предварительный выгиб, созданный с помощью опор закреплений, при котором остаточные деформации изгиба Т-образной балки минимальны: а — выгиб перед сваркой; б — после сварки и снятия опор закрепления

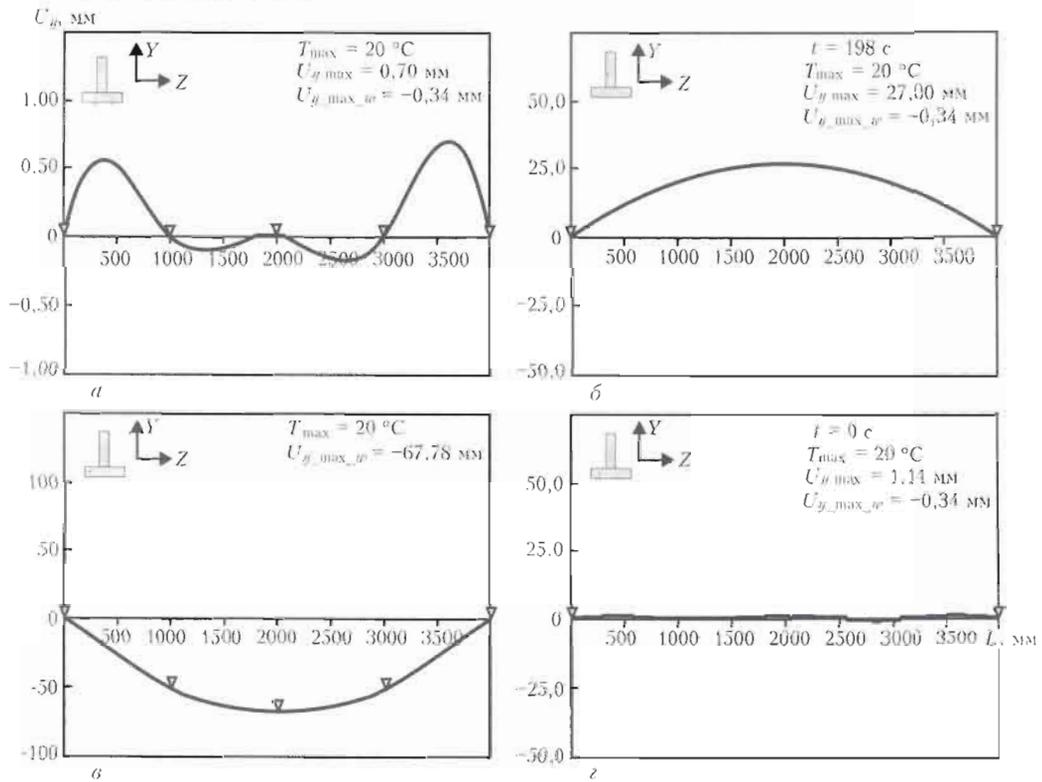


Рис. 9. Результаты расчетного определения оптимального послесварочного выгиба: а — деформации после сварки; б — деформации после снятых опор закрепления; в — оптимальный послесварочный выгиб; г — деформации после выгиба и снятия опор закрепления

рийного производства рассмотренная технология получения сварных балок с минимальными деформациями может найти место. Разработанная модель может быть дополнена возможностью определения оптимальных параметров тепловой правки балок, например, расфокусированным лазерным лучом. Тепловая правка не требует усложнения устройств закреплений и при этом можно использовать сварочный источник нагрева.

Таким образом, применение разработанной математической модели позволяет:

прогнозировать как временные деформации изгиба при лазерной сварке балок различного профиля с большим количеством опор закреплений, так и остаточные сварочные деформации после снятия закреплений;

оптимизировать расстояние между опорами закреплений для обеспечения в допуске максимального перемещения балки в моменты прохождения лазерного источника нагрева;

определять значение оптимального предварительного выгиба или выгиба после сварки, созданного с помощью опор закреплений, при которых остаточные деформации изгиба балки минимальны.

Проведенное расчетное исследование показало, что с уменьшением расстояния между опорами закреплений резко уменьшается максимальное перемещение балки в моменты прохождения источника нагрева; чем выше жесткость балки, тем ниже максимальное перемещение балки в моменты прохождения источника нагрева; с увеличением скорости сварки для Т-образной балки незначительно уменьшается максимальное перемещение балки в моменты прохождения источника нагрева. Для Н-образной балки влияние скорости сварки практически отсутствует; закрепление балки в процессе сварки является неэффективным технологическим мероприятием для снижения остаточного прогиба балки; по абсолютной величине усилия в опорах закрепления при сварке балок могут достигать высоких значений и это необходимо учитывать при разработке устройств закрепления.

1. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1976. — 320 с.
2. FEM analysis of 3-D welding residual stresses and angular distortion in T-type fillet welds / N. X. Ma, Y. Ueda, H. Murakawa, H. Maeda // JWRI. — 1995. — 24, № 2. — P. 115-122.

A mathematical model is described which was developed for forecasting the overall welding bending deformations of extended beams at laser welding in order to optimize the spacing of fixture supports at which the laser beam deviation from the joint site does not exceed the admissible value.



## ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГИ ПРИ СВАРКЕ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В АРГОНЕ

А. Д. РАЗМЫШЛЯЕВ, д-р техн. наук, М. В. МИРОНОВА, асп., А. А. ДЕЛИ, инж.  
(Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Экспериментально с использованием метода разрезного анода показано, что при увеличении индукции продольного магнитного поля в зоне дуги диаметр активного (анодного) пятна на изделии уменьшается, а распределение плотности тока по радиусу его равномернее, чем при сварке без продольного магнитного поля. Методом зонда показано, что при воздействии магнитного поля газодинамическое давление в центре дуги снижается.

*Ключевые слова:* ТИГ сварка, неплавящийся электрод, продольное магнитное поле, анодное пятно дуги, плотность тока, газодинамическое давление дуги

Использование продольного магнитного поля (ПРМП) расширяет технологические возможности дуговой сварки неплавящимся электродом в аргоне и электродной проволокой под флюсом [1–3]. При этом, кроме измельчения структурных составляющих металла шва, улучшается его формирование, изменяются размеры сварочной ванны (длина, ширина, глубина), определяемые в значительной степени диаметром активного пятна дуги на изделии и распределением по нему плотности тока и давления дуги.

Наиболее прост для изучения процесс дуговой сварки неплавящимся (вольфрамовым) электродом в аргоне. Однако даже для этого процесса и без использования ПРМП указанные характеристики дуги изучены неполно и зачастую данные о них противоречивы. Например, по данным работ [4–7] плотность тока в анодном пятне дуги на изделии убывает вдоль радиуса пятна по закону, близкому к нормальному, а в центре имеет максимальные значения порядка  $5 \dots 100 \text{ А/мм}^2$  для сварочного тока порядка  $100 \dots 200 \text{ А}$ . По данным работы [8] плотность тока по активному пятну дуги на изделии распределена практически равномерно и составляет примерно  $3 \dots 5 \text{ А/мм}^2$ . И только в работе [9] было показано, что при наложении на дугу постоянного ПРМП значение плотности тока в центре пятна дуги на изделии несколько уменьшается (от 5 до  $4,2 \text{ А/мм}^2$  при индукции  $20 \text{ мТл}$  и до  $3,4 \text{ А/мм}^2$  при индукции  $50 \text{ мТл}$ ).

При наложении на такую дугу постоянного и пульсирующего ПРМП давление ее по оси дуги уменьшается, если индукция в зоне дуги не превышает  $30 \text{ мТл}$  [10, 11], а при значительных ин-

дукциях ПРМП (порядка  $80 \text{ мТл}$ ) по оси дуги образуется вакуум [3]. Это связано, как показано в работе [12], с вращением дуги вокруг продольной оси и переходом ее в колоколообразную (конусную) форму. Данные работ [10, 11], имеющие принципиальное значение, которые получены методом стробирующего отверстия, требуют более подробного изучения и уточнения с использованием других методов исследования, в частности, метода введения в дугу зонда [13], позволяющего за одно измерение получить распределение газодинамической составляющей давления дуги (скоростного напора) и соответственно скорости плазменного потока в определенном сечении дуги. Как показано в работе [14], именно газодинамическое (некоторые авторы называют его газокинетическим) давление аргоновой дуги, которое значительно больше, чем магнитостатическое, а также скорость плазменных потоков, связанная с этим давлением, являются важными факторами, определяющими глубину и форму швов.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию влияния ПРМП на такие характеристики дуги при сварке неплавящимся электродом в аргоне, как диаметр анодного пятна дуги на изделии и распределение плотности тока по этому пятну, а также распределение давления в поперечном сечении дуги.

Во всех экспериментах сварку выполняли на прямой полярности электродом марки ВЛ диаметром  $4 \text{ мм}$ . Для обеспечения минимального проплавления основного металла угол заточки электрода составлял  $90^\circ$  (без притупления). В качестве источника питания использовали выпрямитель типа ВСЖ-303. Для создания падающей характеристики сварочного поста и регулирования сварочного тока применяли балластные резисторы типа РБ-301. Для защиты дуги использовали аргон марки А (ГОСТ 10157–73), расход которого составлял  $5 \dots 7 \text{ л/мин}$ . На конце сварочной горелки соосно с электродом устанавливали со-

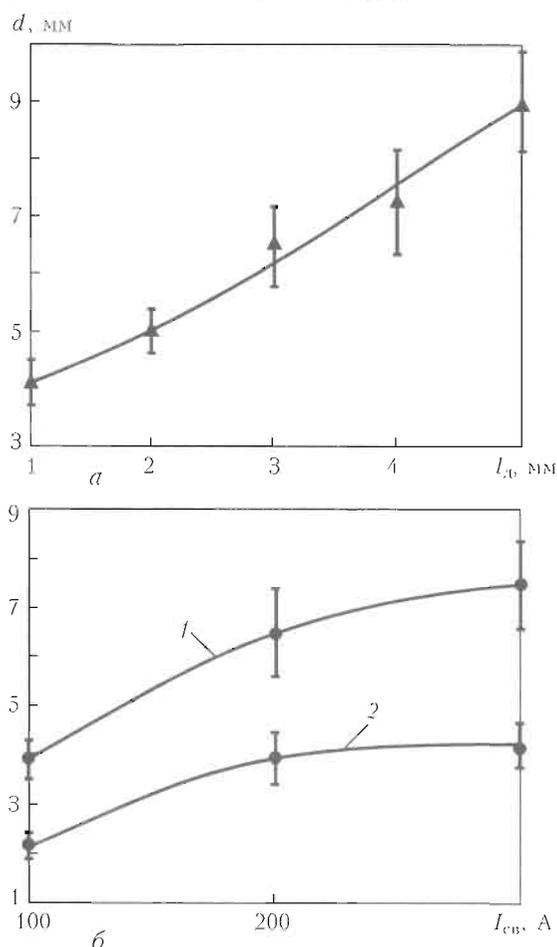


Рис. 1. Зависимость диаметра активного пятна на изделии от расстояния между электродами (а) и тока сварки (б) при  $l_d = 3$  (1) и 1 (2) мм

леноид с сердечником из низкоуглеродистой стали. Обмотка соленоида имела 104 витка медного провода диаметром 2,0 мм. Диаметр анодного пятна на изделии и распределение плотности тока вдоль радиуса пятна определяли с помощью метода разрезного анода, схемы и описание которого приведены в работах [5–8]. В качестве анода использовали две медные пластины толщиной 6 мм с зазором между ними 0,2 мм. Ток через каждую из этих пластин, напряжение дуги, ток в катушке соленоида записывали осциллографом типа К-115. Скорость протяжки бумаги осциллографа составляла 250 мм/с (иногда 125 мм/с). При записи тока через пластины разрезного анода и обработке осциллограмм использовали рекомендации, приведенные в работах [4, 8].

Следует отметить, что, как и в работе [8], иногда наблюдалась задержка активного пятна дуги на первой пластине при переходе через зазор. При этом некоторая часть тока замыкалась через вторую пластину раньше, чем на нее переходило активное пятно дуги. Эти явления имели случайный характер, т. е. в большей части экспериментов оно не наблюдалось. В связи с этим при выполнении каждого эксперимента момент перехода ду-

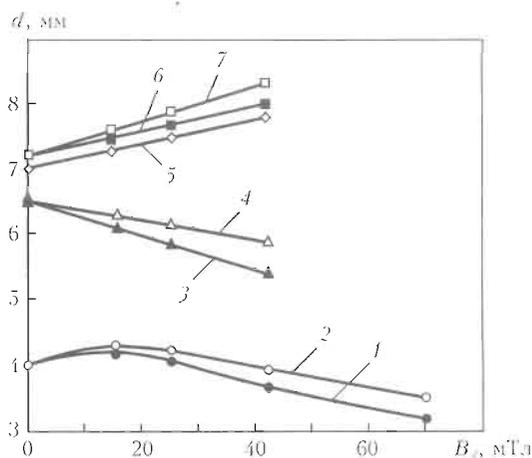


Рис. 2. Влияние индукции ПРМП на диаметр пятна дуги на изделии и диаметр давления дуги: 1, 2 — соответственно постоянное и переменное частотой 50 Гц ПРМП при  $l_d = 1$ ; 3, 4 — то же, что 1, 2, но при  $l_d = 3$  мм; 5 — максимальный диаметр столба дуги при  $l_d = 3$  мм; 6, 7 — диаметр давления дуги соответственно для постоянного и переменного частотой 50 Гц ПРМП при  $l_d = 3$  мм

ги через зазор между пластинами записывали видеокамерой «Panasonic» с частотой 50 кадров/с. Осциллограммы, при снятии которых было явно выражено указанное явление, отбраковывались (не учитывались). В итоге это потребовало выполнения не менее 5...7 экспериментов на каждом режиме и этим обусловлен определенный разброс полученных данных (рис. 1).

В соответствии с рекомендациями работы [4] условный диаметр анодного пятна дуги определяли по площади, через которую протекает 95 % тока дуги. Установлено, что при сварке без ПРМП увеличение расстояния между электродами  $l_d$  приводит к росту диаметра анодного пятна (рис. 1, а) и аналогично этот диаметр возрастает при увеличении сварочного тока (рис. 1, б). При наложении на дугу постоянного и переменного частотой 50 Гц ПРМП при расстоянии между электродами 1 мм осевая компонента индукции возрастает до 15...20 мТл, что приводит к некоторому увеличению диаметра анодного пятна дуги на изделии (рис. 2, кривые 1, 2), при дальнейшем увеличении индукции  $B_z$  диаметр несколько уменьшается. При этом постоянное ПРМП дает больший эффект, чем ПРМП частотой 50 Гц. Если расстояние между электродами составляет 3 мм, то увеличение индукции ПРМП приводит к монотонному незначительному уменьшению диаметра этого пятна (рис. 2, кривые 3, 4). При увеличении индукции как постоянного, так и переменного частотой 50 Гц ПРМП по данным видеосъемки (с частотой 50 кадров/с) максимальный диаметр столба дуги, наблюдаемый на расстоянии 1...1,5 мм от поверхности пластины (анода), при  $l_d = 3$  мм несколько увеличивается (рис. 2, кривая 5).

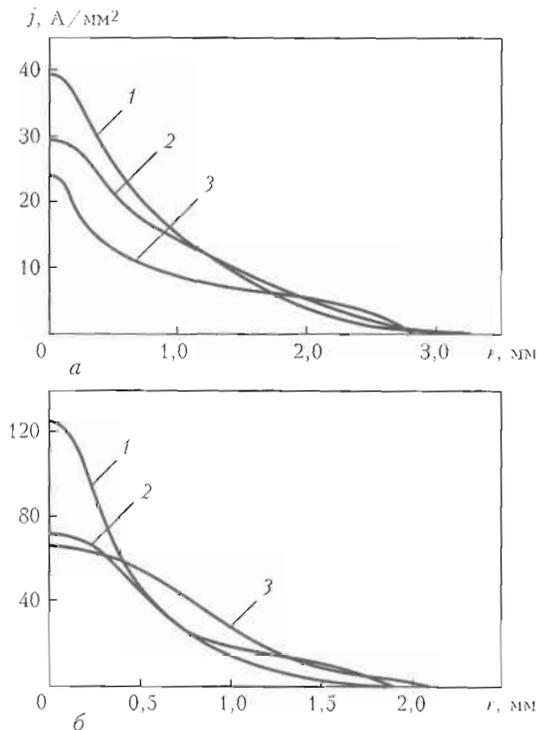


Рис. 3. Распределение плотности тока вдоль оси  $r$  при расстоянии между электродами  $l_1 = 3$  (а) и 1 (б) мм без воздействия ПРМП (1), с воздействием постоянного ПРМП и  $B_z = 25$  мТл (2) и с воздействием частотой 50 Гц ПРМП и  $B_z = 25$  мТл (3)

Распределение плотности тока по пятну дуги на изделии получали обработкой осциллограмм по методике, изложенной в работах [5, 6] (с использованием преобразования Абея). При этом осциллограммы сканировали, их увеличенное изображение обрабатывали на компьютере и вычисляли радиальное распределение плотности тока в пятне дуги по специально разработанной программе. При увеличении индукции постоянного и переменного частотой 50 Гц ПРМП плотность тока в центре анодного пятна существенно уменьшается, а распределение плотности тока по радиусу пятна равномернее, чем при сварке без ПРМП. В периферийной части анодного пятна плотность тока при воздействии ПРМП больше, чем без его воздействия (рис. 3). Для более короткой дуги ( $l_d = 1$  мм) отмеченные изменения в распределении плотности тока значительнее, чем для более длинной дуги ( $l_d = 3$  мм). При воздействии ПРМП центр анодного пятна дуги не свободен от носителей электричества (электронов), как это можно было бы предположить, учитывая форму и поведение дуги в ПРМП [12], а также наличие вакуума в осевой области ее столба при значительных индукциях ПРМП [3,11]. При наложении на дугу ПРМП с частотой в пределах 1...12,5 Гц диаметр анодного пятна имел промежуточные значения относительно наблюдаемых при постоянном ПРМП и при частоте его 50 Гц, приведенных на рис. 2. Аналогично это

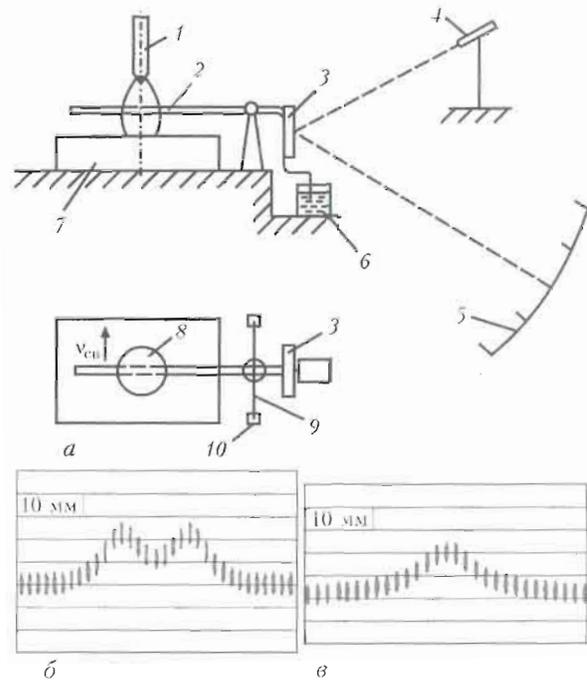


Рис. 4. Схема устройства для измерения силового воздействия дуги (а) и изображение отклонения луча на экране при  $B_z = 42$  (б) и 0 (в) мТл: 1 — электрод; 2 — зонд; 3 — зеркало; 4 — лазерная указка; 5 — экран; 6 — демпфирующее устройство; 7 — изделие; 8 — дуга; 9 — струна; 10 — опоры

наблюдалось в центре анодного пятна и на кривых для распределения плотности тока.

Для изучения распределения газодинамической составляющей давления дуги (скоростного напора плазмы) по радиусу сечения, перпендикулярного оси дуги, а также диаметра этого сечения (диаметра давления) применяли методику, аналогичную изложенной в работе [13]. Датчиком давления являлся цилиндрический зонд из термостойкого немагнитного материала. Схема измерительного устройства\* приведена на рис. 4, а. Зонд 2 жестко крепили к упругой струне 9 диаметром 0,4 мм (перпендикулярно). Струну с натягом закрепляли на опорах 10. При действии давления дуги на зонд 2 струна 9 закручивалась и луч, направленный от лазерной указки 4, отражался от легкого зеркальца 3 и попадал на экран 5, который для усиления чувствительности устройства устанавливали на значительном расстоянии (порядка 2 м) от зеркальца 3. Для исключения колебаний зонда 2 при воздействии дуги в установке предусмотрено демпфирующее устройство б. Процесс отклонения луча (изображение на экране) при прохождении дугой 8 зонда 2 снимали видеокамерой (с частотой 50 кадров/с).

Были опробованы зонды диаметром 1,5 мм из вольфрама, кварца и графита. При сварке на режимах:  $I_{св} = 200$  А,  $l_d = 3$  мм,  $v_{св} = 75$  м/ч максимальную термостойкость имел вольфрам (не оп-

\* Схема устройства предложена сотрудником ИЭС им. Е. О. Патона д-ром техн. наук, проф. И. В. Пентеговым.

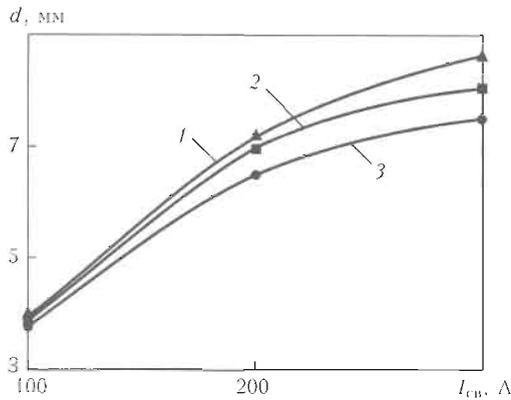


Рис. 5. Зависимость диаметров столба дуги (1), газодинамического давления дуги (2) и активного пятна дуги (3) на изделии при  $l_d = 3$  мм от тока сварки

лавлялся дугой). При этом максимальное отклонение луча на экране было одинаковым, т. е. материал зонда не влиял на исследуемый показатель. Оказалось, что вольфрамовый зонд диаметром 1,0 мм также не оплавливался дугой на указанных режимах. Поэтому, учитывая целесообразность уменьшения диаметра зонда, вводимого в дугу, во всех дальнейших экспериментах использовали зонд указанного диаметра.

Как и в работе [13], тарировку устройства проводили путем воздействия на зонд потоком аргона, который подавался через прямоугольную щель размерами 8×1,5 мм на конце круглой медной трубки. При тарировке обеспечивали ламинарный режим потока аргона. Зонд располагали на расстоянии 0,4...0,5 мм от торца (щели) трубки. Расход газа фиксировали расходомером РС-3. Для определения соотношения между усилием на зонд и отклонением луча на экране к зонду подвешивали гирьки (миллиграммы разновесов). Определяли также необходимый для дальнейшей обработки данных коэффициент лобового сопротивления зонда из формулы

$$F = C_x S_3 \frac{\rho v^2}{2},$$

где  $F$  — сила, действующая на зонд, Н;  $C_x$  — коэффициент лобового сопротивления зонда;  $S_3$  — площадь лобового сопротивления зонда, м<sup>2</sup>;

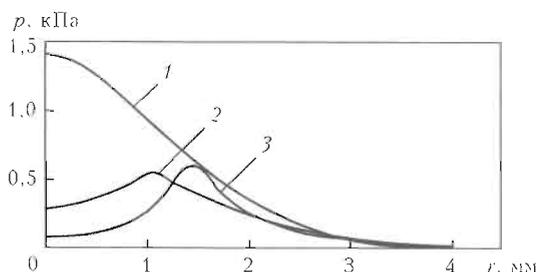


Рис. 6. Распределение газодинамического давления дуги вдоль оси  $r$  при  $l_d = 3$  мм: 1 — без ПРМП; 2 — постоянное ПРМП ( $B_z = 25$  мТл); 3 — переменное с частотой 50 Гц ПРМП ( $B_z = 25$  мТл)

$\rho$  — плотность аргона, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  — скорость потока аргона, м/с.

Расчеты показали, что коэффициент лобового сопротивления зонда  $C_x$  в диапазоне скоростей потока аргона 7...20 м/с имеет практически одинаковое значение.

Типичные изображения на экране процессов отклонений луча во времени при пересечении дугой вольфрамового зонда (рис. 4 б, в) использовали для определения распределения давления по радиусу сечения дуги. Обработку осуществляли по методике, аналогичной изложенной в работе [13] с использованием ЭВМ по специально разработанной программе.

При повышении индукции ПРМП диаметр давления дуги несколько увеличивается аналогично видимому диаметру столба дуги в том же сечении (см. рис. 2). Характерно, что видимый диаметр столба дуги практически совпадает с диаметром давления дуги при заданном значении индукции как постоянного, так и переменного частотой 50 Гц ПРМП (см. рис. 2, кривые 5–7).

Для процесса сварки без воздействия ПРМП по мере увеличения сварочного тока диаметры столба дуги, давления дуги и анодного пятна дуги на изделии возрастают (рис. 5). При этом диаметр активного пятна дуги на изделии несколько меньше, чем диаметры столба дуги и давления дуги. С возрастанием сварочного тока разность (расхождение) между диаметром активного пятна и диаметром давления дуги увеличивается (рис. 5). Аналогичная зависимость наблюдается и при повышении индукции ПРМП (см. рис. 2).

При воздействии как постоянного, так и переменного частотой 50 Гц ПРМП наблюдается существенное уменьшение давления дуги на ее оси. Характерно также, что переменное ПРМП влияет на давление дуги не менее интенсивно, чем постоянное (рис. 6). При увеличении индукции постоянного (и аналогично переменного частотой 50 Гц) ПРМП давление дуги на ее оси уменьшается. Из приведенных на рис. 7, кривая 4, данных для постоянного ПРМП следует, что при индукции порядка 40 мТл и выше на оси дуги имеются отрицательные значения, что некорректно с физической точки зрения. С учетом особенностей, присущих применяемому для измерений методу (методу зондов), полученные отрицательные значения давления дуги объясняются тем, что в зоне дуги, примыкающей к ее оси, плазменный поток направлен от изделия к электроду. Приведенные на рис. 6 положительные и отрицательные значения давления дуги следует представлять как перепады газодинамических давлений, направленных соответственно от электрода к изделию и от изделия к электроду.

Полученные данные позволяют расширить представления о влиянии ПРМП на такие важные

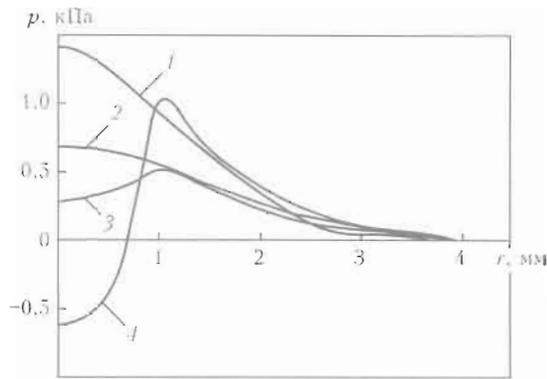


Рис. 7. Распределение газодинамического давления дуги вдоль оси  $r$  при  $l_a = 3$  мм при постоянном ПРМП различной индукции: 1 —  $B_z = 0$ ; 2 — 18; 3 — 25; 4 — 45 мТл

характеристики дуги, как распределение плотности тока в анодном пятне дуги, распределение давления дуги, которые являются определяющими по влиянию на эффективность проплавления основного металла и качество формирования шва с воздействием ПРМП.

**Выводы**

1. При увеличении индукции как постоянного, так и переменного частотой 50 Гц ПРМП диаметр активного пятна дуги на изделии и плотность тока в центре пятна уменьшаются, а распределение плотности тока по радиусу равномернее, чем при сварке без воздействия ПРМП.

2. Методом введения в дугу зонда подтверждены данные, полученные ранее методом стробоскопического отверстия, что при воздействии на дугу постоянного и переменного частотой 50 Гц ПРМП газодинамическое давление дуги снижается на ее оси и повышается в периферийных областях. При индукции ПРМП порядка 40 мТл и выше на оси дуги ее плазменный поток имеет составляющую скорости, направленную от изделия к электроду.

It is demonstrated experimentally, using the split-anode method that at increase of the induction of longitudinal magnetic field in the arc zone the diameter of the active (anode spot) on the product decreases, while current density distribution along its radius is more uniform than in welding without the longitudinal magnetic field. The probe method is used to show that at the magnetic field impact the gas-dynamic pressure in the arc center decreases.

Поступила в редакцию 01.10.2007

1. Сварка с электромагнитным перемещением / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брискман и др. — Киев: Техніка, 1983. — 127 с.
2. Размышляев А. Д. Магнитное управление формированием швов при дуговой сварке. — Мариуполь: Изд. Приазов. гос. техн. ун-та, 2000. — 245 с.
3. Биржес В. А. Теоретические и технологические основы повышения производительности дуговой сварки и наплавки во внешнем аксиальном магнитном поле: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Лидецк, 1997. — 37 с.
4. Гвоздецкий В. С. О функции распределения плотности тока в анодном пятне дуги // Автомат. сварка. — 1973. — № 12. — С. 20-24.
5. Шоек П. А. Исследование баланса энергии на аноде сильноточных дуг, горящих в атмосфере аргона // Современные проблемы теплообмена. — М.; Л.: Энергия, 1966. — С. 110-139.
6. Ерохин А. А., Букаров В. А., Иценко Ю. С. Влияние геометрии вольфрамового катода на некоторые характеристики сварочной дуги и проплавление металла // Свароч. пр-во. — 1971. — № 12. — С. 17-21.
7. Влияние активирующих флюсов на проплавляющую способность сварочной дуги и концентрацию энергии в анодном пятне / О. Е. Островский, В. Н. Крюковский, Б. Б. Бук и др. // Там же. — 1977. — № 3. — С. 3-4.
8. Мечев В. С., Замков В. Н., Прилуцкий В. П. Радиальное распределение плотности тока в анодном пятне аргоновой дуги // Автомат. сварка. — 1971. — № 8. — С. 7-10.
9. A new approach for fluid flow model in gas tungsten arc weld pool using longitudinal electromagnetic control / J. Luo, Q. Luo, Y. H. Lin, J. Xue // Welding J. — 2003. — № 8. — P. 202-206.
10. О формировании сварного шва в продольном магнитном поле при аргонодуговой сварке / В. Н. Селянников, В. А. Блишков, Ю. В. Казаков, В. Н. Баженов // Свароч. пр-во. — 1975. — № 11. — С. 5-7.
11. Матвиш В. И., Сыроватка В. В., Флоринский Ф. Б. Влияние продольного пульсирующего электромагнитного поля на газокинетическое давление дуги // Автомат. сварка. — 1981. — № 5. — С. 6-7, 12.
12. Поведение дуги и перенос электродного металла при сварке в продольном магнитном поле / В. Д. Кузнецов, И. В. Малинкин, В. В. Сыроватка и др. // Там же. — 1972. — № 4. — С. 3-4.
13. Ленивкин В. А., Петров П. И., Дюржеров Н. Г. Определение скорости плазмы сварочной дуги // Свароч. пр-во. — 1984. — № 7. — С. 3-4.
14. Вороний Н. М., Кривизун И. В. Газодинамические характеристики плазменных потоков в сварочных дугах // Магнит. гидродинамика. — 1978. — № 1. — С. 132-136.



## ВЫБОР ПРИПОЕВ ДЛЯ ПАЙКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ

Чл.-кор. НАН Украины В. Ф. ХОРУНОВ, С. В. МАКСИМОВА, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены особенности структуры паяных швов тонколистовых соединений нержавеющей стали, полученных с помощью вакуумной пайки с использованием в качестве припоев меди и никелевых сплавов. Приведены результаты металлографических исследований и механических испытаний паяных соединений. Показана перспективность применения припоев на базе системы Ni-Mn для пайки тонкостенных конструкций, в частности пластинчато-ребристых теплообменников.

*Ключевые слова:* вакуумная пайка, теплообменное устройство, нержавеющая сталь, микроструктура, припой, паяный шов, бор, прочность

Получение неразъемных соединений с помощью вакуумной пайки находит широкое применение во многих отраслях промышленности при изготовлении конструкций различного назначения, в основном, из коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов, суперсплавов, используемых в авиа- и ракетостроении, космической технике, ядерной промышленности.

Пайка в вакууме по сравнению с традиционными способами характеризуется рядом преимуществ. Она превосходит все другие способы и технологии пайки, поскольку благодаря ей достигается практически полное отсутствие каких-либо веществ в атмосфере вакуумной печи. Так, в вакууме при разрежении рабочего пространства  $1,33 \cdot 10^{-4}$  Па на  $1 \text{ см}^3$  печи приходится  $3 \cdot 10^{10}$  молекул, что соответствует точке росы  $-90^\circ\text{C}$ .

Пайка в вакууме позволяет наиболее эффективно повышать температуру распайки соединения за счет испарения легколетучих элементов, входящих в состав припоев (индия, марганца и др.), что создает определенные технологические трудности, которые, однако, полностью компенсируются высоким качеством изделий.

Важнейшая особенность пайки в вакууме — возможность осуществления процесса без применения флюсов. Это позволяет получать соединения высокой прочности, коррозионной стойкости, вакуумной плотности, что приобретает особое значение при изготовлении многих конструкций, в частности, высокоэффективных теплообменных устройств из нержавеющей сталей. Высокая эффективность теплообмена, снижение термических напряжений и уменьшение массы теплообменников достигаются при изготовлении пластинчатых теплообменников из тонколистовых (0,05...0,30 мм) материалов. При

их создании существуют широкие возможности выбора формы каналов и способов интенсификации теплообмена. Степень компактности авиационных пластинчатых теплообменников, под которой понимают отношение площади теплопередающей поверхности к ее объему, доведена до  $4000 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , что гораздо выше, чем у лучших образцов трубчатых теплообменников ( $2275 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ). Для обычных трубчатых конструкций этот показатель составляет  $130...325 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Компактные пластинчатые матрицы имеют меньшую стоимость  $1 \text{ м}^2$  теплопередающей поверхности и более высокий коэффициент теплоотдачи.

Пайка пластинчато-ребристых теплообменников является сложным технологическим процессом, поскольку одновременно получают швы большой протяженности (в теплообменниках могут быть сотни и даже тысячи метров паяных швов) и невозможно исправление дефектов, образующихся внутри конструкции.

Важным элементом технологического процесса пайки пластинчатых теплообменников является состав припоя. Как уже отмечалось выше, теплообменники изготавливают из тонколистовых элементов, при этом эрозивная активность припоя должна быть минимальной. В связи с этим желательно применение припоев с узким интервалом кристаллизации. В данной работе в качестве припоев использовалась медь, эвтектический аморфный припой системы Ni-Cr-Si-B и порошковые припой системы Ni-Mn, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона. При проведении исследований в качестве основного металла использовали нержавеющую сталь 10X18H10T (Fe-(17...19)Cr-(9,0...11)Ni-(1,0...2,0)Mn-( $\leq 0,8$ )Si-( $\leq 0,8$ )Ti-( $\leq 0,12$ )C), температура закалки которой составляет  $1100^\circ\text{C}$ . Во избежание значительного роста зерна и ухудшения механических свойств паяемого металла температура пайки также не должна превышать  $1100^\circ\text{C}$  [1].

Для проведения металлографических исследований и изучения химической неоднородности па-

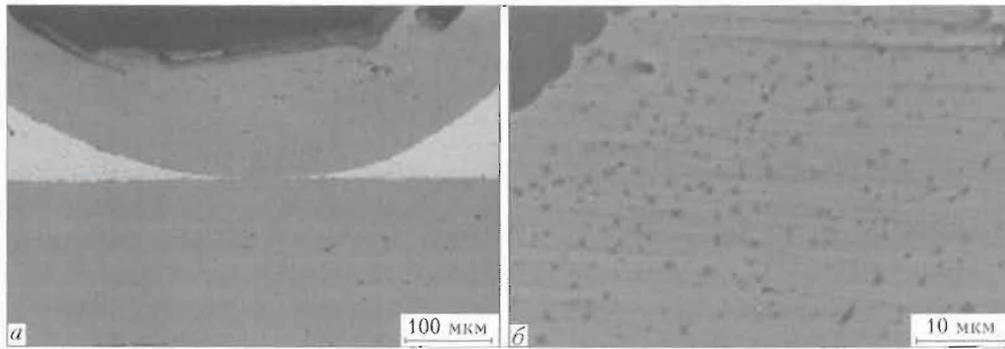


Рис. 1. Микроструктура соединений, полученных пайкой с медью: а — общий вид; б — галтельный участок

яных соединений использовали растровый электронный микроскоп «CamScan», оснащенный рентгеновским микроанализатором системы «Link».

Традиционно для пайки теплообменных устройств из нержавеющей сталей в качестве припоя применяют медь [2], которую в виде фольги или электролитическим путем наносят на паяемый материал тонким слоем толщиной 10...20 мкм. При оптимальной толщине покрытия и режиме пайки она хорошо затекает в капиллярные зазоры, образуя бездефектные соединения (рис. 1). Медь ограничено растворима в железе при высокой температуре, явно выраженная диффузионная зона не обнаруживается [3]. При этом между припоем и основным металлом происходит диффузия и паяный шов представляет собой медную матрицу, упрочненную дисперсными частицами, содержащими железо, хром, марганец, никель (табл. 1, рис. 2).

К недостаткам меди как припоя можно отнести ее проникновение по границам зерен в основной металл, что способствует его охрупчиванию, низкой тепло- и коррозионной стойкости. Это является основной причиной отказа от меди как припоя при пайке пластинчато-ребристых высокотемпературных теплообменников, например авиационных. Однако для других целей (в автомобильной и тракторной промышленности и др.) этот припой ввиду его доступности и дешевизны является вполне приемлемым.

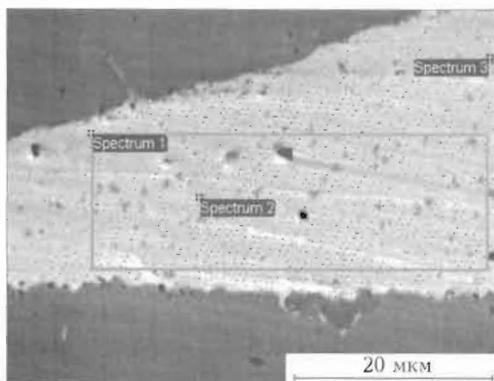


Рис. 2. Микроструктура галтельного участка паяного медью соединения с обозначением анализируемых участков (спектров)

Работы по созданию теплообменных устройств ведутся во многих странах мира как часть глобальной стратегии передачи высоких технологий в промышленность. Опыт ИЭС им. Е. О. Патона в области вакуумной пайки пластинчато-ребристых теплообменников оказался весьма полезным, в том числе и для создания высокопроизводительного оборудования.

Переход при пайке компактных теплообменников к никелевым припоям — сложный и болезненный процесс, который до сих пор не имеет однозначного решения. Существуют два основных пути его решения: один предусматривает использование тонких аморфных припоев с высоким содержанием бора и кремния и соответственно высокой эрозионной активностью; второй — использование малоэрозионно активных припоев, например, на основе системы Ni-Mn.

Установлено [4, 5], что припой с большим количеством бора и кремния не пригодны для пайки тонкостенных (0,1...0,2 мм) конструкций из нержавеющей сталей. Однако применение припоев в аморфном состоянии толщиной 0,03...0,04 мм может способствовать, по мнению некоторых авторов, получению соединений без хрупких фаз. Исследования показали, что при пайке нержавеющей стали никелевыми припоями, содержащими бор, в паяном шве кристаллизуются борсодержащие фазы, например, бориды хрома (рис. 3, а), которые ухудшают пластические свойства паяных соединений и приводят к образованию трещин в галтельных участках (рис. 3, б).

С увеличением выдержки при высокой температуре бор активно диффундирует из металла паяного шва в нержавеющую сталь. Поскольку он не растворяется в никелевой матрице паяного шва, а также в паяемом материале, то боридная

Таблица 1. Содержание (мас. %) химических элементов в галтельном участке паяного соединения при пайке медью

№ спектра	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
1	—	1,25	2,70	1,67	94,38
2	2,22	1,03	10,76	2,33	83,66
3	1,81	0,96	9,05	2,09	86,08

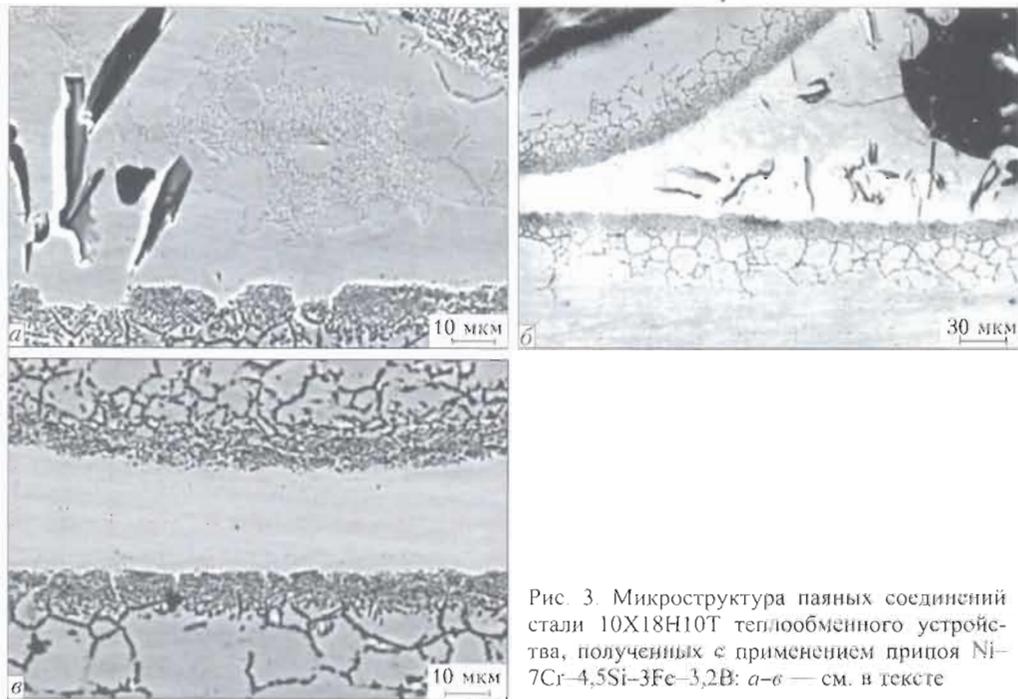


Рис. 3. Микроструктура паяных соединений стали 10X18H10T теплообменного устройства, полученных с применением припоя Ni-7Cr-4,5Si-3Fe-3,2B: а-в — см. в тексте

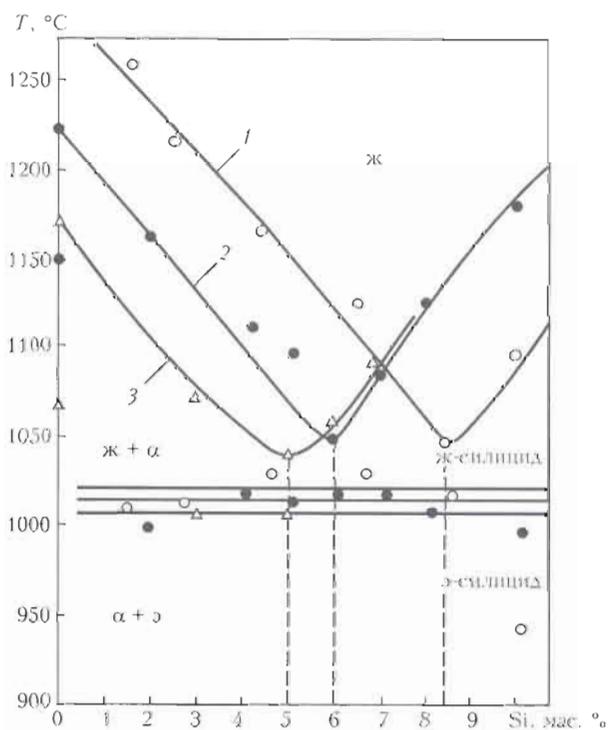


Рис. 4. Сечение поверхностей ликвидуса и солидуса на поли-термических разрезах сплавов системы Ni-Mn-Si, расположенных на изоконцентрациях с 19% Mn (1), 28 (2) и 35 (3)

фаза выделяется по границам зерен основного металла (рис. 3, в), что отрицательно влияет на механические свойства и коррозионную стойкость паяных соединений.

В работе [6] предложен специальный припой для пайки пластинчато-ребристых теплообменников с повышенным содержанием кремния и пониженным — бора. При понятном стремлении авторов к уменьшению содержания бора следует

отметить, что повышение содержания кремния также создает свои проблемы: силициды диссоциируют очень медленно даже при высоких температурах и длительных выдержках. Как следует из работы [6], при использовании борсодержащих припоев, в частности припоя Ni-15Cr-1,4B-7,25Si, уменьшить вероятность образования боридной фазы или растворить ее можно путем применения многоступенчатого режима пайки: нагрева до 1190 °C, выдержки 2,5 ч; охлаждения до 1100 °C и выдержки 3 ч; охлаждения в азоте до 70 °C в течение 30 мин.

Однако приведенный режим термообработки может пагубно сказаться на свойствах нержавеющей стали. Кроме того, с экономической точки зрения такой длительный и энергоемкий процесс неприемлем для производителей пластинчатых конструкций. В связи с этим в настоящее время разрабатываются припой с пониженным содержанием бора или вообще без него.

Исходя из этих посылок, в качестве основы для разработки припоев выбрана система Ni-Mn. Сплавы рассматриваемой системы отличаются малой эрозионной активностью, имеют диаграмму плавкости с температурным минимумом и структуру твердого раствора различной концентрации. Исследовано влияние дополнительного легирования сплавов системы Ni-Mn хромом, железом, бором, кремнием, ванадием и др. Изучены сплавы системы Ni-Mn с содержанием марганца 19...35 мас. %, определено влияние кремния на структуру и интервалы их плавления, установлено положение эвтектической точки для каждой группы сплавов (рис. 4). На основе результатов этих исследований на базе системы Ni-Mn-Cr-Si-Fe разработаны припой ПР-Н58 и ПНС-6

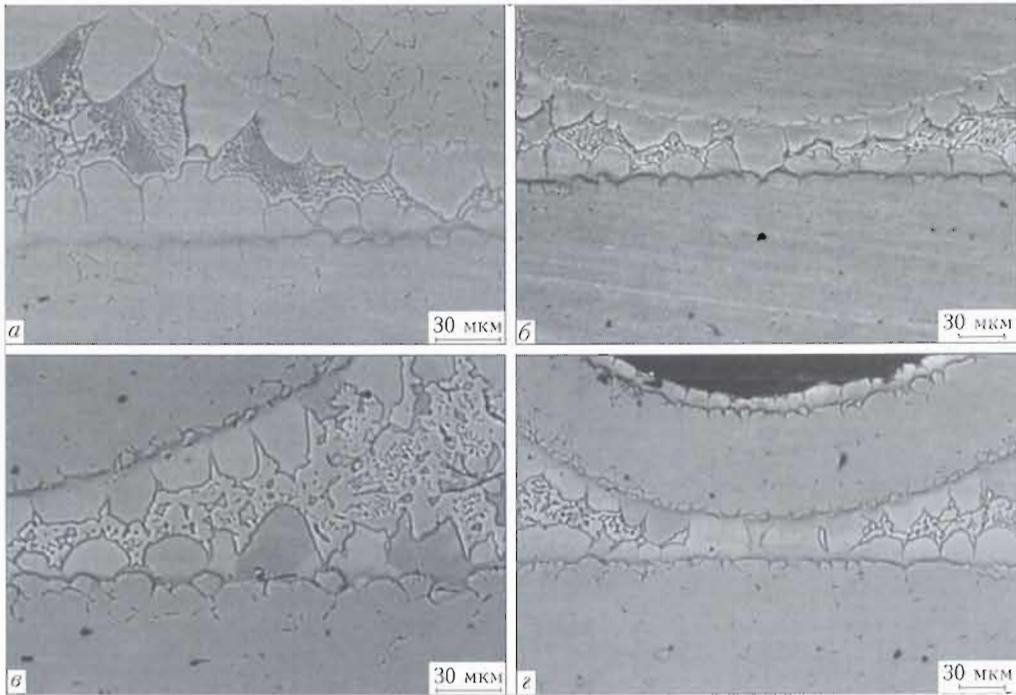


Рис. 5. Микроструктура паяных соединений, полученных с использованием припоев на базе системы Ni-Cr-Mn-Si — ПР-Н58 (а, б) и ПН-6 (в, г): а, в — гальтельный участок; б, г — паяный шов

для пайки нержавеющей стали.

Изучение особенностей формирования паяных соединений в макетах теплообменных устройств, полученных с применением припоев без бора ПНС-6 и ПР-Н58, показали качественное формирование паяных швов, отсутствие трещин и других дефектов (рис. 5).

Исследования химической неоднородности паяных соединений показали, что при пайке припоем ПР-Н58 металл шва, представляющий собой твердый раствор на основе никеля, обогащается элементами основного металла — железом (до 17 мас. %) и хромом (до 8,5 мас. %) (табл. 2, рис. 6).

Количество структурных составляющих металла паяного шва зависит от его ширина, иными словами, от паяльного зазора. Так, при зазоре, не превышающем 30...40 мкм, металл паяного шва представлен только одной структурной составляющей — твердым раствором на основе никеля. В гальтельном участке, где во время пайки находится большое количество жидкого припоя, кристаллизуются структурные составляющие, характерные для припоя, т. е. наряду с твердым раствором образуется эвтектика, состоящая из силицидов (марганца, никеля) и твердого раствора на основе никеля.

Результаты механических испытаний стыковых соединений стали 10X18H10T, полученных при комнатной и повышенной температуре, показали перспективность применения указанных припоев (рис. 7, а). Так, при 500 °С (припой ПР-Н58) прочность стыковых соединений при растяжении составляет 370...400 МПа, при 700 °С она несколько снижается (280...290 МПа). В связи

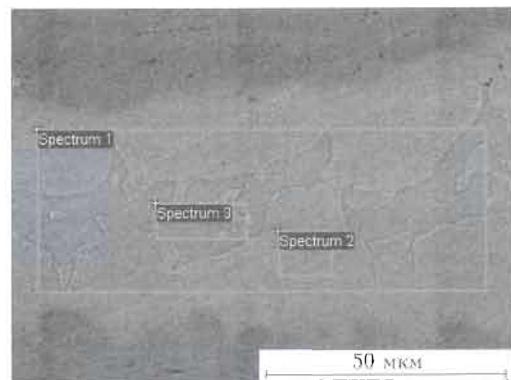


Рис. 6. Микроструктура паяного припоем ПР-Н58 соединения с обозначением спектров соединения

Таблица 2. Содержание (мас. %) химических элементов в шве, полученном с использованием припоя ПР-Н58

№ спектра	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
1	4,39	5,80	28,05	11,50	50,26
2	2,78	8,50	24,06	17,12	47,54
3	6,76	3,03	32,23	4,83	53,15

с тем, что теплообменники эксплуатируются продолжительное время при высоких температурах были проведены испытания на длительную прочность. При температуре 600 °С и нагрузке 200 МПа паяные соединения показали хорошую работоспособность и не разрушались в течение 1358 ч. Прочность паяных соединений, полученных с применением припоя ПНС-6, находится примерно на таком же уровне (рис. 7, б).

Изготовленные пластинчато-ребристые теплообменники из нержавеющей стали с использова-

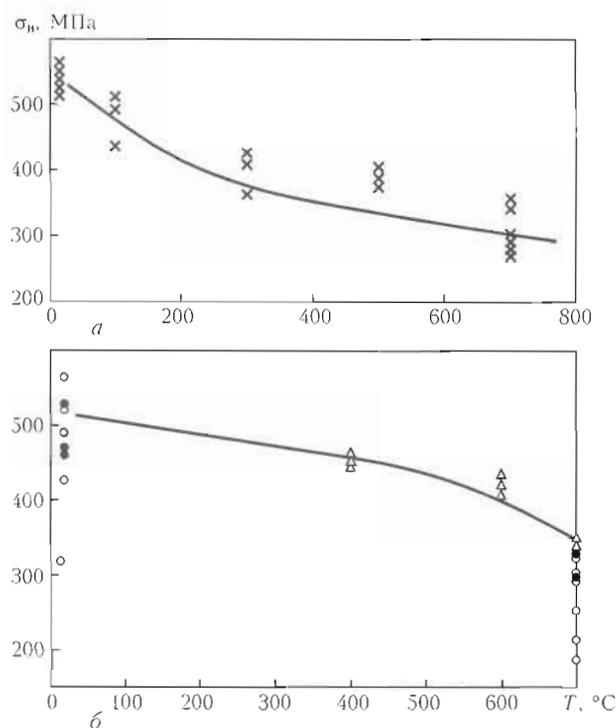


Рис. 7. Зависимость прочности стыковых паяных соединений стали 10X18N10T от температуры испытаний: а — припой ПР-Н58 (температура пайки  $T_{II} = 1100$  °С, 3 мин); б — припой ПНС-6 (○ —  $T_{II} = 1080$  °С, 3 мин; ● —  $T_{II} = 1080$  °С, 10 мин; Δ —  $T_{II} = 1100$  °С, 3 мин)

нием припоя ПР-Н58 успешно прошли испытания на герметичность, эффективность теплообмена и коррозионную стойкость в условиях коррозионно-активного теплоносителя [7]. При этом теплоноситель сохранял оптическую прозрачность. Такие теплообменники могут длительно работать в автономном режиме на отдаленных объектах под периодическим наблюдением обслуживающего персонала.

Недостатком технологии пайки является то, что порошковые припои использовались в виде пасты или суспензии, альтернативой которым должны стать припои в аморфном виде.

The paper deals with the structural features of braze welds on sheet joints of stainless steel, produced by vacuum brazing using copper and nickel alloys as braze alloys. Results of metallographic examination and mechanical testing of brazed joints are given. The good prospects for application of braze alloys based on Ni-Mn system for brazing thin-walled structures, in particular, plate-finned heat exchangers, are demonstrated.

## Выводы

1. Применение эвтектических аморфных припоев системы Ni-Cr-B-Si создает опасность образования хрупких фаз и трещин даже при пониженном (1,4 мас. %) содержании бора. Устранить нежелательные последствия этого за счет термообработки при пайке тонкостенного металла практически невозможно.

2. Для пайки тонкостенных конструкций из нержавеющей стали, в частности пластинчаторебристых теплообменников, наиболее целесообразно применение малоактивных припоев системы Ni-Mn. Существенным недостатком таких припоев является то, что они применяются в виде порошка, что создает ряд проблем, особенно при пайке в вакууме. Необходимо провести дальнейшие исследования по оптимизации химического состава этих припоев с целью повышения их склонности к аморфизации.

3. Медь как припой по-прежнему является перспективным материалом для пайки широкого спектра теплообменных устройств, эксплуатирующихся при температуре не более 500 °С.

1. Химичин Ф. Ф. Нержавеющие стали. — М.: Металлургия, 1967. — 798 с.
2. Машиностроение: Энцикл. / Под ред. Б. Е. Патона: В 40 т. — Т. III-4: Технология сварки, пайки и резки. — М.: Машиностроение, 2006. — 767 с.
3. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справ.: В 3 т. — М.: Машиностроение, 1997. — Т. 2. — 1024 с.
4. Lugscheider E., Partz K. High temperature brazing of stainless steel with nickel-base filler metals BNi2, BNi5 and BNi7 // Welding J. — 1983. — 62, № 6. — P. 160-164.
5. Lamb S., Miller F. The effects of aggression by nickel-base filler metals // Ibid. — 1969. — 48, № 7. — P. 283-289.
6. Rabinkin A., Wenski E., Ribaud A. Brazing stainless steel using a new MBF-series of Ni-Cr-B-Si amorphous brazing foils // Welding J. — 1998. — № 2. — P. 66-75.
7. Хорупов В. Ф., Максимова С. В. Вакуумная пайка тонколистовых металлов // Сб. докл. 7-й Междунар. конф. «Вакуумные нанотехнологии и оборудование», г. Харьков, 2-6 окт. 2006 г.: — В 2 т. — Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006. — Т. I. — С. 62-65.

Поступила в редакцию 07.06.2007, в окончательном варианте 15.10.2007

## СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕВРАЩЕНИЙ АУСТЕНИТА В СВАРНЫХ ШВАХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Чл.-кор. НАН Украины Г. М. ГРИГОРЕНКО, В. А. КОСТИН, В. Ю. ОРЛОВСКИЙ, кандидаты техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализированы математические модели, описывающие диаграммы изо- и анизотермического (термокинетического) превращений аустенита в сварных швах низколегированных сталей, с целью их возможной экспериментальной проверки на комплексе физической имитации процессов сварки и термической обработки металлов «Gleeble-3800».

*Ключевые слова:* дуговая сварка, низколегированные стали, металл шва, диаграмма превращений аустенита, моделирование фазового состава

В практике термомеханической обработки сталей широко используются диаграммы изотермического (ИРА) и анизотермического распада аустенита (АРА) [1, 2]. Диаграммы ИРА дают много сведений о характере превращений, но на практике изотермичность достичь довольно сложно. В случае очень быстрого превращения распад аустенита происходит непосредственно на этапе достижения заданной температуры [3], поэтому ИРА диаграммы для времени выдержки менее 10 с не точны. При обработке крупных изделий не достигается основное условие, необходимое для построения диаграмм ИРА, — быстрое охлаждение до заданной температуры. В связи с этим для практических целей диаграммы ИРА уступили место диаграммам АРА (неизотермическим).

В настоящее время условия охлаждения сварных швов хорошо изучены [4, 5]. На основании экспериментальных результатов построены математические модели, адекватно описывающие температуры и скорости охлаждения в различных участках сварного шва. Поэтому в лабораторных условиях можно имитировать охлаждение небольшого образца, температурный режим которого соответствует охлаждению при различных видах и режимах сварки, разному размеру изделий, влиянию различных сред.

Учет ИРА и АРА диаграмм, построенных для низколегированных сталей, является важным фактором для прогнозирования структурно-фазового состояния сварных швов, формирующегося при сварке. Для построения таких диаграмм было проведено много экспериментов [6, 7]. Тем не менее широкий диапазон использования легирующих элементов в сталях наряду с сильной чувствительностью диаграмм АРА к изменению их сос-

тава и влиянием размера зерна означают невозможность создания достаточного количества диаграмм для их практического использования.

В последнее десятилетие была проведена большая работа по разработке математических моделей, которые позволили бы вычислять ИРА и АРА диаграммы для сталей. Почти все без исключения модели ограничиваются использованием их для углеродистых и низколегированных сталей.

Существуют многочисленные публикации, описывающие превращения в сталях, но из них только малая часть пригодна для вычисления ИРА и АРА диаграмм. В работах [8, 9] показано, что вполне возможно точно рассчитать ИРА и АРА диаграммы для низколегированных сталей. В этой модели не делалось различия между диффузионным и промежуточным превращением. Модифицируя уравнения, предложенные Зенером и Хиллертом [10, 11], Киркалди [12] построил модель, позволяющую вычислять количество феррита и перлита, и получил следующее выражение для времени изотермического превращения:

$$\tau_{ITT} = \frac{1}{2^{(N/8)}(\Delta T)^3} \exp \left\{ \frac{Q_{eff}}{RT} \right\} \sum_{j=1}^m \alpha_j C_j \quad (1)$$

где  $N$  — балл зерна в системе ASTM;  $Q_{eff}$  — эффективная энергия активации диффузии;  $\Delta T$  — значение переохлаждения, ниже которого аустенит становится нестабильным (температура  $A_{c3}$ );  $C_j$  — концентрация  $j$ -го элемента;  $\alpha_j$  — константа для каждого элемента.

Значения  $Q_{eff}$  и  $\alpha_j$  были определены экспериментально, подгоняя кривую (1) к экспериментально наблюдаемой кривой ИРА превращения. В результате формула приняла следующий вид [12] (количество каждого элемента принимается в мас. %):

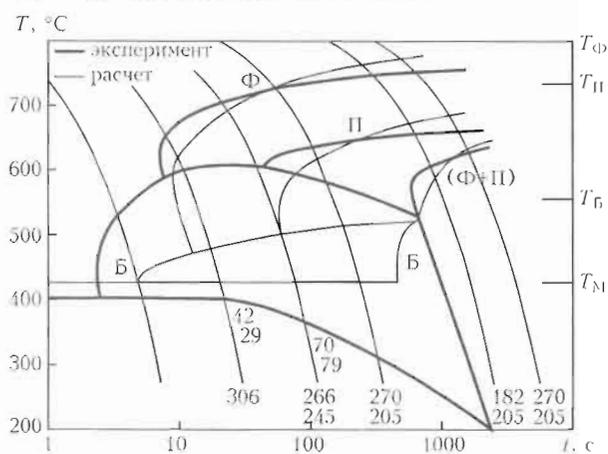


Рис. 1. Сравнение расчетной (сталь 36Cr6) и экспериментальной [12] АРА диаграмм

$$\tau_{0.1\%} = \frac{\exp \{2000/T\}}{2^{(N/8)}(Ae_3 - T)^3} \times (60\% \text{ C} + 90\% \text{ Si} + 160\% \text{ Cr} + 200\% \text{ Mo}). \quad (2)$$

В дальнейшем [12] модель была расширена для моделирования С-кривых превращения перлита и бейнита (рис. 1) и позволила вычислить количество продуктов превращения как функцию времени и температуры:

$$\tau_{\Phi} = \frac{60\% \text{ Mn} + 2\% \text{ Ni} + 68\% \text{ Cr} + 244\% \text{ Mo}}{6 \cdot 2^{(N/8)}(\Delta T)^3 D_{\Phi}} I, \quad (3)$$

$$\tau_{\Pi} = \frac{1.8 + 5.4(\% \text{ Cr} + \% \text{ Mo} + 4\% \text{ Mo} \cdot \% \text{ Ni})}{6 \cdot 2^{(N/8)}(\Delta T)^3 D_{\Pi}} I, \quad (4)$$

$$\tau_{\text{Б}} = \frac{(2.3 + 10\% \text{ C} + 4\% \text{ Cr} + 19\% \text{ Mo})10^{-4}}{6 \cdot 2^{(N/8)}(\Delta T)^2 D_{\text{Б}}} I, \quad (5)$$

где  $I = \int_0^X \frac{dX}{X^{2(1-X)/3}(1-X)^{2X/3}}$ ; X — объемная доля

структурных составляющих;  $D_{\Phi}$ ,  $D_{\Pi}$ ,  $D_{\text{Б}}$  — коэффициенты диффузии соответственно феррита, перлита и бейнита.

Если рассчитана ИРА диаграмма, то по правилу аддитивности Киркалди [13] ее можно трансформировать в АРА диаграмму.

Позднее Бхадешчи [14, 15] использовал другую методологию для определения точек начала превращения феррита и бейнита и сооставил свою модель с экспериментом (рис. 2). В дальнейшем модель Бхадешчи была усовершенствована Ли [16] с целью расширения границ ее применимости для несколько больших концентраций, чем применяемых в низколегированных сталях.

Одним из недостатков этих моделей было использование термодинамики разбавленных растворов при вычислении температур превращения для среднелегированных, инструментальных и нержавеющей сталей.

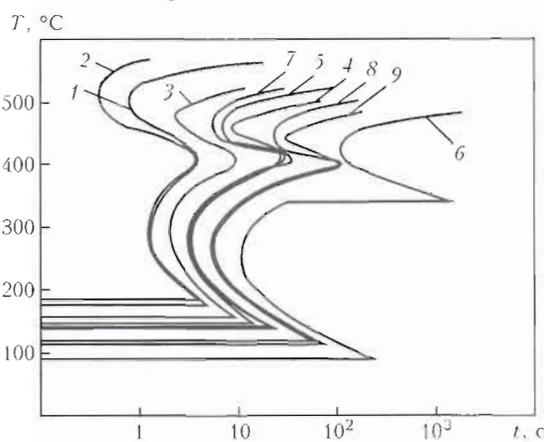


Рис. 2. Расчетные кривые изотермического превращения для ряда сталей [15]: 1 — Fe-0,4C; 2 — Fe-0,4C-2Si; 3 — Fe-0,4C-1Ni; 4 — Fe-0,4C-2Ni; 5 — Fe-0,4C-1Mn; 6 — Fe-0,4C-2Mn; 7 — Fe-0,4C-2Cr; 8 — Fe-0,4C-1Mn-1Cr; 9 — Fe-0,4C-1Mn-1Ni

В работе [17] была предпринята попытка объединения более общих термодинамических моделей с кинетическими для определения возможностей расширения диапазона составов сталей при прогнозировании их АРА диаграмм. Модель Киркалди была выбрана за основу, а эмпирические параметры могли легко контролироваться и изменяться.

Помимо указанных выше моделей, в той или иной степени учитывающих реальные процессы, которые связаны с термодинамикой и кинетикой превращения, существует ряд чисто эмпирических моделей, основанных на обработке экспериментальных результатов. Так, ряд исследователей [18, 19] использует уравнения Авраами для описания структурных составляющих:

$$M = 100(1 - \exp(-k_M w^{n_M})), \quad (6)$$

$$\Phi_{\text{П}} = 100 \exp(-k_{\Phi} w^{n_{\Phi}}), \quad (7)$$

$$B = 100 - M - \Phi_{\text{П}}, \quad (8)$$

где M,  $\Phi_{\text{П}}$ , B — количество соответственно мартенсита, феррито-перлита, бейнита в структуре, мас. %; w — скорость охлаждения;  $k_M$ ,  $k_{\Phi}$ ,  $n_M$ ,  $n_{\Phi}$  — константы (для низколегированных сталей типа 10Г2ФБ  $k_M = 0,0021$ ,  $k_{\Phi} = 1,2$ ,  $n_M = 0,487$ ,  $n_{\Phi} = 0,8$ ).

Проанализировав более ста термокинетических диаграмм распада аустенита низколегированных сталей [7, 20], были предложены модели для оценки доли структурных составляющих в структуре металла ЗТВ:

$$M(\tau) = 1 - \Phi[(\ln \tau - \ln \tau_M) / \ln S_M], \quad (9)$$

$$\Phi_{\text{П}}(\tau) = \Phi[(\ln \tau - \ln \tau_{\Phi\text{П}}) / \ln S_{\Phi\text{П}}], \quad (10)$$

$$B(\tau) = 1 - M(\tau) - \Phi_{\text{П}}(\tau), \quad (11)$$

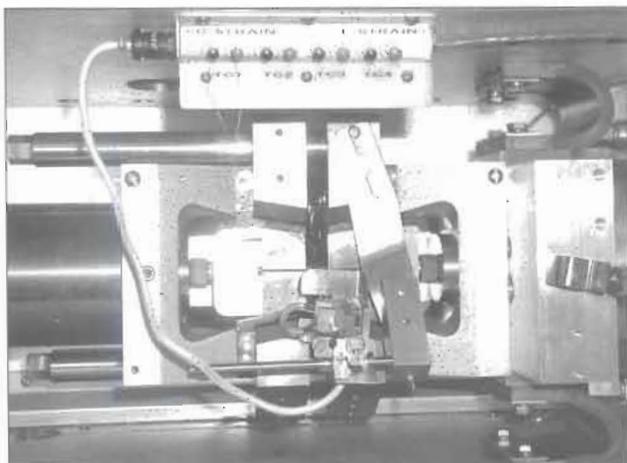


Рис. 3. Внешний вид рабочей камеры установки «Gleeble-3800»

где  $\tau$  — длительность охлаждения от 800 до 500 °С;  $\Phi(z) = 0,5[1 + \text{erf}(z/\sqrt{2})]$  — интегральная функция нормального распределения;  $\tau_M, \tau_{ФП}$  — длительности охлаждения, при которых образуется соответственно 50 % мартенсита или ферритно-перлитной структуры;  $S_M, S_{ФП}$  — константы, характеризующие крутизну кривых изменения содержания мартенсита или ферритно-перлитной структуры при увеличении времени охлаждения.

Просуммировав все изложенное выше, следует, что для построения модели распада аустенита, адекватно описывающей процессы распада в металле швов низколегированных сталей, необходимо получение значительного количества экспериментальных результатов как для определения температур начала и конца формирования структурных составляющих, образующихся в процессе распада аустенита, так и металлографического определения количества продуктов распада. Большое количество материальных и временных затрат часто делает эту задачу трудновыполнимой, однако наличие в ИЭС им. Е. О. Патона самого современного на данный момент комплекса «Gleeble-3800» позволяет ее успешно решить.

Установка «Gleeble-3800» является комплексом (рис. 3), предназначенным для физической имитации процессов сварки, горячей деформации металлов (прокатка, ковка, осадка), а также имитации термической обработки металлов. Испытания на горячее сжатие и растяжение можно проводить как при постоянном, так и переменном значении прилагаемой силы, при этом максимальная сила сжатия может кратковременно достигать 20 т, а максимальное усилие при растяжении образцов до 10 т при температурах нагрева металла до 2000 °С. Данные испытания позволяют определить не только степень деформации металла в зависимости от приложенной силы и температуры, но и параметры процесса, при которых становится возможным возникновение горячих тре-

щин. Скорость деформации при сжатии может достигать 1 м/с.

При имитации процессов термообработки металлов, а также исследовании процессов плавления и кристаллизации максимальная температура нагрева кратковременно может достигать 3000 °С, скорость нагрева и охлаждения до 10000 °С/с. Охлаждение образцов проводится как изнутри образцов, так и снаружи, охлаждающие среды — вода или воздух. Все исследования можно проводить в контролируемой атмосфере.

Наличие в комплексе высокоскоростного дилатометра с индукционным датчиком высокой чувствительности позволяет строить диаграммы термокинетического превращения в автоматическом режиме, что значительно ускоряет время получения и обработки экспериментальных результатов.

Таким образом, в настоящее время созданы все предпосылки для успешного создания и развития математической модели распада аустенита. Результаты, полученные с помощью установки «Gleeble-3800», будут положены в основу базы данных по кинетике термокинетического распада аустенита в сварных швах низколегированных высокопрочных сталей с целью определения как эмпирических коэффициентов, используемых для описания кинетики распада, так и уточнения температурных интервалов превращения характерных структурных составляющих, длительности превращения и конечного структурно-фазового состояния металла шва.

1. Гуляев А. П. Термическая обработка стали. — М.: Машгиз, 1960. — 495 с.
2. Носиков И. И. Теория термической обработки металлов. — М.: Металлургия, 1978. — 389 с.
3. Гуляев А. П. Металловедение. — М.: Металлургия, 1986. — 542 с.
4. Грабин В. Ф. Металловедение сварки плавлением. — Киев: Наук. думка, 1982. — 415 с.
5. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
6. Попов А. А., Попова Л. Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. — М.: Металлургия, 1965. — 495 с.
7. Seyffarth P., Meyer B., Scharff A. Großer Atlas schweiß-  
ZUG-Schaubilder. — Düsseldorf: Deutscher Verlag für  
Schweißtechnik, DVS-Verl., 1992. — 176 S.
8. Kirkaldy J. S., Tomson B. A., Baganis E. A. Hardenability  
concepts with applications to steel. — Warrendale, PA:  
AIME, 1978. — 82 p.
9. Kirkaldy J. S., Venugopalan D. Phase transformations in fer-  
rous alloys / Eds A. R. Marder, J. I. Goldstein. — AIME,  
Warrendale, PA: AIME, 1984. — 125 p.
10. Zener C. Kinetics of the decomposition of austenite // Trans.  
AIME. — 1946. — 167. — P. 550-555.
11. Hillert M. Thermodynamics and kinetics isothermal trans-  
formation in steel // Jernkont. ann. — 1957. — 141. — P. 758-  
767.
12. Kirkaldy J. S. Diffusion-controlled phase transformation in  
steel. Theory and applications // Scand. J. Met. — 1991. —  
20. — P. 51-61.
13. Kirkaldy J. S. Advances in phase transformation. — Oxford:  
Pergamon press, 1988. — 238 p.



14. Bhadeshia H. K. D. H. Developments in martensitic and bainitic steels: role of the shape deformation // *Metal Sci.* — 1981. — 15. — P. 175.
15. Bhadeshia H. K. D. H. A thermodynamic analysis of isothermal transformation diagrams // *Ibid.* — 1982. — 16. — P. 159–165.
16. Lee J.-L., Bhadeshia H. K. D. H. Computer simulation of microstructural evolution in thermomechanical processing of steel plate // *Mater. Sci. Eng. A.* — 1993. — 171. — P. 223.
17. The calculation of TTT and CCT diagrams for general steels / N. Saunders, Z. Guo, X. Li et al. <http://www.msm.cam.ac.uk>
18. Захарова И. В. Снижение дефектности сварных соединений низколегированных сталей путем оптимизации технологии сварки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Мариуполь, 2001. — 20 с.
19. Пекарска В. Математическое моделирование структуры металла ЗТВ при лазерной сварке // *Материалы конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»*, Киев-ли, 16–20 сент. 2002. — С. 114–117.
20. Seyffarth P., Kasatkin O. Calculation of structural transformation in the welding process. — [1982]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IIW-IX-82).

Mathematical models describing the CCT and TTT diagrams plotted for the welds on low-alloy steels are analysed with a purpose of their possible experimental verification by using the «Gleeble-3800» unit for physical simulation of the metal welding and heat treatment processes.

Поступила в редакцию 16.07.2007

## ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

**15–18 апреля 2008 г.** в Санкт-Петербурге при поддержке Северо-Западного Федерального округа и Комитета экономического развития, промышленной политики и торговли Санкт-Петербурга состоится 10-я Международная практическая конференция «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки». Организаторы: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет и НПФ «Плазмацентр».

### Основные направления конференции:

- ✓ технологии диагностики и дефектации, мойки и очистки, восстановления заданной геометрии, упрочнения и восстановления свойств поверхности, механической обработки нанесенных покрытий, окраски и консервации;
- ✓ масла, смазки, клеи и герметики;
- ✓ процессы трения и изнашивания, защита от коррозии, конструкционные и эксплуатационные методы повышения долговечности.

### В рамках конференции будут проходить:

- ✓ школа-семинар «Все методы повышения стойкости инструмента, штампов, прессформ и другой технологической оснастки», где будет рассказано об основных механизмах износа и упрочнения, о рациональном выборе материала инструмента и технологической оснастки, о видах, свойствах и областях применения износостойких покрытий на инструменте, будет продемонстрирован новый процесс финишного плазменного упрочнения с нанесением алмазоподобного покрытия, способный за несколько минут обработки изделий многократно повысить их стойкость;
- ✓ школа-семинар «Наплавка и напыление — выбор технологии, оборудования и материалов», где слушатель узнает о видах износа и повреждений деталей, о преимуществах и недостатках, технико-экономических показателях различных способов наплавки и напыления, об отечественных и зарубежных фирмах, изготавливающих оборудование и материалы для наплавки и напыления.

*Аудитория конференции и школ-семинаров — это представители крупных и средних промышленных предприятий, специалисты научных организаций и высшей школы.*

Более подробную информацию о предстоящей конференции и школах-семинарах можно узнать на сайте [www.plasmacentre.ru/conf](http://www.plasmacentre.ru/conf).

Реквизиты организатора: НПФ «Плазмацентр», 195196, Санкт-Петербург, Таллиннская ул., д. 7А, оф. 16  
Тел./факс: (812) 4452496, (901) 3043191, (812) 5287484  
E-mail: [info@plasmacentre.ru](mailto:info@plasmacentre.ru), [office@plasmacentre.ru](mailto:office@plasmacentre.ru)

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СВАРНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ С ДВОЙНОЙ СТЕНКОЙ

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

Рассмотрена задача повышения надежности двухстенчатых резервуаров для хранения нефти. Показано, что установка на нижних поясах основной и вспомогательной стенки специальных бандажей не решает полностью поставленной задачи. Предложено повышать надежность основной стенки путем применения к оценке качества листового проката деформационного критерия раскрытия вершины дефекта  $K_c$ , которому удовлетворяют стали нового поколения — ниобийсодержащие стали контролируемой прокатки. Существенное увеличение вязкостных свойств листового проката стенки позволит гарантированно обнаруживать и устранять дефекты в докритическом их состоянии на основной стенке.

*Ключевые слова:* сварные конструкции, резервуары с двойной стенкой, ниобийсодержащие стали, трещиностойкость, вязкие разрушения, критерии хрупкости

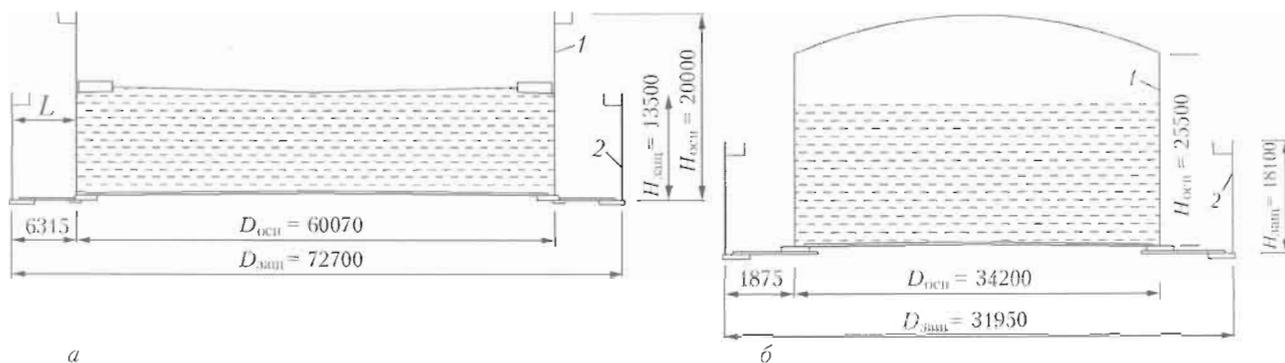
Увеличение мощностей заводов по переработке нефти в процессе их модернизации на основе новейших технологий и недостаточная стабильность цен на нефть на мировом рынке диктуют необходимость увеличения вместимости существующих сырьевых нефтепарков. В то же время постоянное повышение стоимости земли и стесненность прилегающих к нефтебазам территорий вызывает необходимость поиска нетрадиционных способов возрастания вместимости нефтепарков без увеличения площади их застройки.

В последние годы наблюдается тенденция отказа от устройства земляного или железобетонного обвалования вокруг емкостей путем строительства резервуаров с двойной стенкой типа «стакан в стакане» [1]. В этом случае емкость состоит из двух резервуаров: внутреннего (основного) и наружного (защитного). Последний резервуар предупреждает разлив нефти за пределы защитной стенки при локальных или лавинных разрушениях основного резервуара. Если вопрос локализации разлива нефти в пределах стенки защитного резервуара при местных разрушениях основной стенки не вызывает сомнения, то вопрос работоспособности защитной стенки при протяженном вязком (лавинообразном) разрушении основной стенки требует отдельного рассмотрения.

Гипотетически мгновенное разрушение стенки основного резервуара по всей ее высоте может быть хрупким или вязким. Для хрупкого разрушения характерно отсутствие деформаций на кромках разрыва у сталей с низкими значениями ударной вязкости. Движущей силой хрупкого разрушения является упругая энергия стенки (энергия Гука). Высокие требования к минимальным значениям ударной вязкости (по Шарпи), способу

выплавки и химическому составу сталей для стенки резервуаров и сварных соединений в действующих нормах ведущих стран [2–4] позволили практически полностью исключить хрупкие разрушения. Зарождение и развитие хрупкой трещины в стенке возможно только в локальных местах с низкими вязкими свойствами или в участках, где высокие вязкие свойства не могут реализоваться. В частности, это могут быть области с наличием объемного напряженного состояния, характерного для мест с наклепом поверхностного слоя вследствие ударных воздействий, участков сварных швов с трещиноподобными дефектами или закалочными структурами. При наличии в вершине дефекта в сварном шве двухосного и особенно трехосного напряженного состояния возникают благоприятные условия для зарождения и развития хрупкой трещины. В этом случае стесненность развития деформаций не позволяет реализоваться высоким пластическим свойствам материала стенки.

В процессе развития хрупкая трещина выходит за пределы дефекта. Там начинают проявляться высокие пластические свойства материала стенки и его сварных соединений. Трещина переходит в квазихрупкую, а затем и в вязкую. Скорость подрастания вязкой трещины и ее критическая длина определяются значением ударной вязкости материала стенки, нормируемыми действующими стандартами. Многолетний опыт эксплуатации резервуарных парков в Украине, России и других странах показывает, что принятые в нормах [2–4] правила выбора марки стали и ее ударной вязкости в сочетании с правилами эксплуатации емкостей обеспечивают требуемую работоспособность на протяжении всего гарантированного срока службы резервуаров обычной конструкции. При наличии обвалования вокруг резервуаров персонал технического надзора имеет хорошие возможности для ежедневного визуального осмотра всех емкостей, что позволяет с достаточной



Схемы резервуаров конструкции «стакан в стакане» вместимостью 50 (а) и 20 тыс. м<sup>3</sup> (б): 1, 2 — соответственно стенка основного и защитного резервуара; L — расстояние между стенками

степенью вероятности визуально выявлять на наружной поверхности стенки сквозные дефекты длиной 10...50 мм, т. е. до их критических значений.

Применение резервуаров конструкции типа «стакан в стакане» существенно ухудшает условия планового ежедневного контроля технического состояния внутреннего (основного) резервуара.

На рисунке приведены схемы некоторых проектных решений резервуаров с двойной стенкой вместимостью 20 и 50 тыс. м<sup>3</sup>. Резервуар вместимостью 20 тыс. м<sup>3</sup> имеет основную стенку высотой  $H_{осн} = 22,5$  м и защитную  $H_{защ} = 18,1$  м при расстоянии между ними  $L \approx 2,0$  м. В резервуаре вместимостью 50 тыс. м<sup>3</sup> принято  $H_{осн} = 20,0$  м и  $H_{защ} = 13,5$  м при расстоянии между ними  $L \approx 5,4$  м. Если на резервуаре вместимостью 50 тыс. м<sup>3</sup> условия визуального осмотра основной стенки с кольцевой площадки, расположенной по верху защитной стенки, можно считать в определенной степени приемлемыми, то выполнить качественный осмотр стенки для резервуара вместимостью 20 тыс. м<sup>3</sup> при  $L \approx 2,0$  м весьма затруднительно. Усложняет осмотр патрубков люков и подводящих трубопроводов в нижнем поясе возможность загазованности пространства между стенками и наличие отложений снега зимой.

Изменения установившихся условий технического надзора за состоянием работоспособности стенки основного резервуара необходимо учитывать при разработке его основных технических решений и правил эксплуатации.

Распространено мнение, что защитная стенка в состоянии не только локализовать разлив нефти при местном повреждении основного резервуара, но и воспринять гидравлический удар при лавинном разрушении основной стенки. В ряде случаев в процессе проектирования такая способность защитной стенки обосновывается расчетами и установкой специальных бандажей. При этом не до конца анализируется то обстоятельство, что при лавинном разрушении нагрузка на дополнительную стенку прикладывается локально, вдоль од-

ной из образующих на всю высоту. Движущей силой вязкой трещины после достижения критической длины будет давление на ее берега столба вытекающей жидкости (нефти или другого продукта хранения), расположенной выше трещины. При раскрытии берегов в вершине трещины образуется ядро текучести, в котором материал стенки последовательно течет, упрочняется и по достижению  $\sigma_{вр}$  происходит его разрыв. Затем наступает новый цикл с образованием новой зоны пластичности [5, 6]. Скорость движения вязкой трещины в резервуарах зависит от давления на ее берега истекающей нефти, а в магистральных газопроводах от давления истекающего газа [5]. Натурными испытаниями для магистральных газопроводов установлено, что при давлении в трубе 6...7 МПа скорость трещины составляет 250...300 м/с [7]. Для резервуаров нет таких прямых данных. На основании описания отдельных случаев лавинных разрушений резервуаров [7] при давлении на берега вязкой трещины 0,10...0,15 МПа разрушения происходили в пределах 1 с. Истекающий из раскрывшейся трещины продукт хранения динамически будет воздействовать на вспомогательную стенку по одной из образующих. Являясь тонкостенной оболочкой, при таком нагружении стенка мгновенно теряет устойчивость и принимает форму вытянутого эллипса. Не исключается, что при этом произойдет и разрыв стенки по образующей. Поиски решений по приданию вспомогательной стенке дополнительной жесткости и прочности для восприятия динамического воздействия истекающей жидкости, по нашему мнению, могут привести только к значительным затратам металла, без получения достаточных гарантий работоспособности дополнительной стенки при лавинном вязком разрушении основной.

Цель настоящей работы — обосновать повышение надежности резервуаров с двойной стенкой путем дополнения нормативных требований по выбору марок сталей для стенки основного резервуара и резервуаров обычной конструкции

большой вместимости, учитывая критерий трещи-  
нотойкости — характеристику раскрытия верши-  
ны трещины  $\delta_c$ . Предлагаемая характеристика  
учитывает пластические деформации, предше-  
ствующие достижению трещиной критической дли-  
ны и будет гарантировать самоостановку процесса  
развития зародившейся трещины до достижения  
ее критического значения. В работе [8] показано,  
что при  $\delta_c = 0,17...0,18$  мм докритические зна-  
чения сквозной трещины достигают 60 мм, что  
позволяет гарантированно их выявлять по исте-  
чению продукта хранения. Приведенным значе-  
ниям  $\delta_c$  соответствуют значения ударной вязкости  
при  $KCV_{-20} \geq 80$  Дж/см<sup>2</sup> [8, 9]. Вопросы выяв-  
ления вязких трещин при докритическом их раз-  
витии в стенке труб магистральных газопроводов  
на достаточно высоком уровне рассмотрены О. М.  
Иванцовым [10, 11], Д. Броеком [9] и др. При  
этом напряжения в вершине трещины стенки оце-  
нивали критерием  $K_c$  — коэффициентом интен-  
сивности напряжений. Разница в подходах состо-  
ит в том, что определение  $\delta_c$  выполняется с  
учетом пластических деформаций в вершине тре-  
щины, а при определении  $K_c$  исходят из наличия  
в вершине трещины упругой и весьма незначи-  
тельной доли пластической составляющей в  $\delta_c$ .  
Зависимости  $\delta_i \rightarrow KCV$  и  $K_c \rightarrow KCV$  близки по  
виду [9]. Накопленные экспериментальные дан-  
ные позволили установить указанные зависимо-  
сти для ниобийсодержащих сталей «контролируе-  
мой прокатки» как наиболее отвечающие тре-  
буемым значениям  $\delta_c$  и  $K_c$  [9, 10]. Переход от  
критериев  $\delta_c$  и  $K_c$  к общепринятому в металлур-  
гическом производстве для листового проката  
значению  $KCV$  позволяет практически использо-  
вать полученные результаты. Так, канадская фир-  
ма «Nova» нормирует ударную вязкость на об-  
разцах Шарпи, допускающую наличие сквозного  
дефекта определенной длины при рабочих коль-  
цевых напряжениях, которые не превышают на-  
пряжения, соответствующие 80 % минимального  
предела текучести стали класса X70 (табл. 1) [11].

Рассмотрим возможность применения для ос-  
новной стенки резервуаров типа «стакан в ста-  
кане» сталей контролируемой прокатки типа клас-

**Таблица 1. Требования фирмы «Nova» (Канада) к  
трубам из стали класса X70 [11]**

Наружный диаметр, мм	$KCV_{-20}$ , Дж/см <sup>2</sup>	Размер критического сквозного дефекта, мм (90 % максимально-го возможного дефекта)
914	47	14
1067	55	135
1219	69	155
1422 ( $P_{раб} = 8,4$ МПа)	69	165

са X70, широко применяемых для труб магист-  
ральных газопроводов. Стали класса X70 отно-  
сятся к ниобийсодержащим низколегированным  
сталлям. Современная технология термомехани-  
ческой обработки низколегированных сталей по-  
вышенной прочности стала возможной в значи-  
тельной мере благодаря использованию микроле-  
гирующих добавок ниобия. Стали имеют пока-  
затели  $KCV_{-20} < 88$  Дж/см<sup>2</sup>. Широкое применение  
ниобийсодержащих сталей для строительства ма-  
гистральных газопроводов и большой опыт их ус-  
пешной эксплуатации позволили металлургам  
России и Украины предложить новые стали тер-  
момеханической прокатки для сварных строитель-  
ных конструкций, изделий машиностроения и  
других отраслей. Специально для сварных метал-  
локонструкций были разработаны технические ус-  
ловия ТУ 14-1-4083–86 [12] с поставкой проката  
толщиной 8...50 мм из сталей 09Г2ФБ и 10Г2ФБ.  
Нормативом России [2] указанные марки стали  
рекомендуются для стенок нефтяных резервуаров.  
Недостатком этих сталей является необходимость  
во многих случаях применения предварительного  
подогрева [13].

Новые возможности по повышению надежност-  
и и гарантированной работоспособности резер-  
вуаров открываются в связи с разработкой Укр-  
госНИИКМ «Прометей» и ИЭС им. Е. О. Патона  
нового ряда ниобийсодержащих сталей по ТУ У  
27.1-05416923–085:2006 [14] с содержанием уг-  
лерода 0,04...0,09 %. В табл. 2 приведены основ-  
ные характеристики указанных сталей. При ши-  
роком варьировании значений  $\sigma_T$  от 355 до  
490 МПа и сохранении высоких показателей ра-  
боты удара  $KCV_{-40} = 98$  Дж/см<sup>2</sup> все стали пол-  
ностью удовлетворяют требованиям табл. 1 и име-  
ют критический сквозной трещиноподобный де-  
фект длиной не менее 100 мм. В то же время  
низкое содержание углерода в сталях позволяет  
выполнять их сварку без предварительного по-  
догрева кромок.

Применение для стенки резервуаров большой  
вместимости (свыше 20 тыс. м<sup>3</sup>) сталей повышен-  
ной и высокой прочности, вязкие свойства кото-  
рых гарантируют самоторможение зародившейся  
вязкой трещины до достижения критического зна-  
чения, равного примерно 100 мм, поднимает на  
качественно новый уровень ее надежность и при

**Таблица 2. Механические характеристики сталей класса  
прочности С355...С440 по ТУ У 27.1-05416923-085:2006 [14]**

Марка стали, класс проч- ности	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	$KCV_{-40}$ , Дж/см <sup>2</sup>
06ГБ (355)	355	450	22	55	98
06ГБ (390)	390	490	22	55	98
06ГБ (440)	440	540	22	55	98



наличии ежедневного осмотра практически исключает возможность возникновения лавинного разрушения.

Конструкция стенки, исключая лавинные разрушения, особенно необходима для основной (внутренней) стенки двустенного резервуара. Такая конструкция позволяет отказаться от установки на ней и наружной стенке бандажей как гасителей лавинных разрушений. При ухудшении условий визуального ежедневного осмотра поверхности основной стенки, контролируемое развитие сквозного дефекта до достижения им критического значения, равного примерно 100 мм, фактически гарантирует своевременное выявление и исправление дефекта.

В Украине на сегодня имеется положительный опыт применения ниобийсодержащих сталей для стенок нефтяных резервуаров. Сталь 06Г2Б прочностью 440 МПа использовали для нижних поясов стенок двустенного резервуара вместимостью 75 тыс. м<sup>3</sup> на ЛПДС «Броды». Сталь 10Г2ФБ успешно применяется при полной замене нижнего пояса в резервуарах вместимостью 50 тыс. м<sup>3</sup> и для специальных вставок замены вертикальных монтажных стыков. Сварные соединения выполняли без подогрева кромок и имели ударную вязкость  $KCV$  на уровне основного металла.

### Выводы

1. Благодаря разработке и освоению в Украине промышленного производства нового поколения ниобийсодержащих сталей класса прочности С355, С390 и С440, имеющих значения ударной вязкости  $KCV_{40} = 98$  Дж/см<sup>2</sup>, существенно повышается трещиностойкость стенки строящихся нефтяных резервуаров.

2. Исходя из критерия условия самоторможения вязкой трещины ( $\delta_c = 0,17...0,18$  мм), необходимо

дополнить в действующих нормативах пункт нормирования значения ударной вязкости на поперечных образцах для листового проката нижних поясов стенки резервуаров вместимостью свыше 20 тыс. м<sup>3</sup> не менее  $KCV_{20} = 80$  Дж/см<sup>2</sup>. Это требование необходимо распространить и для внутренних стенок двустенных резервуаров.

1. Nieto're problemybudowy zbiorniko'v o podwo'jnym korpusie i podwo'jnym dnie / M. Beloev, J. Konstandinov, S. Staneev, D. Ivanov // Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach. — 1996. — № 3. — S. 50–54.
2. ПБ 03-605-03. Россия. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. — М., 2003. — 128 с.
3. ВВН В.2.2.28-58,2-94. Украина. Резервуары вертикальные стальные для хранения нефти и нефтепродуктов. — 1994. — 95 с.
4. Сварные стальные резервуары для хранения нефтепродуктов. АРІ Стандарт 650. — 9-я ред. — Май, 1993.
5. Айвес, Шумейкер А. К., Мак-Кортни Р. Ф. Деформация трубопровода при распространении разрушения срезом // АОИМ. Спр. Д. Теоретические основы инженерных расчетов. — 1974. — С. 73–81.
6. Шумейкер А. К., Мак-Кортни Р. Ф. Анализ перемещений при распространении разрушения срезом по трубопроводу // Там же. — 1974. — № 4. — С. 86.
7. Розентейн И. М. Аварии и надежность стальных резервуаров. — М.: Недра, 1995. — 253 с.
8. Патон Б. Е., Труфяков В. И., Кирьян В. И. Требования к вязкости стали для магистральных газопроводов при постановке в них гасителей протяженных разрушений // Автомат. сварка. — 1981. — № 12. — С. 5–9.
9. Брок Д. Основы механики разрушения. — М.: Высш. шк., 1980. — 368 с.
10. Иванцов О. М., Харитонов В. И. Надежность магистральных трубопроводов. — М.: Недра, 1978. — 166 с.
11. Иванцов О. М. Надежность строительных конструкций магистральных трубопроводов. — М.: Недра, 1985. — 231 с.
12. ТУ 14-1-4083-86. Прокат листовой из ниобийсодержащих и других низколегированных сталей улучшенной свариваемости и хладостойкости. — Введ. 04.02.2007.
13. ВСН 2-124-80. Инструкция по технологии сварки магистральных трубопроводов. — М., 1981.
14. ТУ У 27.1-05416923-085:2006. Прокат листовой свариваемый из качественной стали классов прочности 355-590 для машиностроения.

The problem of improving reliability of oil storage double-wall tanks is considered. It is shown that installing special bands at lower flanges of the main and auxiliary walls does not solve the problem in its full scope. It is suggested that reliability of the main wall should be improved by applying the deformation defect tip displacement criterion  $K_c$ , which is met by the new generation of steels, i.e. controlled-rolling niobium-containing steels. Substantial improvement of toughness properties of the wall plates will guarantee detection and removal of subcritical defects in the main wall.

Поступила в редакцию 07.09.2007

УДК 621.791.72:621.791.052:620.17

## КАРБИДНЫЕ ФАЗЫ И ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАРОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

**В. В. ДМИТРИК**, канд. техн. наук (Укр. инж.-педагог. акад., г. Харьков),  
**А. К. ЦАРЮК**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**А. И. КОНЫК**, инж. (ОАО ЗЭМИ, г. Харьков)

Рассмотрены закономерности старения сварных соединений паропроводов из теплоустойчивой стали 12Х1МФ, работающих в условиях ползучести. Отмечена связь повреждаемости сварных соединений с кинетикой карбидных превращений и даны рекомендации по оптимизации исходной структуры основного металла.

*Ключевые слова:* теплоустойчивые стали, сварные соединения, поры, ресурс, карбиды, структура, ползучесть, паропроводы

Повреждаемость сварных соединений паропроводов из теплоустойчивых перлитных сталей в условиях ползучести при их наработке свыше 250000 ч обусловлена особенностями превращения структур металла сварных соединений [1–3]. Эти превращения характеризуются различным уровнем деформации зерен  $\alpha$ -фазы, количеством и степенью коагуляции карбидных фаз 1-й группы (преимущественно  $M_{23}C_6$ ), а также количеством карбидных выделений 2-й группы. Структурные превращения обеспечиваются карбидными реакциями  $M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6 \rightarrow M_6C$ , изучение роли которых в механизме повреждаемости представляется актуальным. С наибольшей интенсивностью структурные превращения протекают на участке неполной перекристаллизации зоны термического влияния (ЗТВ), что и обуславливает его большую повреждаемость при длительной эксплуатации, чем других участков ЗТВ, а также металла шва и основного металла.

Изучение закономерностей процесса старения, а также положений, определяющих его кинетику, необходимо для уточнения механизма повреждаемости данных сварных соединений, работающих в условиях ползучести.

Исследования проводили на образцах размером 159×18 мм, вырезанных из сварных соединений стали 12Х1МФ паропроводов горячего промперегрева Змиевской ТЭС, которые изготавливали по штатной технологии с использованием ручной дуговой сварки, а также на соответствующих образцах-свидетелях. После сварки указанные соединения были подвергнуты высокому отпуску при температуре 750 °С, 3 ч.

Паропровод эксплуатировался до 2002 г. при температуре 545 °С и давлении 24 МПа, а после 2002 г. — при температуре 510 °С и таком же давлении. Общая продолжительность наработки составила 275637 ч. В таком состоянии материал паропровода имел следующие механические свойства:  $\sigma_B = 775$  МПа;  $\sigma_T = 270$  МПа;  $\delta = 19,5$  %;  $\psi = 77$  %;  $KCV = 18$  Дж/см<sup>2</sup>.

Для выявления карбидов  $M_3C$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$ ,  $M_6C$ , а также пор применяли соответствующее химическое микроотравление [4, 5]. Так, для выявления карбида  $M_3C$  использовали травитель следующего состава: 1 г КОН; 4 г  $KMnO_4$ ; 100 мл  $H_2O$ . Продолжительность травления в кипящем растворе составляла 5...10 мин. Добавление в приведенный травитель винной кислоты позволило выявлять только карбиды  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$  и  $M_6C$ .

Карбидные фазы изучали путем количественного микроструктурного анализа с использованием порошкового дифрактометра «Siemens-D500» в монохроматизированном излучении. Дифрактограммы снимали в области углов  $10 \leq 2\theta \leq 140^\circ$  с шагом сканирования 0,02° и временем накопления импульса 75 с в каждой точке. Для выявления пор и идентификации карбидных фаз применяли сканирующий микроскоп JSM-820 с системой рентгеновского микроанализатора «Link» AN10185S и разрешающей способностью в режиме вторичных электронов 10 нм, а также локальностью микроанализа около 2 мкм. Для структурного анализа использовали световую и электронную микроскопию, а для определения механических свойств — штатное оборудование.

В исходной (после сварки) структуре металла сварных соединений наблюдаются характерные неравномерно распределенные по телу и границам зерна  $\alpha$ -фазы, дисперсные карбиды цементитного типа (рис. 1), имеющие по хрому состав твердого раствора замещения. Размеры цементитных вы-

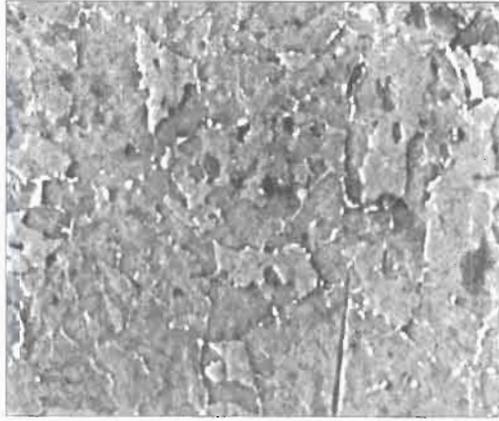


Рис. 1. Микроструктура (X2500) металла шва с характерными цементитными выделениями

делений составляют 20...500 нм. Расчет электронограмм показал, что они имеют орторомбическую решетку, параметры которой составляют  $a = 0,452$  нм,  $b = 0,512$  нм,  $c = 0,680$  нм (с точностью  $\pm 0,005$  нм). Эти данные близки к представленным в работе [6]. Форма таких карбидов приближается к сферической или эллиптической. Содержание и равномерность распределения карбидов на участках структур ЗТВ, а также в области металла шва и основном металле сварных соединений заметно отличается, что связано с интенсивностью структурных превращений.

В структуре сварных соединений стали 12Х1МФ в условиях ползучести после наработки 275673 ч (рис. 2) в различных соотношениях при-

сутствуют метастабильные карбиды 1-й группы  $M_3C$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$  и  $M_6C$ , а также стабильные  $MC$  и  $M_2C$  2-й группы. Целесообразно рассмотрение общих закономерностей формирования карбидных превращений, характерных для структур изучаемых сварных соединений.

Интенсивность превращений карбидов 1-й группы, расположенных по телу зерен  $\alpha$ -фазы, является значительно меньшей, чем по границам зерен, что подтверждается их количеством. Например, после наработки в течение 275637 ч выявленное количество карбидов  $M_3C$ , расположенных по телу зерен, составило около 20...30 %, а по их границам примерно 5...7 % общего количества карбидов 1-й группы.

Кристалл легированного хромом цементита состоит из определенного количества октаэдров, имеющих взаимно ориентированные, расположенные под углами оси [6, 7]. В структуре изучаемых сварных соединений хромистый цементит  $(Fe, Cr)_3C$  образуется при локальном содержании хрома 2,0...2,3 мас. %. Молибден в  $M_3C$  растворяется до 1 %. В ячейке  $M_3C$  хром может замещать до 25 % атомов железа, что является пределом их насыщения.

Термодинамическая активность хрома в карбидах и по границам зерен  $\alpha$ -фазы меньше, чем в самих зернах, что в условиях ползучести способствует его направленной диффузии. Диффузионные процессы (при длительной наработке) обеспечивают увеличение степени сегрегации

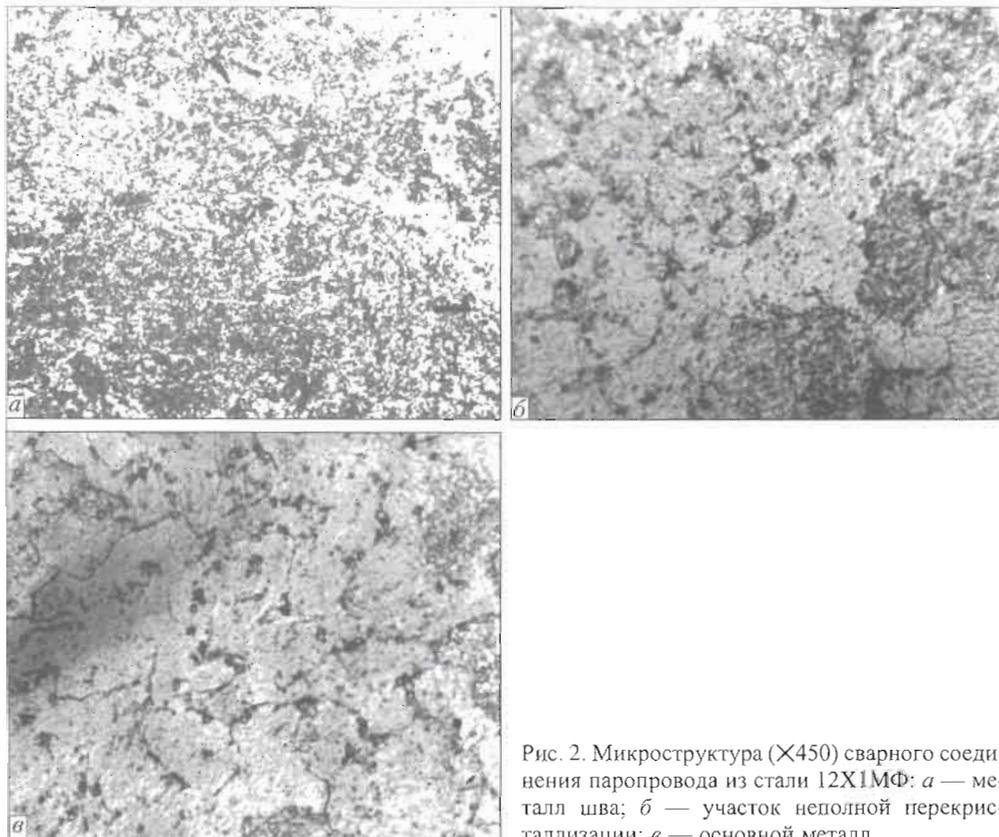


Рис. 2. Микроструктура (X450) сварного соединения паропровода из стали 12Х1МФ: а — металл шва; б — участок неполной перекристаллизации; в — основной металл

хрома по границам зерен  $\alpha$ -фазы и в зонах зерен, примыкающих к их границам. Скорость диффузии в зернах  $\alpha$ -фазы зависит от их размеров, формы и строения. Насыщение карбидов цементитного типа в условиях ползучести атомами хрома происходит не только вследствие их объемной диффузии из зерен  $\alpha$ -фазы на межфазную границу, но и в большей степени от диффузии вдоль границ (границной диффузии), а также перемещения дислокаций. В зернах  $\alpha$ -фазы образуются зоны типа Гинье-Престона, примыкающие к их границам, где концентрация хрома может превышать их среднюю концентрацию в 2...12 раз. Карбиды цементитного типа, расположенные по границам зерен  $\alpha$ -фазы (см. рис. 2), можно рассматривать при наличии гетерогенных флуктуаций (по Френкелю) как докритические зародыши [6]. Когда локальная концентрация хрома становится критической, гетерогенные флуктуации вызывают соответствующие фазовые переходы при условии, что рост докритического зародыша характеризуется сначала повышением энергетического уровня ячейки, а затем ее снижением.

При образовании локальной концентрации хрома в зонах Гинье-Престона примерно от 3,5 до 5,5 % происходит предельное насыщение цементита хромом до 5 %, что и обеспечивает его превращение в тригональный карбид  $(Cr, Fe)_7C_3$ . Можно показать, что такие превращения наиболее характерны для периода наработки сварных соединений от 80000 до 150000 ч, в течение которого отмечается наибольшее количество данных карбидов.

Заметное влияние на карбидные превращения имеет как уровень сегрегации, так и подвижность атомов. Л. И. Миркин показал [8], что для образования тригонального карбида  $(Cr, Fe)_7C_3$  размером в 20 металлических атомов, количество флуктуаций в  $1 \text{ см}^3$  стали, содержащей 2 мас. % хрома, составляет лишь несколько десятков. В металле участка неполной перекристаллизации ЗТВ при увеличенном уровне сегрегации по сравнению с другими участками структур, количество флуктуаций также высокое. Количество карбидных фаз  $M_7C_3$  при наработке 100000...150000 ч здесь примерно на 30 % больше, чем на других участках, что обеспечивается более высокой скоростью реакции  $M_3C \rightarrow M_7C_3$ .

При установлении локальной концентрации хрома в зернах и на границах зерен свыше 5,5 % происходит предельное насыщение хромом тригонального карбида  $M_7C_3$ , что приводит к его превращению в кубический карбид  $M_{23}C_6$  (рис. 3). При наработке 275673 ч установлено, что элементарная ячейка  $M_{23}C_6$  состоит из полых кубов и тетраэдров, в центре которых находятся металлические атомы. Тетраэдрические ребра между кубами существенно

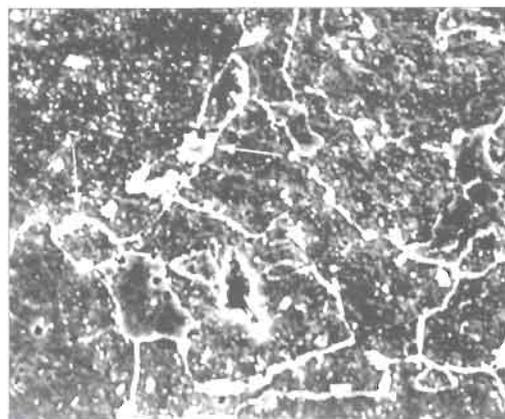


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 1500$ ) с выделениями карбидов  $M_{23}C_6$  (показаны стрелками) металла участка неполной перекристаллизации ЗТВ сварных соединений паропроводов из стали 12Х1МФ

превышают длину ребер куба. Размер ячейки следующий:  $a = 1,0572 \text{ нм}$ , что отличается от данных работ [4, 5, 9], где  $a = 1,0595 \text{ нм}$ . Отличие в параметрах ячейки обусловлено замещением атомов хрома атомами молибдена и марганца, которые имеют больший атомарный радиус: у хрома —  $0,127 \text{ нм}$ , у молибдена —  $0,139 \text{ нм}$ , у марганца —  $0,130 \text{ нм}$  [10]. Замещение происходит в условиях дополнительной доработки решетки карбидов  $M_{23}C_6$ , в том числе при их коалесценции. Выделения  $M_7C_3$  в структурах сварного соединения заметно отличаются по химическому составу (рис. 4), например, на участке неполной перекристаллизации по хромю на 15, по молибдену на 25, по марганцу на 30 %. Такое отличие обеспечивается наличием различных уровней сегрегации указанных элементов, что обусловлено диффузионными процессами, зависящими от условий эксплуатации и длительности наработки.

Подтверждена закономерность [11], что зародышеобразование  $M_{23}C_6$  происходит, как правило, на границах контакта трех зерен  $\alpha$ -фазы. Именно здесь наиболее интенсивно увеличивается уровень сегрегации, зависящий от структуры и условий старения. Например, при наработке 200000 ч количество карбидов  $M_{23}C_6$  (участок сплавления) составило около 40 % общего их количества, при наработке 275637 ч — 60 %, а при наработке 300000 ч (экспериментальные данные) — примерно 63 %.

Снижение рабочих параметров паропроводов (температуры и давления) после наработки 250000 ч с целью увеличения их ресурса позволило уменьшить в металле сварных соединений скорости диффузионных процессов. Однако снижение заметного влияния на интенсивность дислокационного механизма повреждаемости при установленном уровне структурных превращений и соответствующих условиях эксплуатации не оказало [12]. При наличии локальной концентрации хрома (свыше 10 мас.%) происходит реакция  $M_{23}C_6 \rightarrow M_6C$ . Среднее содержание хрома в зонах

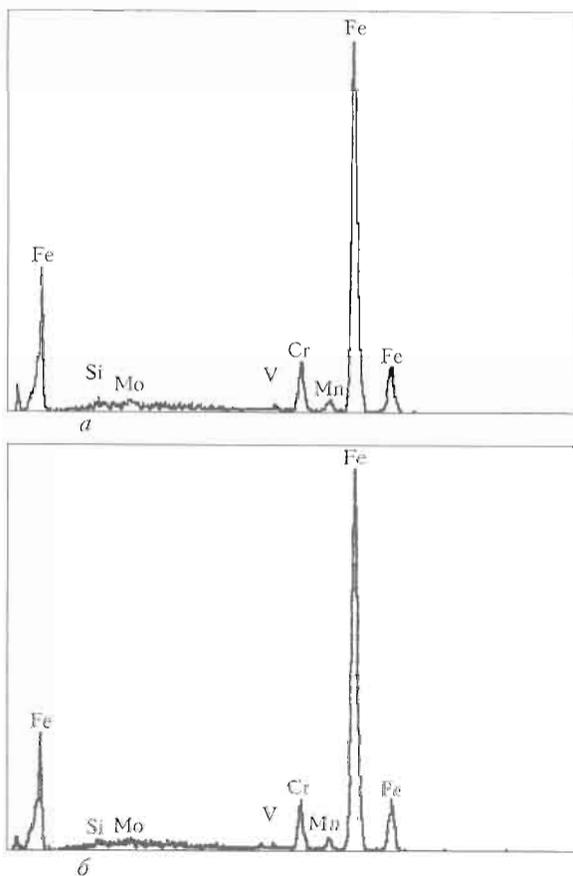


Рис. 4. Спектры карбидных выделений  $M_{23}C_6$ , расположенных по границам зерен  $\alpha$ -фазы: *a* — участок неполной перекристаллизации; *b* — участок сплавления

сегрегации при наработке до 150000 ч на участке неполной перекристаллизации возросло примерно с 1,5 (исходная усредненная сегрегация) до 5 мас. %, а при наработке от 150000 до 275673 ч — с 5 до 6 мас. %, что подтверждает снижение скорости диффузионных процессов при увеличении наработки. Локальное повышение концентрации хрома в зонах сегрегации (свыше 10 мас. %) и карбидов  $M_6C$  (около 5 мас. %) можно

считать исключением и оно обусловлено увеличенным содержанием хрома в металле трубных заготовок.

Интенсивность зарождения пор в сварных соединениях стали 12Х1МФ в условиях ползучести существенно связана со стабильностью карбидных фаз I-й группы. Наиболее интенсивно поры зарождаются на участке неполной перекристаллизации ЗТВ. Продолжительность сварочного нагрева в межкритической области температур ( $A_{c1}-A_{c2}$ ) способствует увеличению исходной сегрегации хрома на границах зерен  $\alpha$ -фазы (1,5...2,0 %), которая существенно возрастает в процессе наработки сварных соединений и вызывает увеличение скорости реакции  $M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6 \rightarrow M_6C$ .

В металле участка неполной перекристаллизации на второй стадии ползучести (наработка 275637 ч) присутствуют карбиды  $M_{23}C_6$  (примерно 60 %), а также  $M_3C$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_6C$ , VC,  $Mo_2C$  (остальное). Содержание карбидных выделений  $M_{23}C_6$  в металле шва, участков ЗТВ, а также в основном металле существенно отличается. В основном металле, например, содержание  $M_{23}C_6$  от общего их количества составило около 4, в металле шва — 45, на участке перегрева — 5 %. Установлено, что плотность пор на участке неполной перекристаллизации больше примерно на 70 %, чем в основном металле, на 30 %, чем в металле шва и на 40 %, чем на участке сплавления ЗТВ. Выявленное количество пор согласуется со статистикой [1]. Принимая поры размером около 0,05...0,10 мкм как зародышевые [1, 13, 14], учитывали, что их зарождение и развитие происходит в течение всей эксплуатации сварных соединений. В процессе развития пор их форма из эллипсоидной или шаровидной превращается в удлиненную разветвленную с переменным сечением (рис. 5), что позволяет формально считать их мик-

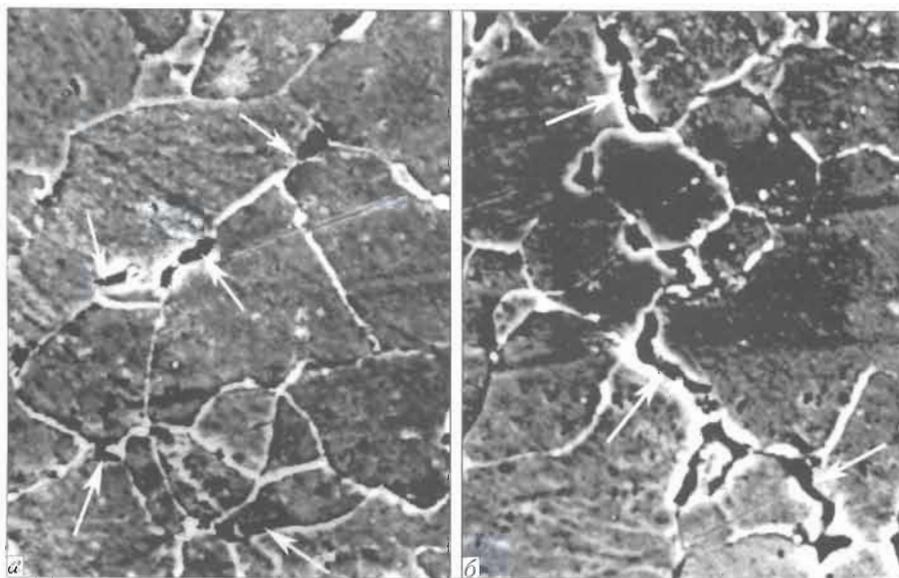


Рис. 5. Поврежденные порами и микротрещинами (показано стрелками) границы зерен  $\alpha$ -фазы,  $\times 2500$ : *a* — участок неполной перекристаллизации; *b* — участок сплавления

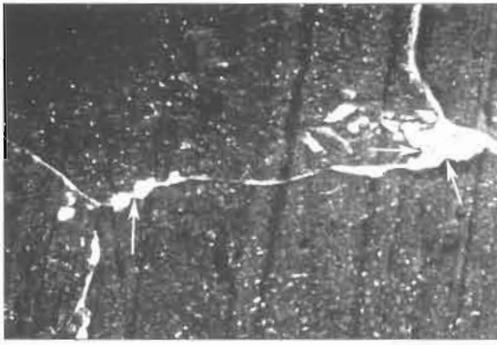


Рис. 6. Образование пор на участке неполной перекристаллизации возле коагулирующих карбидов  $M_{23}C_6$  (показано стрелками), X4500

ротрещинами. В металле участка неполной перекристаллизации наиболее интенсивно повреждаемость образуется по границам бейнит-перлит (около 280 пор/ $mm^2$ ), где перлит является новым продуктом распада аустенита, что близко к данным [13], а наименее интенсивно (около 140 пор/ $mm^2$ ) — по границам бейнит-бейнит (новый продукт распада аустенита). По границам зерен в процессе развития пор происходит их коалесценция, они формируются в виде сетки, цепочки пор, а также из пор образуются микротрещины (см. рис. 5).

Установлено, что большинство пор и микротрещин зарождается на поверхности контакта коагулирующих выделений  $M_{23}C_6$  (рис. 6) с границами зерен  $\alpha$ -фазы, перпендикулярными приложенным нагрузкам (или близкими к перпендикулярным) (см. рис. 5). Порообразование в значительной мере зависит от формы и размеров карбидных выделений, а также их когерентности с зернами  $\alpha$ -фазы, что требует дальнейшего уточнения.

В изучаемых сварных соединениях отмечается наличие усталостных микротрещин, зародившихся по границам зерен, в том числе возле коагулирующих карбидов  $M_{23}C_6$ , и развивающихся перпендикулярно рабочим нагрузкам (см. рис. 5). Такие трещины вызывают поперечное разрушение удлиненных карбидов  $M_{23}C_6$ .

Интенсивность повреждаемости порами металла участка неполной перекристаллизации существенно зависит от новых продуктов распада аустенита, контролирующих скорость карбидных реакций. Установлено также, что повреждаемость сварных соединений можно уменьшить путем получения в структуре участка неполной перекристаллизации новых продуктов распада аустенита в виде бейнита, троостита или сорбита.

1. Хромченко Ф. А. Ресурс сварных соединений паропроводов. — М.: Машиностроение, 2002. — 351 с.
2. Землин В. Н., Шрон Р. З. Термическая обработка и свойства сварных соединений. — Л.: Машиностроение, 1978. — 366 с.
3. Оценка остаточного ресурса сварных соединений трубопроводов ТЭС / В. В. Дмитрик, А. К. Царюк, А. А. Бугаец, Е. Д. Гринченко // Автомат. сварка. — 2006. — № 2. — С. 7–11.
4. Пигрова Г. Д. Влияние длительной эксплуатации на карбидные фазы в Cr-Mo-V сталях // Металловедение и терм. обработка металлов. — 2003. — № 3. — С. 6–9.
5. Киффер Р., Бонезовский Ф. Твердые материалы. — М.: Металлургия, 1968. — 383 с.
6. Блантер М. Е. Теория термической обработки. — М.: Металлургия, 1984. — 327 с.
7. Гуляев А. П. Металловедение. — М.: Металлургия, 1978. — 648 с.
8. Миркин Л. И. Физические основы прочности и пластичности. — М.: Изд-во Москов. гос. ун-та, 1968. — 537 с.
9. Rodriguez-Carvajal J., Roisnel T. FullProf.98 and WinPLOTR: New Windows 95/NT applications for diffraction // Commission for powder diffraction: Intern. Union of Crystallography Newsletter. — 1998. — № 5–8. — P. 159.
10. Таблицы физических величин: Справ. / Под ред. акад. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1005 с.
11. Чуистов К. В. Старение металлических сплавов. — Киев: Наук. думка, 1985. — 229 с.
12. Дмитрик В. В., Барташ С. Н., Шеленов И. Г. К особенностям повреждаемости сварных соединений паропроводов в условиях ползучести // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. — 2007. — № 3. — С. 78–184.
13. Березина Т. Г., Бугай Н. В., Трунин И. И. Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок. — Киев: Техніка, 1991. — 118 с.
14. Исследование особенностей разрушения при ползучести Cr-Mo-V сталей / И. И. Миш, Л. Е. Ходыкина, Н. Г. Шульгина, Н. В. Ашмарина // Металловедение и терм. обработка металлов. — 1989. — № 7. — С. 33–36.

Regularities of ageing of welded joints of steam pipelines from heat-resistant 12Kh1MF steel operating under creep conditions, are considered. A relation is established between damageability of welded joints and the carbide transformation kinetics, and recommendations are given on optimization of the initial structure of base metal.

Поступила в редакцию 16.04.2007



УДК 620.179.16

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ТРЕЩИН В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ДИФРАКЦИИ<sup>1</sup>

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

Рассмотрена возможность измерения высоты трещиноподобных несплошностей с помощью дифракции ультразвуковых волн, образованных на кромках.

*Ключевые слова:* ультразвуковой контроль, изменение размеров несплошностей

Традиционный подход ультразвуковой дефектоскопии не позволяет проводить точную оценку размеров трещиноподобных несплошностей<sup>2</sup>. Поэтому количественно оценить опасность обнаруженных дефектов с помощью расчетных методов механики разрушения, невозможно, обычно проводимый анализ опасности несплошности и прогноз в отношении дальнейшей эксплуатации оборудования (без проведения ремонта) по сути носит только качественный характер. Для сложного и ответственного оборудования, ремонт которого невозможен (только полная замена) или сопряжен с большими сложностями, такой подход приводит к неоправданным затратам или к его непрогнозируемому разрушению — аварии. Поэтому для безаварийной эксплуатации ответственного оборудования необходим количественный анализ опасности обнаруженных несплошностей. Решение этой задачи возможно только при условии знания точных геометрических размеров несплошностей. В настоящее время задача определения геометрических размеров несплошностей не имеет удовлетворительного решения, что косвенно подтверждается отсутствием каких-либо нормативных документов (ГОСТов, РД, инструкций и др.), регламентирующих оценку реальных размеров.

Известно, что дифрагированные волны, образованные на острых кромках несплошности, поз-

воляют определить координаты этих кромок, а следовательно, и размеры несплошности. Работы ряда исследователей показывают перспективность данного направления. В то же время нет ясной методологии применения волн дифракции для оценки размеров несплошностей в ультразвуковом неразрушающем контроле. Не исследованы вопросы о точностных возможностях метода, оптимизации характеристик ультразвукового тракта и некоторые другие.

Создание комплексных, научно обоснованных принципов и методов определения размеров трещиноподобных несплошностей на основе анализа дифракционных полей позволит повысить достоверность прогноза (остаточного ресурса) о надежной работе ответственного оборудования.

Цель работы — создание научно-обоснованной базы для определения размеров трещиноподобных несплошностей (дефектов) с помощью ультразвуковых волн дифракции, пригодной для практического применения на существующей технологической базе ультразвукового контроля (УЗК). Для достижения поставленной цели был выполнен анализ полного акустического тракта дефектоскопа и оптимизация его параметров с целью достижения наибольшей амплитуды сигнала от ультразвуковых волн, дифрагированных на кромке трещины, а также определение координаты «источника» дифрагированных волн и оценена погрешность результата (зависимость погрешности измерения от схем контроля и методов определения координат).

**Технология определения размеров трещин.** На основе выполненных исследований предложена технология УЗК для определения размеров высоты трещиноподобных несплошностей в сварных соединениях. Основная технологическая схема контроля и соответствующая ей последовательность принимаемых ультразвуковых сигналов приведена на рис. 1, 2.

<sup>1</sup> Статья подготовлена по результатам выполнения целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин (2004–2006 гг.)».

<sup>2</sup> Давыдов Е.А., Троицкий В.А. Определение размеров внутренних несплошностей металлоконструкций ультразвуковыми методами контроля // Материалы 5-й Нац. науч.-техн. конф. «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». — Киев, 2006. — С. 23–36.

Представленная на рис. 1 схема позволяет измерять размер трещины двумя способами.

1. При возможности приема дифрагированной волны тем же преобразователем, который излучает и первичную волну, размер трещины по высоте  $\Delta H$  определяется по формуле

$$\Delta H = H_2 - H_1, \tag{1}$$

где

$$H_1 = \sqrt{L_{12}^2 - \left[ \frac{S^2 + L_{12}^2 - L_{11}^2}{2S} \right]^2}, \tag{2}$$

$$H_2 = \sqrt{L_{22}^2 - \left[ \frac{S^2 + L_{22}^2 - L_{21}^2}{2S} \right]^2}, \tag{3}$$

$$L_{11} = C_L(t_{11} - \Delta t_1), \tag{4}$$

$$L_{12} = C_L(t_2 - t_{11} + \Delta t_1/2 - \Delta t_2/2), \tag{5}$$

$$L_{21} = C_L(t_{22} - \Delta t_1), \tag{6}$$

$$L_{22} = C_L(t_3 - t_{22} + \Delta t_1/2 - \Delta t_2/2), \tag{7}$$

$C_L$  — продольная скорость ультразвуковой волны в материале объекта контроля;  $t_{11}$  — задержка времени распространения ультразвуковой волны по пути ПЭП 1 — верхняя кромка трещины — ПЭП 1;  $\Delta t_1, \Delta t_2$  — задержка времени распространения ультразвуковой волны соответственно в ПЭП 1, ПЭП 2;  $t_2$  — задержка времени распространения ультразвуковой волны по пути ПЭП 1 — верхняя кромка трещины — ПЭП 2;  $t_{22}$  — задержка времени распространения ультразвуковой волны по пути ПЭП 1 — нижняя кромка трещины — ПЭП 1;  $t_3$  — задержка времени распространения ультразвуковой волны по пути ПЭП 1 — нижняя кромка трещины — ПЭП 2.

2. При возможности поперечного сканирования (в плоскости рисунка) добиваются центрированного положения преобразователей отдельно для верхней и нижней кромки (вершины) трещины. Центрированное положение соответствует минимальному значению  $t_{2 \min}$  (или  $t_{3 \min}$ ), размер трещины по высоте  $\Delta H$  определяется по формуле  $\Delta H = H_2 - H_1$ , где согласно обозначениям рис. 1,

$$H_2 = \sqrt{\left( \frac{C_L}{2} (t_{3 \min} - \Delta t_1/2) \right)^2 - \left( \frac{S}{2} \right)^2}, \tag{8}$$

$$H_1 = \sqrt{\left( \frac{C_L}{2} (t_{2 \min} - \Delta t_1/2) \right)^2 - \left( \frac{S}{2} \right)^2}. \tag{9}$$

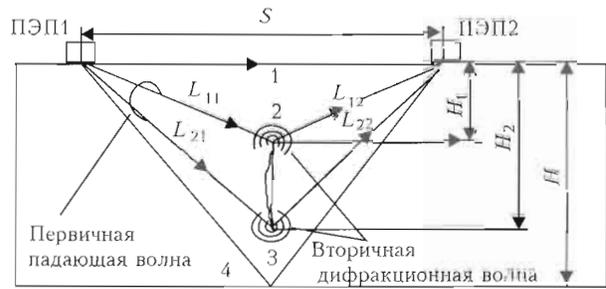


Рис. 1. Схема определения размеров трещины. 1 — сигнал головной волны; 2, 3 — сигналы от дифракции соответственно на верхней и нижней кромке трещины; 4 — «донный» сигнал

Определение координат вершины трещины по первой реализации технически сложнее осуществить из-за уменьшения амплитуды дифрагированной волны, излучаемой в обратном направлении. На практическом уровне реализации это связано не только с особенностями амплитудной зависимости, но и с наличием реверберационных шумов у совмещенного преобразователя. Уменьшение времени реверберации является достаточно сложной задачей, как известно, надежное решение этой проблемы возможно только с применением раздельно-совмещенных преобразователей. Не останавливаясь на достоинствах или недостатках этого решения, отметим, что применение раздельно-совмещенных преобразователей несколько усложняет требования к аппаратной базе. Достаточно отметить тот факт, что традиционные ручные дефектоскопы имеют только один приемный канал, что не позволяет непосредственно использовать существующий парк ручных дефектоскопов. Поэтому для определения размеров трещиноподобных дефектов более целесообразным следует считать второе решение.

Для случая, когда трещина выходит на одну из поверхностей объекта контроля, последовательность сигналов приведена на рис. 2. Следует обратить внимание на фазы сигналов, которые отличаются на полпериода и поэтому являются признаком того, где произошла дифракция на верхнем или нижнем крае трещины. Последнее важно для идентификации сигналов от «висящих» трещин, поскольку правильное соответствие фаз

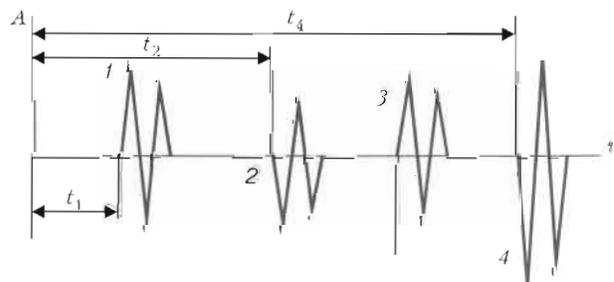


Рис. 2. Последовательность импульсов по схеме рис. 1;  $t$  — задержка времени между излучением и приемом сигналов от соответствующих ультразвуковых волн

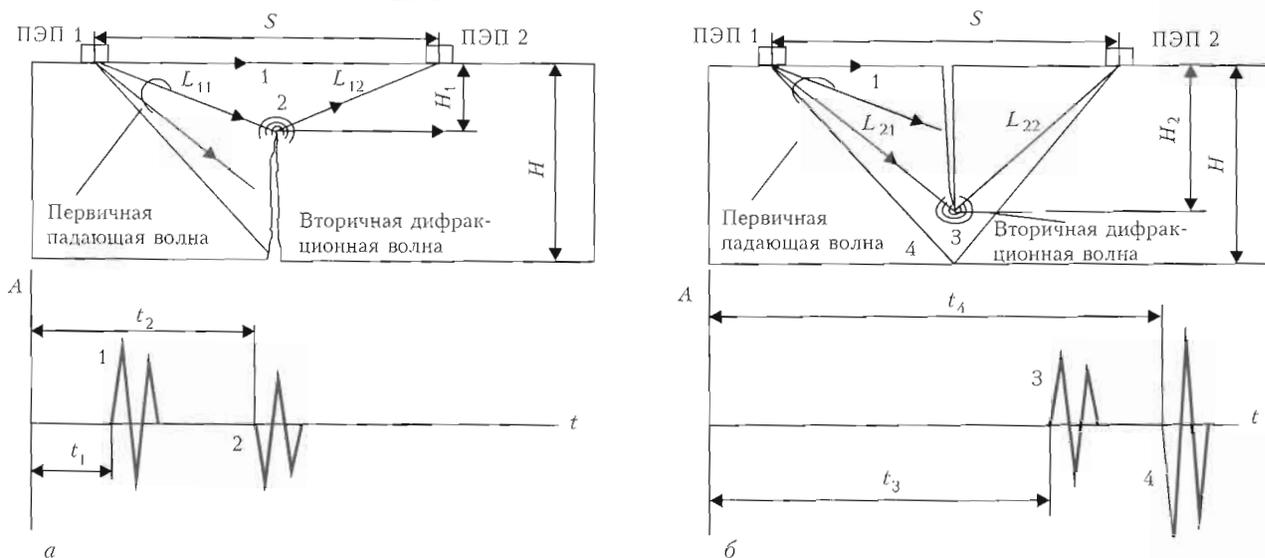


Рис. 3. Схема определения размера трещины, выходящей на поверхность объекта контроля: а, б — соответственно для нижней и верхней поверхности; 1-4 — то же, что и на рис. 1

является косвенным подтверждением того, что эти сигналы от трещины и соответствуют верхней и нижней кромке трещины.

Предложенную технологию измерения размеров трещиноподобных несплошностей можно адаптировать для сварных соединений более сложной формы. В качестве примера можно привести схемы измерений для наиболее распространенных типов сварных соединений, изображенных на рис. 4. Значительно более серьезным является амплитудный анализ (из приведенных примеров это, в первую очередь, относится к схеме, приведенной на рис. 3, а). В большинстве случаев эту проблему при необходимости легче всего решить экспериментальным путем на конкретных технологических образцах.

**Апробация технологии УЗК измерения размеров несплошностей.** Методика была опробована на сварных соединениях магистрального нефтепровода «Дружба». В результате прогона магнитного внутритрубного дефектоскопа по участку нефтепровода в некоторых сварных соединениях обнаружены трещины с недопустимыми размерами, для уточнения которых была применена технология УЗК измерения размеров несплошностей.

Кроме того, был проведен также независимый экспертный контроль специалистами «Оргтехдиагностика» (системой «Скаруч», механизированный контроль по ВСН 012-88), ЦТД «ДИАСКАН» (дефектоскопом USN 50, ручной контроль по ВСН 012-88), фирмы ПИ (поставщик магнитного снаряда-дефектоскопа, дефектоскопом USL-38, ручной контроль по британскому стандарту).

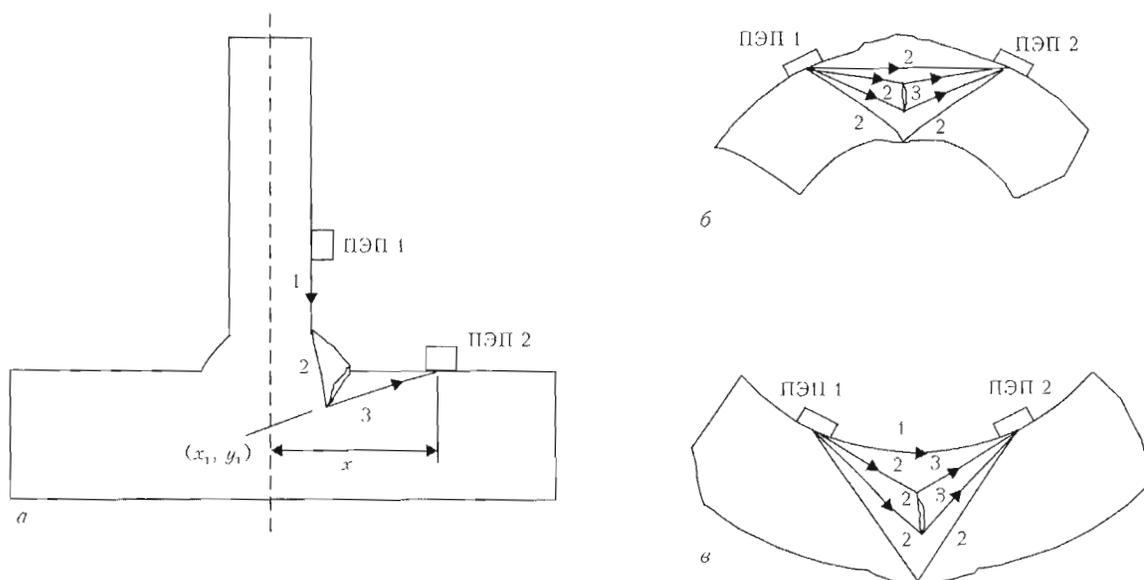


Рис. 4. Примеры схемных решений измерения размеров несплошностей в объектах со сложной (неплоской) геометрией (а-б): 1 — головная (поверхностная) волна; 2 — продольная; 3 — дифракционная

Результаты определения высоты несплошностей в сварных швах нефтепровода «Дружба», мм

№ сварного соединения	№ п/п	Магнитный снаряд	УЗК I (по результатам фирмы РЦ)	УЗК II («Оргтех-диагностика»)	УЗК II (ЦТД)	УЗК III ИЭС (волны дифракции)	Металлографические исследования	Примечание
Нефтепровод «Самара-Унеча», участок «Никольское-Стальной Конь»								
195370	1	7,2	6	1-2		3,7	4	-
202810	2	10,8	0	1-2		4	4	Смещение кромок
202730	3	10,8	0	1-2		3		»
202640	4	10,8	8	1-2		4	4,5	-
	5	8,9	0	1		3		Смещение кромок
195350	6	10,8	4	1-2		0	0	Особенности формирования участка шва
	7	10,8	9	1-2		3	4	-
195340	8	10,8	5-6	1-2		2		-
	9	7,6	0	1		0		Смещение кромок
	10	7,3	4-5	1		1		-
95710	11	10,8	4-8	1-2		0		Сварное соединение 12 + 20 мм
95650	12	10,8	5-8	1-3		4	4,5	
Нефтепровод «Сургут-Полоцк», участок «Лысьва-Пермь»								
105670	13	6,6	Не обследован		5-3	3		-
107210	14	4,8	»		7-4	0		Смещение кромок 5 мм
89490	15	7,6	0		0	0		Объемная несплошность на глубине ≈ 7 мм
77410	16	9,6	Не обследован		0	4		Смещение кромок 3 мм
64930	17	10,8	12		7-1	4,5		-
	18	10,8	9		7,5-3	5,1		-
	19	10,8	Не обследован		Не обследован	5,9		-
	20	10,8	»		»	5		-
	21	10,8	»		»	4,7		-
	22	9	»		»	4,4		-
4720	23	12	10		9-7	8,5		Толщина труб 14 и 15 мм
12050	24	8,9	Не обследован		0	3		
12150	25	6,7	»		0	4		
12210	26	5,6	»		8-6	5		
	27	7,9	»		0	5		

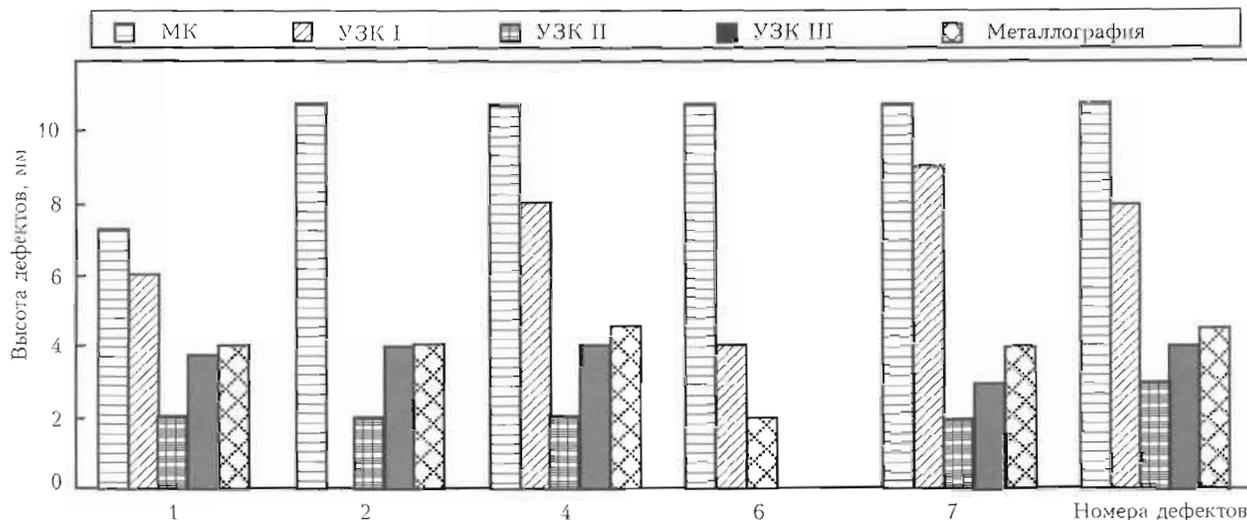


Рис. 5. Сравнение результатов измерений высоты дефектов методами неразрушающего контроля и данными металлографии

В сводной таблице представлены результаты всех измерений, выполненных различными организациями. По результатам ультразвукового и магнитного контроля некоторые сварные соединения были вырезаны для проведения разрушающих испытаний, что дало возможность выполнить металлографические исследования.

На рис. 5 приведена гистограмма результатов измерений в сравнении с металлографическими данными (для сварных соединений участка «Никольское–Стальной Конь» по данным таблицы).

Результаты измерений, полученные различными способами, существенно отличаются между собой. На основании приведенных данных следует признать, что погрешности в измерении высоты дефектов амплитудными методами могут достигать сотни процентов. Точность измерений зависит не только от характера и особен-

ностей несплошности, но и критериев самой процедуры оценки высоты.

Средняя погрешность высоты обнаруженных дефектов по методу волн дифракции составляет 0,4 мм, а максимальная погрешность определения высоты, по данным металлографии, не превышает 1 мм.

Таким образом, выполненный комплекс работ позволяет определять реальные геометрические размеры трещиноподобных несплошностей и оценивать точность выполненных измерений с помощью ультразвуковых волн, дифрагировавших на крае трещины. Разработанная методика позволяет сравнительно просто на существующей технологической базе УЗК и с достаточной для практического использования точностью проводить оценку геометрических размеров трещиноподобных несплошностей.

A feasibility of measurement of height of crack-like discontinuities using diffraction of ultrasonic waves, formed on edges, is considered.

Поступила в редакцию 29.12.2006

УДК 621.791.001

## ПЕРЕХОД К КОМПЛЕКСНОМУ РАЗВИТИЮ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**А. Н. КОРНИЕНКО**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),

**А. П. ЛИТВИНОВ**, канд. техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Рассмотрено создание по инициативе Е. О. Патона комплексной программы развития сварочного производства в 1930–1932 гг. Описана организация научно-исследовательского учреждения с такой формой деятельности, которая обеспечивала реализацию научно-технических идей в конкретных технологиях и оборудовании, внедрения их в производство. Приведен перечень приоритетных наукоёмких работ Института электросварки, выполненных под руководством Е. О. Патона.

*Ключевые слова:* сварочное производство, дуговая сварка, автоматическая сварка, комплексное развитие, фундаментальные исследования, мостостроение, история техники

В течение первых десятилетий XX в. сварка в производстве металлоконструкций начинает интенсивно вытеснять заклепочные и болтовые соединения. Сварка имела очевидные преимущества перед клепкой, однако при этом качество металла шва не было стабильным. Широкое внедрение сварки в промышленность было особенно актуальным для СССР, поскольку техническая революция и индустриализация промышленности диктовали необходимость экономии металла и повышения производительности сборочно-сварочных работ. За рубежом закупалось сварочное оборудование и принимались срочные меры по выпуску отечественного оборудования, для чего была организована подготовка кадров, созданы специализированные проектные и отраслевые научно-исследовательские организации. Однако исследование и проектирование, выполнявшиеся в этих организациях и на кафедрах вузов, были направлены на решение лишь отдельных задач сварочного производства. Ни в СССР, ни за рубежом не было учреждений, которые смогли бы объединить и решить весь комплекс проблем, возникших на пути дальнейшего развития сварки.

В 1929 г. известный мостостроитель Е. О. Патон организовал в системе Всеукраинской академии наук (ВУАН) при кафедре инженерных сооружений электросварочную лабораторию. Следует отметить, что Е. О. Патон как специалист в области металлоконструкций и мостостроитель знал все недостатки клепаных соединений [1, 2] и понимал, что сварка откроет новые перспективы в проектировании и строительстве инженерных

конструкций. Ученый разворачивает исследования работоспособности сварных конструкций под действием статических и динамических нагрузок, разрабатывает рациональные типы сварных конструкций и внедрении сварки на предприятиях. На протяжении 1930-х гг. Е. О. Патон и его сотрудниками опубликовано более 60 статей [3–6]. Некоторые из работ были изданы в журнале Американского сварочного общества [7, 8]. В 1933 г. вышла в свет монография по проектированию сварных конструкций [9]. Одновременно Е. О. Патон занимается организационными вопросами: осенью 1930 г. создает Электросварочный комитет, который можно считать прототипом межотраслевого центра координации исследований и помощи во внедрении [10]. В 1931 г. он ставит еще одну задачу — автоматизировать процесс сварки и начинает формировать конструкторское подразделение.

В 1932 г. Е. О. Патон впервые в мире разработал программу комплексного развития сварочного производства. Еще за два десятилетия до того, как он начал заниматься сваркой, специалисты разных стран пытались скоординировать усилия для решения проблем развития новых способов сварки в рамках обществ, ассоциаций, товариществ и др. Однако участники таких добровольных объединений (Американского сварочного общества [11], Всесоюзного научного инженерно-технического общества сварщиков [12], Немецкого сварочного общества [13] и др.) работали в своих лабораториях и на кафедрах самостоятельно над сравнительно узкими проблемами (в рамках своих интересов и возможностей), часто оставляя без внимания даже смежные проблемы. Члены обществ периодически встречались и обменивались информацией о полученных результатах. При этом разработка оборудования и техни-



логий, доведение результатов до промышленного внедрения продвигались крайне медленно. Среди немногих исключений можно назвать компанию «Дженерал электрик», где Э. Томсоном были организованы исследовательская лаборатория и конструкторская группа [14, 15]. Е. О. Патон осознал, что решение такого сложного комплекса научно-технических проблем, какие стоят на пути развития сварочного производства, требует участия металлургов, электротехников, механиков-конструкторов, специалистов отдельных отраслей техники и будет наиболее эффективным при единоличном руководстве в рамках одной организации со всеми необходимыми подразделениями. Результаты научных исследований должны стать основой для технологических и конструкторских разработок, что ускорит внедрение новых технологий в производство.

С начала 1932 г. в ВУАН развернулось обсуждение тематики научно-исследовательских работ на вторую пятилетку развития народного хозяйства СССР. В Харькове и Донбассе состоялись выездные сессии. На них Е. О. Патон выступил с докладами, в которых дал анализ потребности страны в сварочной аппаратуре и прогноз объемов производства сварных изделий [16–18]. Евгений Оскарович утверждал: «Основной проблемой электросварки во второй пятилетке является возможно более полная механизация сварочного процесса. Эта мера даст большую экономию сварочной аппаратуры, времени и рабочей силы... Отсюда следует, что развитие у нас автоматов должно быть поставлено на повестку дня. Не приходится рассчитывать на импортные автоматы, необходимо создать советские...» [18, с. 7].

В ноябре 1932 г. правительством УССР были выделены средства на развитие электросварочной лаборатории [19], а 2 февраля 1933 г. президиум ВУАН вынес решение о преобразовании электросварочной лаборатории в Институт электросварки (ИЭС) [20]. Директором и научным руководителем института был назначен Е. О. Патон [21]. 3 января 1934 г. правительство УССР утвердило это решение [22]. Теперь уже в рамках института Евгений Оскарович продолжал реализовывать идею о едином комплексе научных исследований, технологических разработок, конструировании, изготовлении опытных образцов аппаратуры и участии во внедрении работ института. Структура ИЭС складывалась в соответствии с этими задачами. Подбирались специалисты различных научных направлений. Для подготовки инженеров сварочного производства в 1936 г. Е. О. Патон организует в Киевском политехническом институте сварочный факультет. Учитывая то, что трансформаторы дешевле и проще в эксплуатации, чем генераторы, Е. О. Патон выбирает направление развития дуговой сварки

переменным током [23]. Коллективу технологов и конструкторов удалось в короткие сроки усовершенствовать автоматическую сварочную головку и разработать обмазку с высокими стабилизирующими свойствами (с диоксидом титана), а также найти способ подведения к электродной проволоке сварочного тока. Первое внедрение автоматической сварки состоялось на Бежицком вагоностроительном заводе «Красный Профинтерн» для изготовления пятидесятитонных цистерн, причем проекты всего оборудования для технологической линии были разработаны в ИЭС [23].

Весной 1936 г. по инициативе Е. О. Патона в Киеве была созвана конференция по автоматической сварке. В решениях конференции особое внимание уделялось комплексной разработке ИЭС проблем, связанных с автоматизацией дуговой сварки. Для внедрения автоматической сварки были определены шесть баз. Успехам автоматизации сварочного производства способствовал также Приказ по Народному комиссариату тяжелой промышленности о развитии автоматической сварки № 869 от 23 мая 1936 г., в котором отмечались «...успехи Института электросварки Академии наук УССР при комплексном разрешении задачи автоматизации дуговой электросварки (конструирование автоматической головки, исследование электродов, разработка метода изготовления обмазанных электродов, разработка станков для автоматов) ...», была объявлена благодарность Е. О. Патону и П. П. Бушкетту. В приказе отмечалось: «В целях обеспечения заинтересованным заводам УССР технической помощи Института электросварки при автоматизации сварочных процессов просить Академию наук УССР создать при институте постоянное проектно-консультационное бюро по вопросам автоматизации сварки» [24]. Таким образом в 1937 г. в структуре ИЭС появилось еще одно необходимое звено в проведении единого цикла работ (от исследований до внедрения новой техники) — отдел внедрения.

В 1938–1939 гг. под руководством Е. О. Патона разработана сварка под слоем флюса неплавящимся (угольным) электродом низкоуглеродистых сталей толщиной до 18 мм. Технология и оборудование впервые были внедрены для сварки балок железнодорожных платформ на Бежицком вагоностроительном заводе. Флюс для защиты сварочной ванны применял еще Н. Г. Славянов [25], однако для аппарата, перемещающегося при сварке, эта задача решена не была. В первые десятилетия XX в. ряд зарубежных фирм и организаций в СССР активно работали над конструированием механизмов для подачи сварочной проволоки и созданием средств защиты. Были запатентованы способы сварки с бумажной оплеткой проволоки, с «впрессовкой» флюса в пазы в про-



цессе подачи проволоки, способ защиты слоев древесных опилок и др. Приемлемого качества шва и производительности сварочных работ достигли сотрудники фирмы «Линде» (США), разработавшие состав гранулированного флюса для сварки сталей и технику автоматической сварки плавящимся электродом под слоем флюса [23, 26].

Продолжая развивать успехи в механизации и автоматизации процессов дуговой сварки, сотрудники ИЭС сумели самостоятельно завершить решение всех задач, связанных с применением сварки плавящимся электродом под слоем флюса [27]. Был разработан первый отечественный плавящийся флюс (АН-1), составы электродной проволоки, оригинальные конструкции сварочной головки и сварочных трансформаторов. Результаты комплекса поисковых работ обобщены Е. О. Патонем в первой в мировой литературе монографии о сварке под флюсом, вышедшей в 1940 г. [28]. В ней излагались основы нового научного направления — сварочного металловедения. В июне 1940 г. участникам Всесоюзной конференции по автоматической сварке была продемонстрирована сварка под флюсом листов конструкционной стали толщиной более 10 мм со скоростью 30 м/ч. Новый способ сварки оказался в 11 раз более производительным, чем ручная сварка. Такие темпы разработки нового способа и аппаратуры стали возможны благодаря четкой организации научно-исследовательских и проектных работ, которые последовательно проводил Е. О. Патон.

20 декабря 1940 г. вышло в свет Постановление Совнаркома СССР и ЦК ВКП(б) о внедрении автоматической сварки под флюсом в шестимесячный срок на 20-ти крупнейших заводах страны. Е. О. Патон был назначен членом Совета по машиностроению при СНК СССР; ему был поручен контроль за выполнением этого постановления [26]. Возглавляя масштабные организационные и научно-исследовательские работы, Евгений Оскарович приезжал на заводы, где инструкторы ИЭС обеспечивали не только внедрение автоматической сварки, но и обратную связь заводов с институтом.

Суровой проверке патоновский принцип организации разработок новых технологий подвергся в годы Великой Отечественной войны. На Урале (Нижний Тагил) в трудных условиях коллективу ИЭС под руководством Е. О. Патона удалось успешно преодолеть все трудности на пути создания технологии автоматической сварки броневых сталей и внедрения ее в производство танков и другой бронетехники. Были установлены причины растрескивания швов, разработаны технология бездефектной сварки и флюсы из местного сырья, сконструированы оригинальные автоматические сварочные головки с постоянной скоростью подачи электрода и системами управ-

ления, спроектированы поточные линии [29]. Б. Е. Патон и А. М. Макара изучили природу процесса, происходящего в зоне сварки под флюсом, и впервые в мире экспериментально доказали наличие дугового разряда [30]. Опыт и результаты научных исследований, конструирования, разработки технологий и внедрения послужили основой для создания новых способов сварки. Уже к середине 1940-х гг. достигнуты значительные успехи в разработке способов многодуговой и многоэлектродной сварки под флюсом, сконструированы первые сварочные полуавтоматы [31].

Выделив в качестве основной проблемы конца 1940-х гг. автоматизацию сварки под флюсом, Е. О. Патон расширил технологические и конструкторские разработки соединения новых металлов и повышения скорости сварки с целью внедрения этого способа сварки в новые отрасли промышленности. В полной мере принцип комплексных решений проявился при разработке принципиально новых сборочно-сварочных станков-автоматов для изготовления шахтных вагонеток, шахтерских ламп, стояков шахтных крепей и др. Автоматизированное поточное производство труб большого диаметра с двух- и трехдуговой скоростной сваркой было запущено на нескольких заводах страны.

В институте впервые в мире был разработан способ строительства крупногабаритных резервуаров из полотнищ, которые сваривались в цехах автоматами под флюсом, затем сворачивались в транспортабельные рулоны и разворачивались на месте монтажа. Еще одной вехой в истории автоматической сварки под флюсом стало создание впервые в мире устройств и технологий выполнения вертикальных, горизонтальных и потолочных швов. Тем самым была решена задача полномасштабного применения сварки под флюсом при строительстве крупных промышленных сооружений (домен, газгольдеров, трубопроводов) и зданий [32]. Следует отметить, что в 1945 г. за большие заслуги в деле комплексного развития сварного производства ИЭС было присвоено имя его основателя — Е. О. Патона.

В это время возникли и теоретические проблемы, без исследования которых уже нельзя было быстро и уверенно разрабатывать научно обоснованные технологии и новую сварочную технику. В конце 1940-х – начале 1950-х гг. предложены более подробные модели процесса сварки плавящимся электродом, определены причины возникновения пор в шве и трещин в соединениях [33]. К 1941–1945 гг. относится интенсивное развитие металловедения сварки, выделившегося из металлургии сварки в самостоятельное направление еще на этапе исследований структур металла шва и зоны термического влияния соединений броневых сталей [34]. Тогда же и получила развитие



закалочная гипотеза образования трещин в соединениях [34]. В результате комплексных исследований были выработаны научно обоснованные требования к химическому составу стали и способу ее раскисления и структуре, которые в сочетании с требованиями к составу плавящегося электрода и флюса давали возможность гарантировать необходимые служебные свойства сварных соединений при низких температурах. Одним из результатов таких исследований является создание стали для сварных конструкций [35]. Исследования процессов нагрева и плавления электрода при автоматической сварке, начавшиеся еще в годы войны [36], а также электрических параметров сварки [37] позволили сформулировать принципы автоматического регулирования процесса сварки посредством источника питания [38] и привели к созданию оборудования нового класса.

Во второй половине 1940-х гг. научный поиск, исследования и разработки в области изготовления сварных конструкций выполнялись по 35 темам, которые явились как бы прообразом будущих комплексных целевых программ, сориентированных на решение крупных практических проблем. Одной из целей таких исследований была разработка технологии сооружения цельносварных мостов с применением автоматической сварки на монтаже. При фундаментальном изучении какой-либо проблемы Евгений Оскарович всегда руководствовался принципом, согласно которому фронт исследований разворачивался значительно шире, чем того требовала первоначальная проблема. Принцип комплексного выполнения научных исследований, технологических и конструкторских разработок и опытных проверок в полной мере использовался Е. О. Патонем при проектировании и строительстве моста через Днепр в Киеве. Осенью 1953 г. монтаж моста массой около 10 тыс. т и длиной 1543 м, состоящего из 26 пролетов, был завершен.

Одним из важнейших составляющих комплексной программы развития сварочного производства, выдвинутой Е. О. Патонем, явилось выполнение основополагающих теоретических и экспериментальных исследований, необходимых для дальнейших прикладных инженерно-технических разработок. Такая организация научной работы, сочетающей фундаментальную глубину разработок с четкой целенаправленностью, была пионерской для института академического профиля [39]. По широте направлений развития сварочного производства ИЭС им. Е. О. Патона опережал все другие отечественные и зарубежные организации.

Таким образом, в 1932 г. Е. О. Патон выдвинул идею комплексной разработки проблем сварки, включающих металлургические, металловедческие, электротехнические и многие другие аспекты, и создал специализированное научно-иссле-

довательское учреждение, в котором можно самостоятельно решать все проблемы, возникающие на пути развития сварочного производства, и с такой структурой, которая обеспечивает быстрое выполнение всего цикла работ — от научно-технической идеи до создания и внедрения технологий и оборудования. В 1933 г. создание института утверждено президиумом ВУАН, а 3 января 1934 г. правительственным постановлением получен официальный статус Института электросварки.

В 1930–1940-х гг. в ИЭС в составе исследовательских и конструкторских подразделений, мастерских и группы инструкторов под руководством Е. О. Патона в кратчайший срок впервые созданы высокопроизводительное оборудование и отечественные технологии автоматической сварки под флюсом, разработаны рациональные сварные конструкции. Работы института позволили организовать производство на поточных линиях, применить конвейерную сборку и скоростной блочный монтаж с высокой степенью механизации и автоматизации технологических операций.

В 1940–1950-х гг. на новом уровне развернуты теоретические и экспериментальные исследования, без результатов которых уже нельзя было создать наукоемкие технологии и новую сварочную технику. Возник метод исследований принципиально нового уровня — целенаправленные фундаментальные исследования. Принцип комплексного выполнения научных исследований, технологических и конструкторских разработок, опытных проверок и контроля качества в полной мере был использован Е. О. Патонем при организации проектирования и строительства моста через Днепр в Киеве.

1. Патон Е. О. К вопросу об ослаблении листов заклёпками // Журн. М-ва путей сообщ. — 1905. — Кн. 3. — С. 143–156.
2. Патон Е. О., Козловский Н. И. Опытное сравнение электросварки и клепаных прикреплений продольных балок к поперечным. — М.: Транспечать НКПС, 1930. — 28 с.
3. Патон Е. О., Дятлов А. В. Ударные испытания электросварных и клепаных балок. — М.: Транспечать НКПС, 1930. — 20 с.
4. Патон Е. О., Петров М. В. Изыскание рационального типа электросварных сквозных ферм: Опытные исследования. — Киев: Электросвароч. комитет, 1931. — 36 с.
5. Патон С. О., Шеверницкий В. В. Праці в галузі електросварних конструкцій. — К.: ВУАН, 1934. — 38 с.
6. Патон Е. О. Мостовые опорные части сварного типа // Сб. статей по металлическим конструкциям. — М., 1935. — С. 60–96.
7. Paton E. O. Effect of high welding current intensity on shrinkage // Welding J. — 1944. — № 1. — P. 60–62.
8. Paton E. O., Gorbounov B. M., Berstein D. O. Behavior of residual stresses under external load and their effect on strength of welded structures // Ibid. — 1944. — № 9. — P. 473–480.
9. Патон Е. О., Горбунов Б. Н. Расчет и проектирование электросварных конструкций в промышленном строительстве. — М.; Л.: Госстройиздат, 1933. — 120 с.

10. *Протоколи засідань Президії ВУАН за 1930 р.* — Центр. наук. арх. НАН України, ф.1, оп.1, п.108.
11. *Корниенко А. Н.* Конфорд Эвери Адамс и Американское сварочное общество // *Сварщик.* — 2004. — № 3. — С. 35.
12. *Корниенко А. Н.* История сварки (проблемы и предложения) // *Свароч. пр-во.* — 1989. — № 10. — С. 47–78.
13. *Корниенко А. Н.* У истоков сотрудничества немецких и отечественных специалистов в области сварки (20–30 гг. XX в.) // *Дослідження з історії техніки.* — К.: НТУУ «КПІ», 2004. — С. 125–130.
14. *Корниенко А. Н.* Элихью Томсон // *Сварщик.* — 2001. — № 3. — С. 38.
15. *Корниенко А. Н.* Ирвинг Ленгмюр и атомно-водородная сварка // *Там же.* — 2002. — № 3. — С. 47.
16. *Патон Е. О.* Пути развития электросварки во второй пятилетке. — Харьков: Машбудвидав, 1932. — 22 с.
17. *Патон Е. О.* Шляхи розвитку електросварювання в другій п'ятирічці. — Харків: Машбудвидав, 1932. — 24 с.
18. *Патон Е. О.* Пути развития электросварки во второй пятилетке // *Автоген. работник.* — 1932. — № 1/2. — С. 7–16.
19. *Протоколи засідань Президії ВУАН за 1933 р.* — Центр. наук. арх. НАН України, ф.1, оп.1, л. 58.
20. *Там же.* — л. 3.
21. *Там же.* — л. 7.
22. *Особиста справа Е. О. Патона.* — Центр. наук. арх. НАН України, 1, оп. 1, д. 350.
23. *Матійко М. М.* Развитие дугового электросварювания на Україні. — К.: Вид-во АН УССР, 1960. — 155 с.
24. *Приказ по Народному комиссариату тяжелой промышленности о развитии автоматической сварки № 869 от 23 мая 1936 г.* // *Автоген. дело.* — 1936. — № 7. — С. 42–43.
25. *Патон Б. Е.* Современное состояние автоматической сварки под флюсом — итог развития идей Н. Г. Славянова // *Сб. докл. Науч.-техн. конф. сварщиков: посвящено 100-летию со дня рождения Н. Г. Славянова.* — Киев: — М.: Машгиз, 1955. — С. 15–27.
26. *Чеканов А. А.* История автоматической электросварки. М.: Изд-во АН СССР, 1963. — 159 с.
27. *Патон Е. О.* О первенстве советской науки и техники в области сварки под флюсом. — Киев, 1951. — 32 с.
28. *Патон Е. О.* Автоматическая сварка голым электродом под слоем флюса. — Харьков: Харьк. дом техники, 1940. — 32 с.
29. *Патон Б. Е.* Развитие автоматической электросварки под флюсом за годы войны // *Электричество.* — 1945. — № 3. — С. 3–5.
30. *Патон Б. Е., Макара А. М.* Экспериментальное исследование процесса автоматической сварки под слоем флюса. — Киев: Ин-т электросварки АН УССР, 1944. — 92 с.
31. *Патон Е. О.* Развитие автоматической сварки под флюсом за 10 лет (1940–1950 гг.) // *Автоген. дело.* — 1950. — № 2. — С. 1–3.
32. *Корнієнко О. М., Літвінов О. П.* Особливості розвитку наукових засад і впровадженнь зварювання в УРСР з 1945 до середини 1950-х років // *Нариси з історії природознавства і техніки.* — 2005. — № 45. — С. 123–131.
33. *Фрумін І. І., Курдо І. В., Подгаєцький В. В.* Образование пор в сварных швах и влияние состава флюса на склонность к порам // *Там же.* — 1949. — № 10. — С. 1–11.
34. *Макара А. М., Медовар Б. И.* О характере первичной кристаллизации сварочной ванны // *Там же.* — 1948. — № 12. — С. 25–27.
35. *Патон Е. О., Шеверницький В. В.* Сталь для сварных мостов // *Там же.* — 1949. — № 6. — С. 3–7.
36. *Патон Б. Е.* Исследование процесса нагрева электрода при автоматической сварке под флюсом // *Тр. Ин-та электросварки им. Е. О. Патона.* — 1948. — № 3. — С. 17–23.
37. *Патон Б. Е.* Процесс плавления электрода при автоматической сварке под флюсом // *Тр. по автоматической сварке под флюсом.* — 1944. — С. 22–38.
38. *Патон Б. Е., Лебедев В. К.* Автоматическое регулирование мощности сварочной дуги // *Там же.* — 1948. — № 1. — С. 260–281.
39. *Патон Б. Е.* Наука–техника–производство // *Вопр. философии.* — 1980. — № 10. — С. 22–31.

The efforts of E. O. Paton in accomplishing the welding production development program, which he worked out in 1930–1932, are considered. It is noted that he initiated foundation of a research institution with a structure providing realisation of scientific-and-technical ideas into specific technologies and equipment, as well as their commercial application. Brief review of the priority science-intensive developments of the Electric Welding Institute, made under the leadership of E. O. Paton, is given.

Поступила в редакцию 19.12.2007



## СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОТКАЧКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ВАКУУМНЫХ КАМЕР ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ СВАРОЧНЫХ УСТАНОВОК

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

Приведены результаты откачки крупногабаритной вакуумной камеры объемом около  $20 \text{ м}^3$  промышленной установки УЛ-132 без использования и с использованием системы вымораживания паров воды. Установлено, что время откачки вакуумной камеры до вакуума  $2,66 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$  ( $2 \cdot 10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$ ) при вымораживании паров воды снижается в 2 раза (от 40 до 20 мин).

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, откачка, крупногабаритные вакуумные камеры, рабочий вакуум, вымораживание паров воды

В последние годы ужесточились требования ко времени откачки крупногабаритных вакуумных камер электронно-лучевых сварочных установок с целью увеличения количества рабочих циклов за смену. Так, например, время достижения рабочего вакуума  $2,66 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$  ( $2 \cdot 10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$ ) в вакуумной камере объемом  $20 \dots 30 \text{ м}^3$  обычно не должно превышать 20 мин. Известно, что именно наличие паров воды в воздушной среде, которая удаляется при откачке вакуумной камеры, значительно замедляет процесс откачки, поскольку пары воды конденсируются на стенках камеры и ее механизмах. При вакууме  $1 \text{ Па}$  ( $1,33 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$ ) пары воды составляют от 65 до 95 % остаточного газа. Водяной пар может образовать от 50 до 100 монослоев на всех внутренних поверхностях откачиваемого объема. Требуется значительное время, чтобы молекулы пара оторвались от твердой поверхности и стали свободным газом, который затем откачивается высоковакуумным насосом. Возможность предварительного удаления паров воды путем продувки вакуумной камеры горячим сухим воздухом пока еще не доведена до промышленной реализации.

Известно\*, что для вымораживания водяного пара достаточно использовать криозмеевики, охлаждаемые до температур, близких к  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ . При температуре  $-109,1 \text{ }^\circ\text{C}$  парциальное давление паров воды уже не превышает  $2,66 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$  ( $2 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$ ). Криозмеевик, изготовленный из гладкой медной трубки, имеет оптимальное соотношение поверхности и массы, что позволяет обеспечить бы-

стрый цикл его функционирования. В процессе охлаждения смеси хладагент, протекая через змеевик, испаряется при температуре  $+90 \dots -150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Время охлаждения стандартного змеевика от  $25$  до  $-110 \text{ }^\circ\text{C}$  составляет не более 2 мин. Практически для такого же быстрого отогрева горячий газ, предварительно очищенный от масла, подается из нагнетательной линии напрямую в тот же змеевик. Система вымораживания добавляется к традиционному вакуумному откачному блоку установки без какого-либо изменения последнего и имеет интерфейс для подключения к общей системе компьютерного управления.



Рис. 1. Общий вид криозмеевика, смонтированного на задней стенке вакуумной камеры установки КЛ-132 (внизу справа — «холодный ввод» в вакуумную камеру)

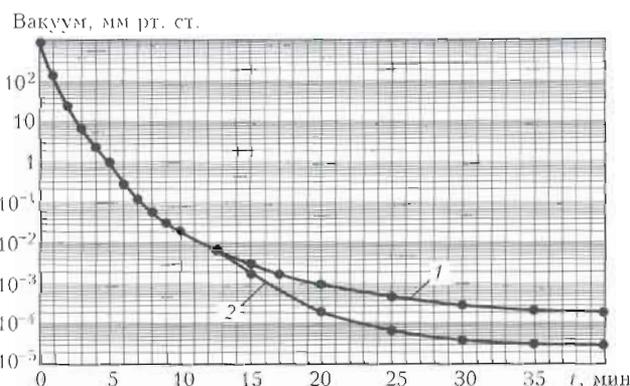


Рис. 2. Временная зависимость степени разрежения вакуумной камеры объемом около  $20 \text{ м}^3$  установки КЛ-132, полученная без вымораживания (1) и с вымораживанием (2) водяных паров

\* Высоковакуумные промышленные крионасосы / С. Б. Нестеров, О. Н. Подчерняев, Б. В. Юдин и др. // Сб. докл. 6-й Междунар. конф. «Вакуумные технологии и оборудование», г. Харьков, 21-26 апр., 2003 г. — Харьков: ННЦ ХФТИ, 2003. — С. 231-237.



На рис. 1 представлен общий вид криозмеевка, смонтированного на задней стенке вакуумной камеры установки КЛ-132 объемом около 20 м<sup>3</sup>.

Из рис. 2 видно, что начиная с момента включения системы вымораживания, соответствующего вакууму приблизительно 1 Па (1,33<sup>-2</sup> мм рт. ст.), скорость разрежения существенно повышается и вакуум 2,66·10<sup>-2</sup> МПа (2·10<sup>-4</sup> мм рт. ст.) достигается за 20 мин, в то время как при отклю-

ченной системе вымораживания — только за 40 мин, т. е. в 2 раза дольше.

Кроме сокращения времени откачки, вымораживание водяных паров уменьшает вероятность попадания влаги в зазор свариваемых кромок, что предотвращает появление мелких пор в шве при сварке титановых сплавов.

Вымораживание водяных паров осуществлено нами уже в двух промышленных установках для электронно-лучевой сварки.

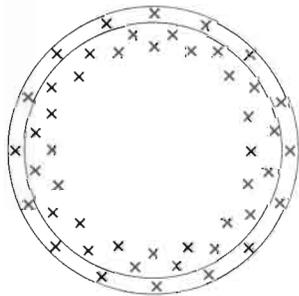
Results are given on evacuating the large-size vacuum chamber with a capacity of about 20 m<sup>3</sup>, which is part of the industrial unit UL-132, with and without the water vapour freezing-out system. It has been established that the time of evacuation of the vacuum chamber to a vacuum level of 2,66·10<sup>-2</sup> (2·10<sup>-4</sup> mm Hg) by using the water vapour freezing-out system is reduced 2 times (from 40 to 20 min).

Поступила в редакцию 29.11.2007

УДК 621.791(088.8)

## ИЗОБРЕТЕНИЯ СТРАН МИРА\*

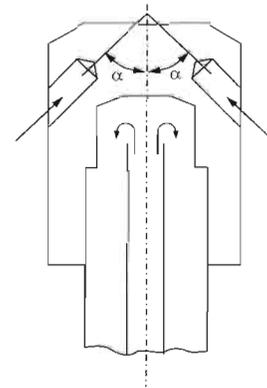
**Способ изготовления многослойных труб путем лазерного переплава.** Последовательно формируют кольцевые слои из металлических порошков и расплавляют каждый слой с помощью лазерного излучения, соединяя его с предыдущим слоем, в результате чего получают многослойную трубу. Между смежными слоями основного материала находятся слои прокладочного материала, теплопроводность которого отличается от теплопроводности металла основных слоев. Зазоры между слоями основного материала могут вакуумироваться и герметизироваться, заполняться газом или пеной. Полученная конструкция может быть цилиндром двигателя Стирлинга или другого поршневого двигателя. Патент Великобритании 2416319. D. W. Hislop, S. D. Joseph (Sustainable) Engine Systems Limited).



**Способ и устройство для чистки электродов и колпачков точечной сварки, а также машина точечной сварки с таким устройством.** Электрод и закрепляемый на нем колпачок подвергают воздействию охлаждающей среды, причем разность температур охлаждающей среды и электрода превышает 80 К. Электрод и колпачок имеют каналы для подачи охлаждающей среды.

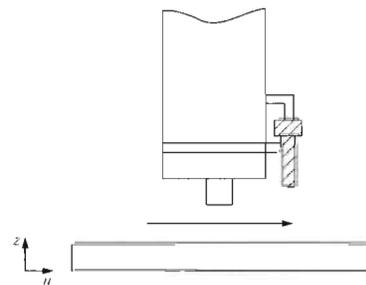
Текст перевода заголовка и реферата публикуются по ИСМ вып. 018 № 12/2006, порядк. номер реферата 0223, патентный документ-аналог WO 2005113186 A1 дата публ. 01.12.2005. Патент Германии 1004024979. J. Joerg, Sch. Emil (Alexander Binzel Schweisstechnik GmbH).

\* Приведены сведения о патентах, опубликованных в реферативном журнале «Изобретения стран мира» № 1 за 2007 г.



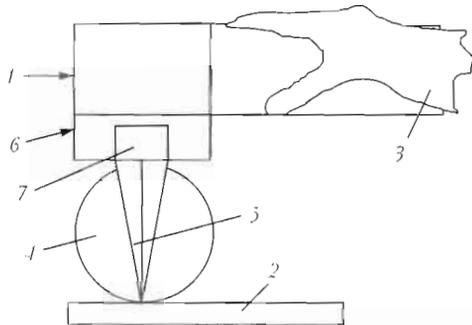
**Способ контроля качества работ при сварке трением.**

Предложен способ контроля качества работ при сварке трением, во время которой вращающийся фрикционный инструмент с усилием вводят в материал деталей, соединяемых сваркой, и перемещают вдоль линии соединения. Способ отличается тем, что измеряют изменение по времени давления и/или возникающих во время сварки трением колебаний фрикционного инструмента, соединяемых сваркой деталей или других элементов и затем методом Фурье преобразуют их в частотные и амплитудные спектры и что для контроля качества сварного соединения полученные частотные и амплитудные спектры сравнивают с базовыми значениями. Патент Германии 1004030381. B. Tommy, H. Ulrike, S. Juergen (Eads Deutschland GmbH).





**Устройство для лазерной обработки.** Ручное устройство 1 для лазерной обработки детали 2, в частности, для лазерной сварки снабжено приспособлением для защиты окружения от возможного повреждения лазерным лучом, которое имеет блок управления, регистрирующий нежелательный рабочий режим с помощью сенсора 6 и прерывающий при отклонении от заданного значения лазерный луч 5. Сенсор 6 пригоден для оптического определения удаления устройства от детали 2. Устройство для лазерной обработки отличается тем, что заданное значение устанавливают с помощью дополнительного компактного прибора измерения расстояния. Патент Германии 10240946. В. Matthias, Sch. Christian, L. Kai-Uwe (Mobil Laser Tec GmbH).

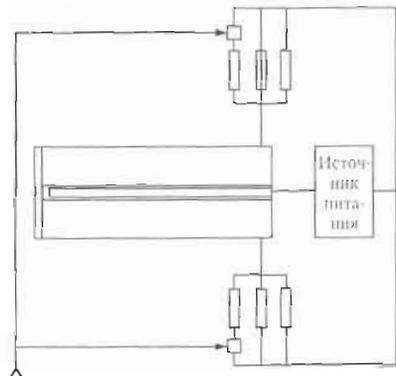


**Материал и способ изготовления защитного покрытия на подложке из сплава на основе меди.** Порошкообразный металлический материал для изготовления покрытия, защищающего от эрозии и коррозии, путем нанесения на подложку сплава на основе меди методом термического напыления, плазменной электродуговой сварки или пайки отличается тем, что его состав (в мас. %) находится в следующих границах: Cu 5...30; P 0,01...4,0; B 0,5...4,0; Si 0,5...4,0; Cr 0...5,0; Fe 0...3,0; C 0...0,3; остальное Ni. Патент Германии 4396402. N. Leon (Mec Holding GmbH).

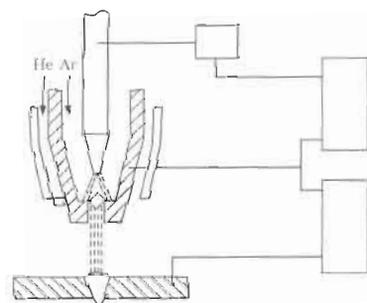
**Устройство для точечной сварки с клещами и перекрытием, предотвращающим разбрызгивание.** Устройство для точечной сварки вдоль складок содержит сварочные клещи и перекрытие, предотвращающее разбрызгивание. Защитное перекрытие ориентировано таким образом, что пересекает конус распыления, образующийся при сварке, и выполнено так, что его площадь до пяти раз превышает площадь зоны пересечения конуса распыления. Устройство обеспечивает эффективное улавливание брызг, образующихся при сварке, причем одновременно гарантирует хорошую подвижность и хорошую доступность сварных зон. Патент Германии 1004033562. O. Oezcan (Daimlerchrysler Ag).

**Способ электродуговой сварки неподвижным плавящимся пластинчатым электродом.** Способ включает установку между свариваемыми поверхностями двух металлических изделий электрически изолированного от них посредством диэлектрического покрытия плавящегося пластинчатого электрода, формирование электрической цепи для протекания сварочного тока через электрод и изделия с зажиганием электрической дуги между электродом и изделиями с последующим формированием сварного соединения. Ширина электрода не меньше толщины свариваемых изделий. Сварные соединения формируют за счет возвратно-поступательного перемещения электрической дуги по фронту оплавления электрода, продольного перемещения сварочной ванны и охлаждения расплавленного металла. На электрическую дугу воздействуют периодически изменяющимся знакопеременным поперечным магнитным полем, направленным перпен-

дикулярно к обращенным к свариваемым металлическим изделиям поверхностям плавящегося пластинчатого электрода. Частота поля соответствует требуемой частоте возвратно-поступательного перемещения электрической дуги по фронту оплавления электрода. Воздействие осуществляют путем противофазной модуляции с упомянутой выше частотой значения электрического тока, протекающего через каждое металлическое изделие. Модуляцию значений электрического тока, протекающего через каждое металлическое изделие, осуществляют по прямоугольному закону. Это позволит обеспечить высокую воспроизводимость качественных параметров сварных соединений. Патент России 2291036. В. О. Бушма, Д. В. Калашников.



**Способ плазменной сварки алюминиевых сплавов.** Возбуждают дежурную дугу между катодом и соплом-анодом и основную дугу постоянного тока обратной полярности между деталью и соплом-анодом. При этом образуют общее анодное пятно. Через канал сопла-анода подают плазмообразующий газ. Анодное пятно располагают на внутренней кромке канала сопла-анода путем подачи на дежурную и основную дугу токов в соотношении  $I_d/I_0 = 0,4...3,2$ . В результате такого размещения анодного пятна на внутренней кромке сопла-анода основная дуга имеет большую степень обжатия и обладает большей проплавающей способностью. Патент России 2292256. В. В. Овчинников, В. В. Алексеев.



**Способ изготовления металлических тонколистовых сварных конструкций без остаточных сварочных деформаций,** при котором собирают и сваривают между собой листы и ребра жесткости, заключается в том, что листы предварительно равномерно нагревают по всей площади до температуры, определяемой по формуле (1)  $T = \epsilon_s/\alpha \pm 10^\circ\text{C}$ , где  $T$  — температура нагрева,  $\epsilon_s$  — относительная деформация металла листов, соответствующая пределу текучести,  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения металла листов. При этом для предотвращения их сжатия листы закрепляют на сборочном стенде или к смежным конструкциям, а после остывания листов производят сборку и сварку. Технический результат заключается в компенсации сварочных деформаций методом, исключающим использование сложного сило-



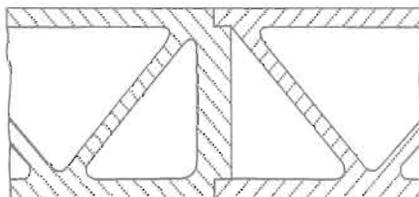
вого оборудования и приложение больших усилий. Патент России 2291770. В. С. Михайлов, В. М. Левшаков, К. Д. Могилюк (ФГУП «ЦНИИТС»).

**Активирующий флюс для электродуговой сварки**, содержащий компоненты в следующем соотношении (мас. %): 20...30 гексафторалюмината лития, 20...30 диоксида титана, 10...30 оксида алюминия, а также группу галогенидных солей магния — 10...20 хлорида магния, 10...20 бромид магния, 10...20 иодида магния. Такой состав активирующего флюса обеспечивает снижение образования газовых пор, повышение проплавления способности дуги и стабильность формирования сварного шва. Патент России 2291039. С. Г. Паршин, С. С. Паршин.

**Способ и машина для установки заклепок по технологии сварки трением вращающимся инструментом.** Машина содержит станцию подачи заклепок и манипулятор с компьютерным управлением. На рычаге манипулятора смонтирована головка, имеющая зажимные кулачки, которые захватывают заклепку на станции подачи заклепок. После этого рычаг манипулятора перемещает головку с заклепкой в точку установки и головка приводит заклепку во вращение, внедряя ее в металл соединяемых деталей. Тепло трения, выделяющееся при вращении заклепки, пластифицирует металл соединяемых деталей и после замедления и прекращения вращения заклепки происходит затвердевание окружающего металла, в результате чего заклепка прочно закрепляется в металле соединяемых деталей. Машина может работать в автоматическом режиме. Патент США 6988651. S. Robin, W. Pei-Chung (General Motors Corporation).

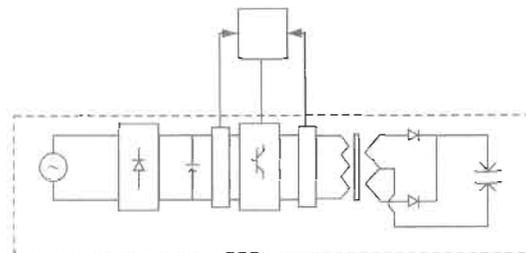
**Способ диффузионной сварки двухфазных сплавов.** Для диффузионной сварки заготовок из тяжелого сплава вольфрама используют присадочный сплав палладия, содержащий никель, железо или кобальт. Элементы присадочного сплава выбирают в соответствии с элементами сплава свариваемых заготовок. Присадочный сплав размещают между свариваемыми заготовками; прилагают к ним давление сжатия и нагревают в соответствии с требуемым температурным профилем. Способ позволяет сваривать заготовки сложной формы и больших размеров, имеющие внутренние полости. Механические свойства сварного соединения аналогичны свойствам металла основы. Патент США 6984358. W. R. Spencer (Lockheed Martin Corporation).

**Способ сварки трением вращающимся инструментом и сварная конструкция, полученная этим способом.** Свариваемые конструкционные панели имеют наружные параллельные стенки и промежуточные косые стенки, соединяющие наружные стенки. Одна из панелей имеет торцевую вертикальную стенку. Торцевые участки наружных стенок панелей соединяют сваркой трением вращающимся инструментом. При этом вертикальная стенка обеспечивает жесткость в процессе сварки и воспринимает давление вращающегося инструмента. Конструкция панелей позволяет предотвратить деформацию зоны соединения в процессе сварки. Патент США 6984455. A. Kinya, T. Tsuyoshi, I. Yasnos (Hitachi, Ltd.).

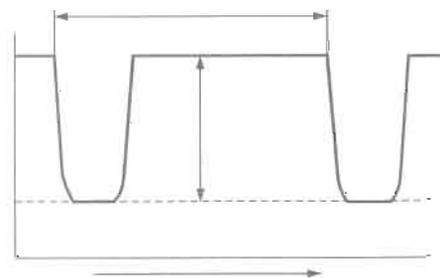


**Присадочная проволока без шлака с высоким содержанием кремния для сварки ферритных сталей.** Предложенная трубчатая проволока для сварки имеет наружную металлическую оболочку, внутри которой размещаются заполняющие элементы. Проволока характеризуется тем, что эти заполняющие элементы составляют 8...27 % суммарной массы проволоки и содержат 2...8 % кремния. Кремний в такой проволоке содержится в оболочке и/или в наполняющих элементах. Металлическая оболочка имеет не менее 90 % всей проволоки с наполнителем. Сварка осуществляется электродуговым способом в среде защитного газа. При этом реализуется сварной шов путем расплавления этой проволоки. Патент Франции 2872724. L. Bruno.

**Сварочная машина инверторного типа.** Машина содержит цепь инвертора, которая преобразует однофазный переменный ток в постоянный ток и подает его на сварочный пистолет; вольтметр, измеряющий напряжение переменного тока, подаваемого в цепь инвертора, а также блок управления, который вырабатывает команды импульсного тока в соответствии со значением напряжения, измеряемого вольтметром. Система управления машиной позволяет снизить колебания сварочного тока и повысить качество сварных соединений. Патент Японии 3736117. W. Shinichi (Nissan Motor).



**Способ электронно-лучевой сварки и установка для выполнения этого способа.** Электронный пучок разделяют по времени на первый пучок электронов и второй пучок электронов, который следует за первым пучком. Первый пучок электронов производит сварку, в то время как второй пучок подавляет образование сварочных дефектов. Зона между зонами, облучаемыми первым и вторым пучками электронов, нагревается при переключении пучков. Патент Японии 3734401. W. Motojoshi, Y. Yoshihiro (Toyota Motor Co., Mitsubishi Electric Corp.).



**Лист алюминиевого сплава для изготовления паяных теплообменников.** Лист алюминиевого сплава покрыт с двух сторон промежуточным слоем и слоем твердого припоя. Алюминиевый сплав листа содержит 0,5...1,5 % Mn, остальное Al и неизбежные примеси, содержащие ≤ 0,6% Si и ≤ 0,7 % Fe. Промежуточный слой, имеющий толщину ≥ 70 мкм, состоит из алюминия и примесей в количестве ≤ 1 %. Размер кристаллических зерен промежуточного слоя ≥ 50 мкм. Температура рекристаллизации промежуточного слоя ниже температуры плавления припоя, который содержит 7...15 % Si, остальное Al и неизбежные примеси. Листовой материал позволяет повысить коррозионную стойкость



и срок эксплуатации теплообменников. Патент Японии 3734302. Т. Akihiro, Т. Atsushi, Е. Hitohisa (Shinko Alcoa Yuso Kizai; Zexel Corp.).

**Порошковая проволока для дуговой сварки в среде защитного газа.** Проволока состоит из стальной оболочки и порошка флюса, заполняющего оболочку. В качестве флюса используют порошок сплава, содержащего 0,4...1,2 % С; 5...12 % Si; 19...42 % Mn, остальное — Fe. Химсостав сплава удовлетворяет неравенству  $Si \geq 11,89...2,92 C - 0,077 Mn$ . Раз-

мер зерен  $\leq 212$  мкм. Масса порошка составляет  $\geq 1$  % массы проволоки. Порошок флюса также содержит 2...7 % TiO<sub>2</sub>; 0,2...1,5 % SiO<sub>2</sub>; 0,1...1,2 % ZrO<sub>2</sub> и 0,01...0,3 % фторида металла. Проволока, используемая для скоростной сварки горизонтальным швом, обеспечивает хорошее отделение шлака и обладает повышенным сопротивлением сползания жидкого металла при высоких токах сварки. Патент Японии 3730440. К. Masao, Т. Rikeva, А. Takeo (Nippon Steel Welding Prod Eng.)



По  
зарубежным  
журналам\*

*PRZEGLAD SPAWALNICTWA (Польша) 2007. — № 10 (пол. яз.)*

**Menzel M.** Высокоскоростной процесс — метод, позволяющий расширить потенциальные возможности традиционного метода сварки МАГ, с. 3–5.

**Duda D., Litwin W.** Катамаран на солнечной энергии «Energ Solar», с. 14–16.

**Labanowski J.** Свойства и свариваемость двухфазных коррозионностойких дуплексных сталей, с. 35–40.

**Berezniuk M., Lezoch J.** Воздушно-плазменная резка с помощью держателей ABIPLAS CUT, изготовленных фирмой ABICOR BINZEL, с. 41–43.

**Pilarczyk J. et al.** Гибридная сварка с использованием лазерного луча и электрической дуги, с. 44–48.

**Adamiec J. et al.** Гибридная сварка пакетов листовых панелей с помощью лазерного световода, с. 49–52.

**Kozak J.** Полностью стальные панели типа сэндвича — новые возможности благодаря технологиям лазерной сварки, с. 53–59.

**Hejowski T.** Испытания на стойкость к эрозийному износу покрытий, применяемых в оборудовании, работающем на бензине, с. 60–63.

**Drzeniek H.** Износостойкая наплавка порошковой электродной проволокой на основе сплавов Fe—Cr—C, с. 64–70.

*SCHWEISS-& PRUEFTECHNIK (Австрия) 2007. — № 9 (нем. яз.)*

5-й Международный симпозиум во Франции, июнь 2007 г. «Автоматическая орбитальная сварка», с. 131–134.

*SCHWEISSEN und SCHNEIDEN (Германия) 2007. — № 9 (нем. яз.)*

**Janben-Timmen R., Moos W.** Сварка и резка 2006 — рост конъюнктуры, с. 462–474.

**Reisgen U. et al.** Дуговая сенсорная система для сварки в защитном газе в узкий зазор ленточным электродом с отклонением дуги, с. 476–481.

**Vollner G. et al.** Потенциалы роботизированной сварки трением с перемешиванием на примере из авиационной техники, с. 482–487.

**Haferkamp H. et al.** Высокочастотное колебание луча для повышения стабильности процесса при лазерной сварке алюминиевых сплавов, с. 488–491.

\* 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).



**Dilthey U. et al.** Гидродинамический анализ процесса при гибридной сварке: лазерная + дуговая в защитном газе. Ч. 2. Перемешивание, с. 492–498.  
**Zwatz R.** Аттестация сварщиков стали. Должна ли Германия одобрить DIN EN ISO 9606-1, с. 503–505.  
**Аспекты** передачи сварочных работ, с. 506–512.

**Пайка 2007** — мир в гостях у Аахена. 8-й коллоквиум по высокотемпературной пайке, низкотемпературной пайке и диффузионной сварке, июнь 2007 г., с. 512–516.  
**Finnland.** Заседание комитета CEN/TC 135 по вопросу EN 1090 в июне 2007 г. в Хельсинки, с. 516–518.  
**О работе** службы информации. Обзор литературы, с. 518–522.

*SOUWAGE et TECHNIQUES CONNEXES (Франция). — 2006. — Vol. 60, № 9/10 (фран. яз.)*

**Мировое** производство белого металла — реструктуризация трех самых крупных объединений, с. 6–7.  
**Трамваи** фирмы Альстом продолжают пользоваться успехом, с. 8–9.  
**Фирма** Эйрбас корректирует свой производственный план по самолетам A380, с. 10.  
**Будущая** сварка рождается в лабораториях Института сварки, с. 12–13.

**Австрийская** фирма поставила расходуемые сварочные материалы в Гану на гидроэлектростанцию в Акосомбо, с. 14–15.  
**Chauveau D.** Неразрушающий контроль отвечает задачам оптимизации долговечности промышленных эксплуатирующихся установок, с. 25.  
**Orlowski J. A. de G.** Орбитальная сварка ТИГ силовой установки спутника, с. 33–37.

*SOUWAGE et TECHNIQUES CONNEXES (Франция). — 2006. — Vol. 60, № 11/12 (фран. яз.)*

**Французские** ветряные станции приобретают все большую популярность, с. 6–7.  
**Повышение** спроса на сталь, с. 8.  
**Сварка** тяжелых толстостенных изделий, с. 9.  
**Минисмеситель** с редуктором для мобильного использования, с. 10.

**Институт** сварки передал свою деятельность по стандартизации в UNM (Союз по стандартизации машин и механизмов), с. 11.  
**Вредное** воздействие марганца на сварщиков — официальное мнение МИС, с. 15.  
 100-летие истории сварки (1906–2006), с. 22–23.

*SOUWAGE et TECHNIQUES CONNEXES (Франция) 2006. — Vol. 60, № 1/2 (фран. яз.)*

**Фирма** Air Liquide Welding предлагает свои решения для разных промышленных секторов-потребителей сварки, с. 8–9.  
**Электрооптическая** маска-шлем сварщика с быстродействующим затвором получила положительную оценку Института сварки, с. 11–15.  
**Моделирование** и качество сварки как основная цель, с. 12–15.

**Теплоизоляционные** ленты в танкерах для перевозки жидкого метана, приклеенные с помощью напыления «холодной плазмой», с. 16–17.  
**Graveleau S.** Проблемы магнетизма, возникающие при сварке, с. 30–33.  
**Posch G. et al.** Сварка труб из аустенитной стали, применяемых в криогенной технике, с. 34–40.

*SOUWAGE et TECHNIQUES CONNEXES (Франция) 2006. — Vol. 60, № 3/4 (фран. яз.)*

**Промышленная** выставка «Industrie 2007» в Лионе для демонстрации нового оборудования, с. 6–11.  
**Окончательный** выбор водного транспорта для перевозки продукции черной металлургии и металлолома, с. 12–13.  
**Как** фирма РЕНО использует старые автомобили, с. 14–16.  
**Способ** многослойной внутренней плакировки крупных компонентов котлов, с. 17.

**Комплект** приспособлений, предназначенный для роботизированной сварки, с. 18.  
**Потребности** в энергетическом оборудовании активизируют производство турбин, с. 19.  
**Dainelli P. et al.** Более легкосвариваемые конструкционные стали, с. 29–34.  
**Laroche Y. et al.** Ободы гидравлических турбин, упрочненные роботизированной сваркой и проковкой, с. 35–39.

*SOUWAGE et TECHNIQUES CONNEXES (Франция). — 2006. — Vol. 60, № 5/6 (фран. яз.)*

**Промышленное** котлостроение — трубостроение — стратегический сектор, с. 6–7.  
**Улучшение** ситуации в области котлостроения, с. 8–9.  
**Котлостроительное** предприятие СМР в Дюнkerке — производитель крупногабаритных резервуаров, с. 10–11.  
**«Холодная»** сварка каталитических сосудов, с. 12.  
**Еще** больше композиционных материалов будет использоваться для будущего аэробуса A350 XWB, с. 14.

**Tran Tien T.** Самоадаптивная сварка МАГ может перейти на промышленный уровень, с. 29–34.  
**Duchazeaubeneix J.-M.** Улучшение усталостных характеристик конструкций, сваренных методом StressonicR (ультразвуковая ударная обработка) по сравнению со способом переплава ТИГ, с. 35–37.

*SOUWAGE et TECHNIQUES CONNEXES (Франция) 2006. — Vol. 60, № 7/8 (фран. яз.)*

**Средства** индивидуальной защиты сварщика — сочетание качества с разумной ценой, с. 6–7.  
**Изготовители** средств индивидуальной защиты должны удовлетворить 12 млн заказчиков, с. 8.

**Некоторые** последние инновации в области средств индивидуальной защиты сварщика, с. 10–11.  
**Легкая** очистка трубопроводов или баков перед сваркой, с. 14–15.



Стальной газовый баллон массой в 6,3 кг, предназначенный для 10 кг бутана, с. 14–15.

Что делать с изношенным сварочным оборудованием?, с. 18.

*TECNOLOGIA QUALIDADE (Португалия) 2006. — № 56, Abril/Junho (португ. яз.)*

Boynard C. et al. Технология электромагнитного акустического контроля для техобслуживания и контроля труб котлов, с. 7–10.

Boynard C. Перспективный контроль трубопроводов без удаления изоляционного материала, с. 11–14.

Legros Ph. Анализ паров, образующихся при сварке для выполнения биметаллических соединений, с. 27–29.

Robineau A. et al. Сварка трением с перемешиванием для выполнения биметаллических соединений, с. 30–39.

Leitao D., Tenera P. Конкурентоспособность средств механизации, с. 15–19.

Barros. Цифровая рентгенография, с. 20–25.

Lus A. et al. Концепция, разработка и изготовление ультразвуковых

*TECNOLOGIA QUALIDADE (Португалия) 2006. — Julho/Setembro, № 57 (португ. яз.)*

Dias A. Проекты ERAQ II и EPCEM применительно к линейной промышленности Португалии, с. 14–19.

Dias K. Противопожарные меры безопасности, с. 20–22.

Farinha M. M. Оценка профессиональных рисков, с. 23–27.

*TECNOLOGIA QUALIDADE (Португалия) 2006. — Outubro/Dezembro, № 58 (португ. яз.)*

Tenera P. Цифровая рентгенография, с. 5–8.

Pires H. et al. Система лазерного виртуального восстановления археологических раскопок керамических предметов, с. 9–13.

Bergsten C. J. Collapse — Европейский проект по сохранению свинцовых и свинцово-оловянных органических труб от коррозии, с. 14–16.

Schreiner M. et al. Анализ стеклянных памятников культуры с помощью аналитических методов рентгеновского флуоресценции, фотоэлектронной спектроскопии, энергорас-

сеивающего рентгеновского анализа в сканирующем электронном микроскопе, с. 18–23.

Margues P. A. et al. Аспекты инноваций, с. 28–30.

Lopes S. C. Лаборатория по исследованию разрушений и вибраций выполнила первое акустическое испытание в Анголе, с. 33–35.

Barros P., Leitao D. Контроль сварных швов аустенитной стали резервуаров для сжиженного природного газа с помощью системы, работающей на основе метода фазовой решетки, с. 36–41.

*TECNOLOGIA QUALIDADE (Португалия) 2007. — Janeiro/Março № 59 (португ. яз.)*

Stuart C. Катодная защита, с. 14–16.

Couto N. Два года применения руководства IPED, с. 23–25.

Marques P., Ramajal P. Газораспределительная станция природного сжиженного газа, с. 26.

Soares R. et al. Экспериментальная методика определения напряжений в трубных конструкциях, подверженных случайным нагрузкам на поверхности, с. 35–41.

*WELDING JOURNAL (США) 2007. — Vol. 86, № 6 (англ. яз.)*

Darcis Ph. P. et al. Экспериментальные методы измерения ударной вязкости сварных швов трубопроводов, с. 48–50.

Devine J. Ультразвуковая сварка играет основную роль при соединении фотоэлементов, с. 52.

Disney J. A. Исторический Хенвордский проект по сварке компонентов нержавеющей стали становится общедоступным, с. 54–57.

Borchert N., Phillips D. Методы успешного выполнения сварки металлических труб, с. 58–62.

Nordahl T. Подводные кабели, соединяемые с помощью орбитальной сварки, с. 64–65.

Emmerson J. Применение механизированной сварки труб большого диаметра, с. 66–67.

Hancock R. Веб-сайт Американского сварочного общества, с. 68–70.

Padmanabham G. et al. Характеристики растяжения и разрушения образцов из Al—Cu—Li, сваренных импульсным способом МИГ, с. 147–160.

Tumuluru M. Влияние покрытий на характеристики прочности двухфазной стали 780 МПа при контактной точечной сварке, с. 161–169.

Regina J. R. et al. Влияние хрома на свариваемость и микроструктуру плакированных слоев из Fe—Cr—Al, с. 170–178.

Paleocrassas A. G. et al. Низкоскоростная лазерная сварка сплава алюминия 7075-T6 с помощью одномодового иттербиевого оптоволоконного лазера мощностью 3000 Вт, с. 179–186.

*WELDING JOURNAL (США) 2007. — Vol. 86, № 7 (англ. яз.)*

Sampath K. Как выбирать электрод для соединения высокопрочных сталей, с. 26–28.

Ravert E. Энергосберегающие наконечники установок для вытяжки газов и паров, выделяющихся в процессе сварки, с. 30–31.

Packard K. Выбор и содержание порошковой проволоки, с. 32–34.

Wood R. Конструктивные соображения по безопасности роботизированного сварочного модуля, с. 38–41.

Sadler H. Проблемы сертификации расходных сварочных материалов, с. 42–45.

Konkol P. J. et al. Сравнение сварных изделий из высокопрочной низколегированной стали (HSLA-65), выполненных сваркой трением с перемешиванием и дуговой сваркой под флюсом, с. 187–195.



**Yarmuch M. A. R. et al.** Сварка ТИГ сплава алюминия 5083 на переменной полярности тока, с. 196–200.

**Abdulaliyev Z. et al.** Температурные напряжения стыковых соединений из разных материалов, с. 201–204.

*ZVARANIE — SVAROVANI (Словакия) 2007. — Рос. 56, № 4 (слов. яз.)*

**Kubon Z. et al.** Влияние термообработки сварных изделий, выполненных из хромомолибденованадиевых сталей на срок службы труб котлов, с. 105–110.

**Rybin V. V. et al.** Исследование биметаллического соединения ромбического алюминиды титана с титановым сплавом (диффузионная сварка), с. 205–210.

**Bernasovsky P. et al.** Анализ разрушения, наблюдаемого в тавровом соединении трубопровода для подачи водорода, с. 111–114.

**Kovacik M., Hyza R.** Ультразвуковые методы испытания сварных швов и критерии приемки, с. 115–118.

*ZVARANIE — SVAROVANI (Словакия) 2007. — Рос. 56, № 5 (слов. яз.)*

**Sejc P., Belanova J.** Возможное использование технологии сварки/пайки МИГ при изготовлении металлургических соединений из стальных и алюминиевых толстых листов, с. 135–138.

**Mraz L. et al.** Определение температуры предварительного нагрева в соответствии со стандартом STN UT 1011-2 и компьютерной программой VUZ-PI SR, с. 139–144.

**Matysova M.** Лазерная пайка автомобильных кузовов, с. 145–147.

*ZVARANIE — SVAROVANI (Словакия) 2007. — Рос. 56, № 6–7 (слов. яз.)*

**Hakl J. et al.** Стойкость к текучести стали 0,5Cr–0,5Mo–0,3V после длительной работы, с. 163–166.

**Hobbacher A. F.** Рекомендации МИС по усталости сварных компонентов и конструкций — после пересмотра и расширения, с. 167–173.

*ZVARANIE — SVAROVANI (Словакия) 2007. — Рос. 56, № 8 (слов. яз.)*

**Tatarko et al.** Структура и свойства игольчатого феррита в конструкционных свариваемых сталях, с. 211–215.

**Kalna K.** Расчет сварных конструкций относительно усталостного разрушения в соответствии с рекомендациями МИС, с. 215–219.

## НОВАЯ КНИГА

**В. В. Матвеев. Восстановление железнодорожных колес наплавкой.** — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2007. — 152 с.

В монографии рассмотрены некоторые причины возникновения дефектов в ободьях вагонных колес и рельсов, снижающих устойчивость и безопасность движения, мероприятия, которые с различной эффективностью осуществляются на железных дорогах мира. Исходя из опыта автора по наплавке изношенных гребней вагонных колес в действующем цикле их ремонта на вагоноремонтных предприятиях Украины, предложены новые технологии восстановления поверхности катания колес наплавкой после ее отжига.

Для технического персонала вагоноремонтных предприятий, научных сотрудников и руководящих работников, ответственных за безопасность движения на железнодорожном транспорте, предпринимателей, занимающихся ремонтом собственных вагонов, а также студентов вузов.





## ЕЖЕГОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА АМЕРИКАНСКОГО СВАРОЧНОГО ОБЩЕСТВА

С 11 по 14 ноября 2007 г. в Чикаго проходила ежегодная конференция и выставка Американского сварочного общества и двух машиностроительных ассоциаций. Нынешняя выставка AWS существенно превзошла по количеству участников аналогичные выставки в 2006 г. в Атланте (на 30 %) и в 2005 г. в Далласе (почти на 50 %). Следует отметить ограниченное количество иностранных делегаций, приехавших на ежегодное собрание AWS в 2007 году. Отличительной чертой прошедшей выставки явилось большое количество фирм, демонстрирующих работы различного назначения. Так, 51 фирма представила работы для дуговой сварки, дополнительно 13 фирм — для лазерной сварки и 7 фирм — для контактной сварки.

На церемонии открытия президент AWS г-н Gerald Utrachi выступил с докладом, в котором сосредоточил основное внимание на острую нехватку в США квалифицированных рабочих как в строительстве, так и в обновлении промышленных и гражданских объектов, где широко используются различные виды сварки. Это существенно сдерживает выполнение этих работ.

Анализ рынка рабочей силы в США, проведенный Институтом производителей, показал, что около 80% производителей не могут найти квалифицированных рабочих для обеспечения конкурентоспособности их компаний на мировом рынке.

К 2020 г. в США ожидается потребность в 10 млн новых квалифицированных рабочих, которые должны прийти на смену стареющим рабочим, родившимся в период бума рождаемости.

Касательно сварочной индустрии г-н Utrachi отметил, что в 2007 г. порядка 50 тыс. сварщиков из общего количества в США 500 тыс. уйдут на пен-

сию. Средний возраст сварщиков в США составляет 54 года, т. е. количество рабочих, уходящих на пенсию все время возрастает. Одновременно отмечалось, что количество обучающихся на сварщика намного меньше, чем уходящих на пенсию. При такой тенденции к 2010 г. нехватка опытных сварщиков составит порядка 200 тыс. человек. Было отмечено, что с аналогичными проблемами сталкиваются и в таких странах, как Германия, Дания, КНР, Корея, страны Южной Америки.

При этом попытки решить эту проблему путем повышения оплаты работы сварщиков практических результатов не дают, за исключением Южной Кореи. Сварка, к сожалению, рассматривается в обществе как «черное и грязное» занятие. Во многих школах из программы исключают информацию по сварке. Родители не поощряют выбор детьми этих специальностей, хотя сегодня зарплата сварщика составляет в пределах от 30 до 60 тыс. дол. в год. Одним из путей улучшения ситуации видится привлечение промышленных фирм для создания специальных подготовительных программ по сварке при обучении школьников старших классов и выделение дополнительных стипендий. Кроме того, привлекательной идеей является более активное обучение и использование женщин-сварщиков, как это было во время Второй мировой войны, когда женщины составляли до 30 % всех сварщиков в США.

В докладе г-н Utrachi также отметил, что в последние годы средний возраст членов AWS неуклонно увеличился и на сегодня 21 % членов общества являются пенсионерами.

В. К. Кривенко, канд. техн. наук

## МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ В ЕГИПТЕ

2–9 декабря 2007 г. в Хургаде (Египет) состоялась 6-я Международная научно-техническая конференция «Повышение качества, надежности и долговечности технических систем и технологических процессов», организованная Национальным Советом Украины по машиноведению (Национальным комитетом ИГТОММ) и Хмельницким национальным университетом. В конференции приняли участие ученые

из девяти стран: Украины, России, Белоруссии, Грузии, Литвы, Латвии, Польши, Румынии и Израиля. Украину представляли такие организации, как Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН, Институт общей и неорганической химии им. В. И. Вернадского НАНУ, Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАНУ, Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, НТУУ



«Киевский политехнический институт», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Национальная металлургическая академия Украины (г. Днепропетровск), Донбасская государственная машиностроительная академия (г. Краматорск), Военная академия обороны Украины, Одесский национальный морской университет, Хмельницкий национальный университет, Казенное предприятие «Форт» Министерства внутренних дел Украины, фирма «РОЗЕН Европа» (г. Киев) и др. Наряду с членами национальных академий наук Украины, России, Литвы и Латвии в конференции приняли участие молодые ученые этих стран.

На конференции работали следующие секции: математического моделирования работы технических систем и технологических процессов; динамики и колебаний; новых технологий производства, включая нанотехнологии; специальных вопросов повышения качества и долговечности технических систем и технологических процессов. Представлено было около 50 докладов.

Наибольший интерес вызвали доклады чл.-кора НАН Украины В. А. Макары о наноструктурах кристаллов кремния, ст. науч. сотруд. Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины Д. М. Калекко «Импульсная дуговая обработка поверхности», проф. Рижского технического университета Р. С. Закржевского о хаотических колебаниях в нелинейных динамических системах, ст. науч. сотруд. Каунасского технологического университета В. Барзайтиса о долговечности роторных систем, доц. Гродненского государственного университета им. Янки Купалы А. В. Богдановича «Оценка долговечности силовых систем по критериям локального

повреждения», проф. Самарского государственного технического университета М. Ю. Лившица «Оптимизация переходных режимов технологических установок непрерывного действия».

В большинстве докладов были продемонстрированы новые подходы к решению задач оптимизации структуры и свойств материалов (А. И. Михалев, С. З. Полищук (Днепропетровск), Р. И. Сидин, В. П. Ройзман (Хмельницкий), В. А. Макара, Д. М. Калекко, В. С. Кублановский (Киев), О. Кирилова (Рига), М. Заковска, И. Петрашек (Краков)), оценке надежности конструкций и методам ее повышения (А. В. Шахов (Одесса), А. И. Деревянко, Ю. С. Пройдак (Днепропетровск), В. П. Ройзман, В. П. Ткачук, А. Горошко (Хмельницкий), И. Андрусенко (Клайпеда), А. Палевичус, А. Бубулис (Каунас), Л. И. Сердюк (Полтава), Л. М. Любчик (Харьков), О. В. Бакаев (Киев), Г. П. Клименко, В. Д. Ковалев (Краматорск), Р. А. Варбанец, В. П. Сторожев (Одесса), Б. С. Воронцов (Луганск), А. В. Богданович, А. В. Гродненский (Минск), Г. И. Туманишвили (Тбилиси)), моделированию неравновесного поведения систем и механизмов (В. И. Корсуи, А. И. Деревянко (Днепропетровск), М. Ю. Лившица (Самара), М. Я. Постан, А. В. Шахов (Одесса), В. П. Ройзман (Хмельницкий), П. Мазенка (Клайпеда), В. М. Сокол (Арад), М. В. Закржевский (Рига)).

Участники конференции отметили высокий уровень ее организации и качество докладов. Достигнуты договоренности о представлении на международных конкурсы Евросоюза совместных проектов украинских специалистов с учеными Литвы и Грузии.

Участники конференции выразили надежду на продолжение этих конференций в будущем и пожелание оргкомитету впредь выдавать сертификат об участии в конференции, как документ о повышении квалификации.

На 2008 г. намечено проведение конференции «Современные достижения в науке и образовании» в Израиле с 28 сентября по 5 октября и «Повышение качества, надежности и долговечности технических систем и технологических процессов» в Египте с 7 по 14 декабря.

В. П. Ройзман, д-р техн. наук



## УКРАИНСКО-РОССИЙСКИЙ СЕМИНАР ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

6–7 февраля 2008 г. в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины состоялся семинар по сварке, неразрушающему контролю качества и технической диагностике при изготовлении и ремонте оборудования и трубопроводов энергоблоков АЭС с участием российских специалистов. Направленность работы семинара — обеспечение надежности и безопасной эксплуатации атомных энергетических установок.

Российскую сторону представляли специалисты ЦНИИГМАШ (г. Москва) — головной материаловедческой организации РФ в области атомной энергетики и генерального проектировщика оборудования энергоблоков с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 ОКБ «Гидропресс» (г. Подольск). От Украины участие принимали специалисты ИЭС им. Е. О. Патона, ГП НАЭК «Энергоатом», Южно-Украинской АЭС, Ровенской АЭС, Запорожской АЭС, завода «Атомэнергомаш», предприятия «Атомремонтсервис», ОАО «Южтеплоэнергомонтаж» и других организаций. Всего в работе семинара участвовали 52 специалиста.

В ходе работы семинара было заслушано 16 докладов, в том числе четыре доклада с российской стороны. Были представлены работы ЦНИИГМАШ, обобщающие опыт ремонта с использованием сварки оборудования и трубопроводов АЭС за последние пять лет (2003–2007 гг.), а также фундаментальная работа по технологии ультразвукового контроля оборудования и трубопроводов АЭС. Весьма интересные и содержательные доклады были представлены ИЭС им. Е. О. Патона. Были заслушаны результаты работ по ремонтной сварке трубопроводов с использованием процесса TIG и применением активаторов, представлены технологические разработки по подводной сварке при ремонте оборудования АЭС, разработки по новым электродам для ручной электродуговой сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей, а также сделаны сообщения по технологиям нанесения защитных покрытий при ремонте ответственных узлов оборудования. Большой интерес и дискуссию вызвали доклады сотрудников ИЭС о допустимости выяв-



ляемых дефектов в металле трубопроводов и оборудования АЭС. Российские коллеги проявили заинтересованность к разработкам ИЭС по получению полых слитков ЭШП для производства поковок при изготовлении коллекторов парогенераторов и другого корпусного оборудования атомных энергоблоков.

В результате проведенного семинара, взаимных консультаций и обмена опытом между украинскими и российскими специалистами были сформулированы основные направления совместных работ в области сварочных технологий, контроля качества и технической диагностики при изготовлении и ремонте оборудования и трубопроводов АЭС.

А. С. Царюк, канд. техн. наук