

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

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

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

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

УЧРЕДИТЕЛИ:

Национальная академия наук Украины,
ИЭС им. Е. О. Патона,
МА «Сварка»

ИЗДАТЕЛЬ:
МА «Сварка»

Адрес редакции:
03680, Украина, Киев-150,
ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАНУ
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277
Факс: (38044) 200 5484, 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
URL: www.rucont.ru

Редакторы:

Е. Н. Казарова, Т. В. Юштина
Электронная верстка:
И. Р. Наумова, 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**

За содержание рекламных
материалов редакция журнала
ответственности не несет

Цена договорная

СОДЕРЖАНИЕ

Новости 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Зяхор И. В., Кучук-Яценко С. И. Сварка трением жаропрочной стали, полученной технологией литья порошков под давлением, со сталью 40X 5

Гринберг Б. А., Елкина О. А., Пацелов А. М., Иноземцев А. В., Плотников А. В., Волкова А. Ю., Иванов М. А., Рыбин В. В., Бешапошников Ю. П. Проблемы перемешивания и расплавления при сварке взрывом (алюминий–тантал)..... 15

Хорунов В. Ф., Максимова С. В., Стефанив Б. В. Влияние палладия на структуру и технологические свойства припоев системы Ag–Cu–Zn–Ni–Mn 23

Кныш В. В., Барвинко А. Ю., Барвинко Ю. П. Обоснование критерия «течь перед разрушением» применительно к вертикальным цилиндрическим резервуарам для хранения нефти 29

Лебедев А. В. Транзисторные источники питания для электродуговой сварки (Обзор)..... 34

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Царюк А. К., Иваненко В. Д., Скульский В. Ю., Моравецкий С. И., Гаврик А. Р., Стрижиус Г. Н., Нимко М. А., Мазур С. И., Тройняк А. А., Один Ю. В., Деркач О. В., Куран Р. И. Технология ремонтной сварки узлов котлоагрегатов без последующей термообработки 41

Сенчишин В. С., Пулька Ч. В. Современные методы наплавки рабочих органов почвообрабатывающих и уборочных сельскохозяйственных машин (Обзор) 48

Голобородько Ж. Г. Опыт наплавки судовых гребных валов на ПАО «ХСЗ» 55

Кузьменко О. Г. Влияние состава флюса на теплофизические и физико-химические процессы при электрошлаковой наплавке жидким металлом..... 57

ХРОНИКА

Международный конкурс сварщиков в Китае 61

IV Международная конференция «Новейшие технологии и оборудование для термической резки металла. Повышение его эффективности и безопасности»..... 63

65-я Ежегодная ассамблея Международного института сварки..... 65

Семинар по сварке и наплавке для специалистов железнодорожного транспорта Украины 67

Ю. В. Демченко – 60 68

Памяти Ю. М. Юзькива 69

Новые книги 70

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B. E. PATON

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

THE INTERNATIONAL
EDITORIAL COUNCIL:

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

FOUNDERS:

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

PUBLISHER:

International Association «Welding»

Address of Editorial Board:

11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (38044) 200 63 02, 200 82 77
Fax: (38044) 200 54 84, 200 82 77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
URL: www.rucont.ru

Editors:

E. N. Kazarova, T. V. Yushina
Electron galley:
I. R. Naumova, A. I. Sulima
State Registration Certificate
KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved

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

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

CONTENTS

News 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Zyakhor I.V., Kuchuk-Yatsenko S.I. Friction welding of heat-resis-
tant steel, produced by the powder injection moulding technology,
with steel 40X 5

*Grinberg B.A., Elkina O.A., Patselov A.M., Inozemtsev A.V.,
Plotnikov A.V., Volkova A.Yu., Ivanov M.A., Rybin V.V.,
Besshaposhikov Yu. P.* Problems of stirring and melting in
explosion welding (aluminium -tantalum) 15

Khorunov V.F., Maksymova S.V., Stefaniv B.V. Effect of palladium
on structure and technological properties of Ag–Cu–Zn–Ni–Mn
system brazing filler metals 23

Knysh V.V., Barvinko A.Yu., Barvinko Yu.P. Substantiation of
the leak to fracture criterion as applied to vertical cylindrical oil
storage tanks 29

Lebedev A.V. Transistorised power supplies for electric arc
welding (Review) 34

INDUSTRIAL

*Tsaryuk A.K., Ivanenko V.D., Skulsky V.Yu., Moravetsky S.I.,
Gavrik A.R., Strizhius G.N., Nimko M.A., Mazur S.I., Troinyak A.A.,
Odin Yu.V., Derkach O.V., Kuran R.I.* Technology for repair welding
of boiler assemblies without post-weld heat treatment 41

Senchishin V.S., Pulka Ch.V. Modern methods for hardfacing of
operating tools of tillage and harvester agricultural
machinery (Review) 48

Goloborodko Zh.G. Experience in cladding of marine propeller
shaft at PJSC "Kherson Shipyard" 55

Kuzmenko O.G. Effect of flux composition on thermal-physical and
physical-chemical processes occurring in ESSLM 58

NEWS

International competition of welders in China 61

IV International Conference «Newest technologies and equipment
for thermal cutting of metal. Increase of its efficiency and safety» 63

65th Annual Congress of IIW 65

Seminar on welding and surfacing for specialists of railway
transport of Ukraine 67

Yu.V. Demchenko is 60 68

In memory of Yu.M. Yuskiv 69

New books 70

НАНЕСЕНИЕ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕДНЫЕ ПЛИТЫ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МНЛЗ МЕТОДОМ НАПЛАВКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

В процессе непрерывной разливки стали происходит интенсивный износ внутренних поверхностей кристаллизаторов, что выдвигает очень высокие требования к качеству поверхности медных плит. Наибольшую работоспособность имеют медные плиты, с нанесенным на них никелевым покрытием, что приводит к повышению износостойкости медных плит в 3-4 раза.

В ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины создана технология наплавки никеля на медные плиты МНЛЗ методом наплавки трением с перемешиванием (НТП), в основе которого заложен метод сварки трением с перемешиванием (СТП).

Сварка выполняется торцом вращающегося инструмента, имеющего выступающий штырь, который перемещается в металле шва в направлении сварки. Пластификация металла происходит при трении инструмента о металл по стыку свариваемых поверхностей, что приводит к его перемешиванию и формированию сварного шва.

Материал инструмента для наплавки должен быть жаростойким и жаропрочным, что позволяет работать при температурах 1000-1200°C. Важную роль при этом играет и форма инструмента. Так, наилучшие результаты были получены при использовании конусного штыря инструмента.

Рабочие инструменты изготавливали из сверхтвердых материалов — вольфрамкобальтовых твердых сплавов с микродобавками тугоплавких соединений, кубического нитрида бора, и они имели сложную конфигурацию.

При перемещении инструмента образуется нахлесточный прорезной шов. Последовательное наложение таких швов с перекрытием позволяет наплавить никель на медную плиту.



Процесс наплавки покрытия методом НТП



Фрагмент 10-миллиметровой медной плиты, наплавленной никелем толщиной 3,5 мм

СФЕРИЧЕСКИЙ КАРБИД ВОЛЬФРАМА

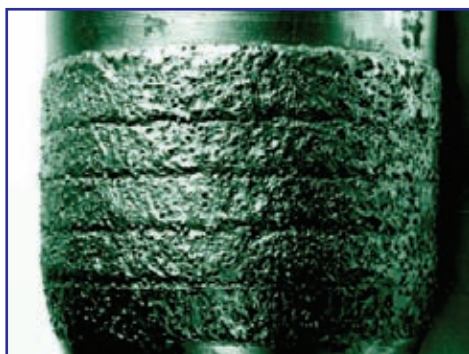
В ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины разработана технология производства порошковых тугоплавких материалов, в частности литых карбидов вольфрама $WC+W_2C$, с гранулами сферической формы методом термоцентробежного распыления. Создана специализированная установка для термоцентробежного распыления «СФЕРА-2500», позволяющая получать гранулы размером от 50 до 850 мкм, с производительностью 15-20 кг материала в час.



Установка для термоцентробежного распыления «СФЕРА-2500»



Общий вид сферических гранул плавящихся карбидов вольфрама



Замок буровой трубы, наплавленный сферическим карбидом вольфрама

Гранулированные карбиды вольфрама с твердостью $HV_{01} \geq 3000$ МПа по своим физико-механическим и технологическим качествам значительно превосходят аналогичные материалы и с успехом применяются для повышения износостойкости деталей бурового оборудования и инструмента.

Разработанный материал широко применяется для плазменно-порошковой, лазерной и ацетилено-кислородной наплавки, а также упрочнения деталей методом пропитки.

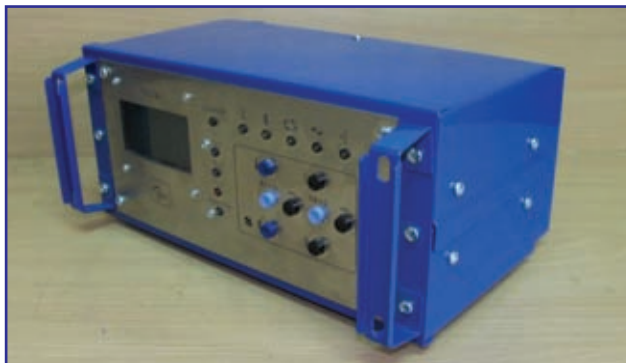
На базе порошков плавящихся карбидов вольфрама со сферическими гранулами разработан ленточный наплавочный материал сечением $8,0 \times 3,0$ мм, который поставляется в бухтах для автоматической плазменной наплавки или прутках для ацетилено-кислородной и атомно-водородной наплавки деталей бурового оборудования.

РЕГУЛЯТОР КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Компанией ООО «Оберт» (г. Киев), специализирующейся на разработке и изготовлении электроавтоматики для сварочных машин, разработан регулятор контактной сварки РКСМ, предназначенный для управления циклом сварки многоточечными машинами контактной сварки переменного тока.

Отличительной особенностью регулятора является возможность установки до 99 сварочных режимов с циклическим их изменением в процессе работы сварочной машины.

Регулятор цикла сварки может управлять восемью клапанами непосредственно и до 32-х с использованием внешнего расширителя выходов.



Основные технические характеристики регулятора

Потребляемая мощность, В·А, не более	30
Габаритные размеры, м	0,16×0,16×0,29
Масса, кг, не более	4
Количество импульсов сварочного тока	1...99
Пределы регулирования выдержек времени сварочного цикла (сжатие-сварка-пауза между импульсами сварки-охлаждение-проковка), с	0...399
Пределы регулирования действующего значения сварочного тока, %	0...99
Длительность нарастания сварочного тока (модуляция) программируется в пределах, %	0...99
Пределы регулировки коэффициента мощности нагрузки	0,2...0,8
Параметры импульсов включения тиристоров:	
напряжение, В	24
длительность импульса, мкс	200±150
Параметры сигнала для питания выходных устройств постоянного тока:	
напряжение, В	24±2
ток, А, не более	0,4
Количество исполнительных устройств	до 8
Количество входов (включая педаль)	4

ВКЛАД СУМСКИХ МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ В ОСНАЩЕНИЕ КОСМОДРОМА КУРУ

ЧАО «Сумское НПО им. М.В.Фрунзе» входит в группу компаний «Энергетический стандарт» и является одним из крупнейших производителей газоперекачивающих агрегатов и комплектных компрессорных станций разного назначения; широкой номенклатуры насосов, компрессоров, центрифуг, оборудования для химической, газовой и нефтеперерабатывающей промышленности в Европе.

По информации пресс-службы акционерного общества, космический проект, получивший название «Союз» в Гвианском космическом центре, осуществляется на основе межправительственного соглашения между Российской Федерацией и Францией, подписанного еще в 2003 г. Согласно масштабной программе планировалось строительство современного комплекса запуска и создание нового типа ракеты-носителя - адаптированного для старта в Французской Гвиане.

Объединение внесло свой вклад и в успешный старт ракеты «Союз-СТ» с Гвианского космического центра, известного также как космодром Куру. Сумские машиностроители изготовили ряд сварных конструкций для новой стартовой системы (стрелы, фермы, септора и другие механизмы).

Гвианский космический центр построен на Атлантическом побережье Французской Гвианы (северо-восточный берег Южной Америки) и расположен всего в 500 км к северу от экватора. Это дает преимущества для запуска спутников на геостационарную орбиту, а именно: нуждается в минимальных изменениях в траектории их движения.

Носители также выиграют от эффекта «пращи», когда энергия создается вращением Земли вокруг своей оси. К тому же, благодаря такому расположению космического центра, ракета «Союз-СТ» (новая модификация «Союза-2», специально разработанная российскими специалистами для стартов с Куру) может выводить на орбиту космические аппараты большей массы, чем при запусках с космодромов Байконур и Плесецк.





СВАРКА ТРЕНИЕМ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ ЛИТЬЯ ПОРОШКОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ, СО СТАЛЬЮ 40X

И. В. ЗЯХОР, канд. техн. наук, академик НАН Украины **С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО**
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены экспериментальные данные по оценке структуры жаропрочной стали AISI310, полученной технологией литья порошков под давлением, и результаты исследований особенностей формирования разнородных соединений стали AISI310 с конструкционной сталью 40X при различных термодеформационных циклах сварки трением, применительно к изготовлению биметаллических валов ротора турбокомпрессора автомобильных двигателей.

Ключевые слова: сварка трением, биметаллические соединения, литье порошков под давлением, сварные соединения, валы роторов турбокомпрессоров

Одним из новых методов порошковой металлургии является литье порошков под давлением [1–5], известное в англоязычной литературе под общим названием PIM-технология (Powder Injection Molding). В последние годы литье порошков под давлением получает все большее распространение в силу ряда преимуществ перед традиционными методами металлообработки, в первую очередь при производстве деталей со сложными геометрическими формами и большими объемами производства. По данным [3] плотность конечных изделий при PIM-технологии составляет от 96 до 100 % теоретического значения, а имеющиеся поры и неметаллические включения имеют малые размеры, сферическую форму и распределены равномерно по объему.

Перспективным рынком потребления изделий, полученных PIM-технологией, является автомобильное двигателестроение. Актуальным с технологической и экономической точек зрения является использование PIM-технологии для изготовления деталей сложной формы, какими являются колеса биметаллических валов ротора турбокомпрессора (ТКР) автомобильных двигателей. По сравнению с используемым в настоящее время литьем по выплавляемым моделям PIM-технология обеспечивает более высокую производительность, минимальные допустимые отклонения раз-

меров и высокое качество поверхности колес для валов роторов ТКР.

Технологический цикл изготовления биметаллических валов ТКР предусматривает сварку трением (СТ) колеса, изготовленного из жаропрочного сплава, с хвостовиком из конструкционной стали. СТ успешно применяют для соединения материалов, полученных методами литья, термомеханической деформации и порошковой металлургии [6–8], однако в технической литературе не удалось обнаружить информации о применении СТ, для изделий, полученных PIM-технологией. Представляет научный и практический интерес изучение влияния структуры PIM-материалов на возможность их соединения с конструкционной сталью применительно к изготовлению биметаллических валов роторов ТКР.

Цель работы состояла в изучении формирования разнородных соединений жаропрочной стали AISI310, полученных с использованием PIM-технологии, с конструкционной сталью 40X при различных термодеформационных циклах СТ применительно к изготовлению биметаллических валов роторов ТКР.

Общий вид колес для вала ТКР, изготовленных PIM-технологией из стали AISI310 (исходное сырье «Catamold» [3] фирмы BASF), представлен на рис. 1. Химический состав свариваемых материалов и показатели механических свойств представлены в таблице.

Нержавеющая сталь аустенитного класса AISI310 (отечественный аналог — сталь

Химический состав и механические свойства свариваемых материалов

Марка стали	Химический состав, мас. %							Механические свойства			
	C	Cr	Nb	Si	Mn	Fe	Ni	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
AISI310	< 0,2	24...26	< 0,2	1,5...2,0	1,0...1,4	Основа	18...21	> 205	> 515	> 40	> 50
40X	0,36...0,4	0,8...1,1	—	< 0,35	0,5...0,8	»	< 0,3	> 720	> 860	< 14	< 60

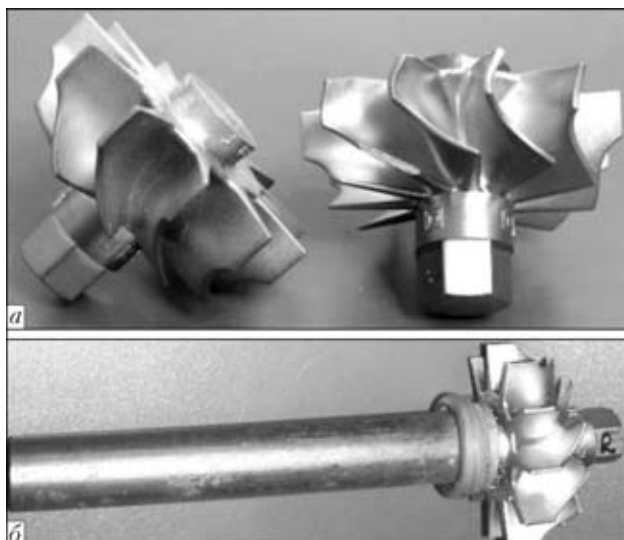
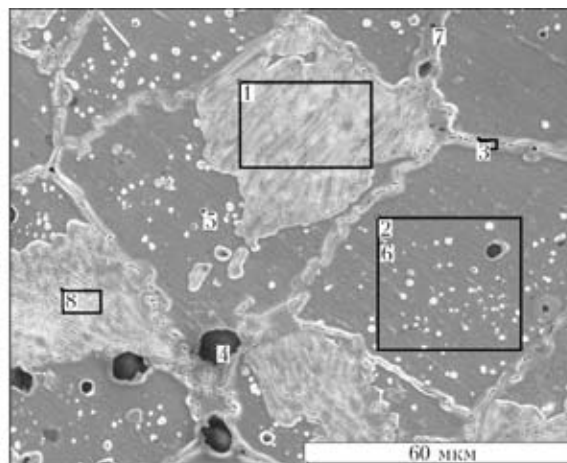


Рис. 1. Колеса для валов ротора ТКР из стали AISI310, полученные с использованием PIM-технологии (а), сварной вал ротора ТКР (б)

20X25H20C2 (ЭИ283)) сочетает удовлетворительную жаропрочность и высокую стойкость против окисления при высоких температурах. Для получения биметаллических валов ротора ТКР выполняли СТ колес из стали AISI310 с хвостовиками из стали 40X при различных режимах конвенционной и комбинированной СТ [7, 8].

Эксперименты по СТ проводили на установке СТ120, модернизированной для реализации различных термомеханических циклов, которые соответствуют конвенционной, инерционной и комбинированной СТ [9]. Структуру свариваемых материалов и биметаллических соединений изучали с использованием оптической микроскопии («Neophot-32», Германия) и растровой электронной микроскопии (РЭМ) (JSM-35CA, «Jeol», Япония). Проводили микроанализ (EDS-анализатор «INCA-450» фирмы «Oxford Instruments», Великобритания с диаметром зонда около 1 мкм) и измерение микротвердости металла зоны соединения при нагрузке 1...5 Н (микротвердомер М400, «LECO», США).



Спектр	C	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb
1	0,14	0,63	19,13	0,69	52,76	24,19	2,44
2	0,11	1,19	24,30	0,10	50,18	21,69	2,43
3	0,18	0,88	21,40	1,12	53,87	22,57	0,00
4	0,42	83,91	8,49	1,61	2,97	1,46	1,14
5	0,40	1,02	24,65	0,94	51,73	21,18	0,08
6	0,12	0,72	24,37	1,12	52,62	20,15	0,90
7	0,16	0,28	24,49	0,29	53,16	21,61	0,00
8	0,20	0,90	18,35	1,30	56,84	21,45	0,96

Рис. 3. Микроструктура основного металла стали AISI310 (РЭМ) и результаты микроанализа металла исследуемых участков (мас. %)

Параметры режима СТ изменяли в следующих пределах: давление при нагреве $P_n = 50...150$ МПа, давление проковки $P_{пр} = 150...300$ МПа, окружная скорость $v = 0,5...2,5$ м/с, время нагрева $t_n = 5...30$ с, время торможения вращения $t_T = 0,2...2,5$ с, скорость осадки при нагреве $v_{ос.н} = 0,1...1,0$ м/с. Диаметр свариваемых образцов составлял 15 мм.

Микроструктуры основного металла стали AISI310 и состав структурных составляющих представлены на рис. 2 и 3. Кристаллическая структура стали AISI310 равноосная, с размером зерна около 60 мкм. При оптической микроскопии различаются темные и светлые зерна (рис. 2, а), а также отдельные поры размером до 15 мкм по границам зерен и произвольно расположенные частицы неметаллических включений SiO_2 размером 2...10 мкм (рис. 3, спектр 4).

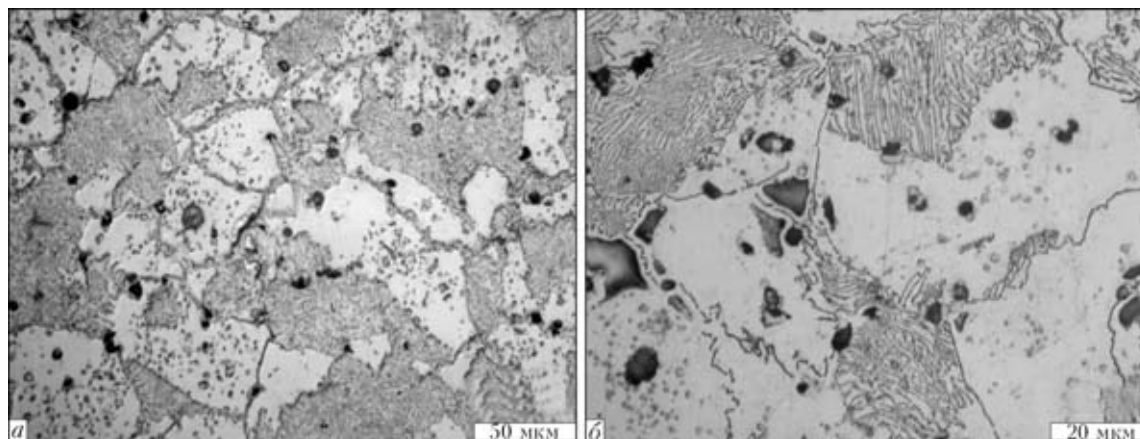


Рис. 2. Микроструктуры стали AISI310, оптическая микроскопия

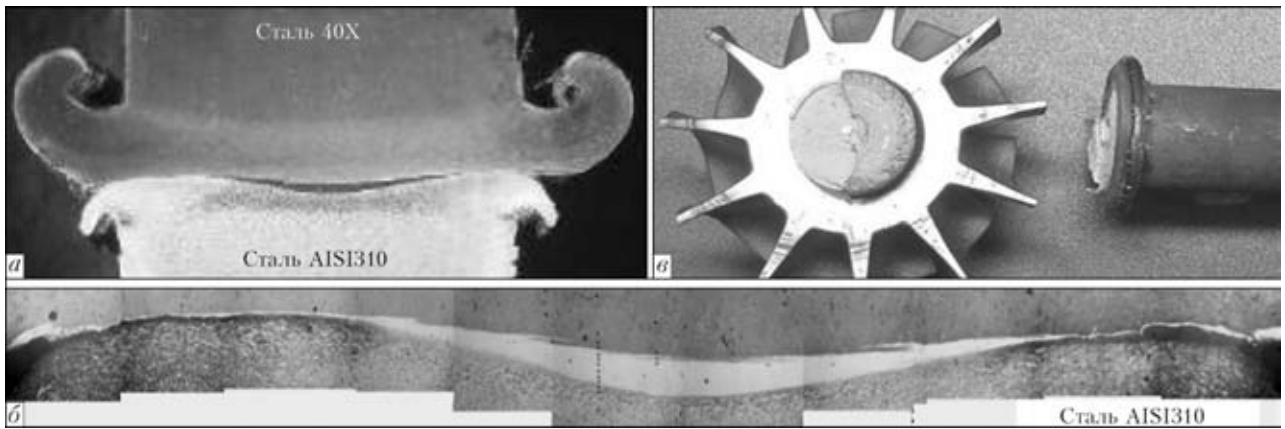


Рис. 4. Макрошлиф соединения сталей AISI310 и 40X, полученного на режиме 1 (а), панорама сечения сварного соединения (б) и сварной вал ротора ТКР после испытаний на разрыв (в)

Структура темных зерен (см. рис. 3, спектры 1, 8) lamellarная, состоит из чередующихся светлых и темнотравящихся пластин толщиной менее 1 мкм. Содержание хрома в зернах с lamellarной структурой несколько ниже по сравнению с его содержанием в светлых зернах. Химический состав светлых зерен (спектр 2) соответствует требованиям стандарта AISI, за исключением повышенного содержания ниобия. В теле светлых зерен различимы дисперсные (1...2 мкм) частицы округлой формы (спектры 5, 6) по химическому составу, не отличающиеся от такового для тела зерна, однако, с меньшим содержанием ниобия. Существенной ликвации легирующих элементов и примесей по границам зерен не выявлено (спектры 3, 7). Наличие зерен с lamellarной структурой свидетельствует о том, что процесс спекания выполняли при температуре, близкой к $T_{solidus}$ [10–12].

Исследования формирования разнородных соединений сталей AISI310 и 40X проводили при различных термомеханических циклах, соответствующих конвенционной и комбинированной СТ.

Режим 1 («мягкий» режим) — конвенционная сварка трением (КСТ) [7, 8] с минимальными значениями P_n , $P_{пр}$, t_n и максимальными v , t_n из исследуемых диапазонов. Режим 2 («жесткий» режим) — КСТ с максимальными значениями P_n ,

$P_{пр}$ и минимальными v , t_n , t_t из исследуемых диапазонов. Режим 3 — разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона технология комбинированной СТ с управляемой деформацией. При этой технологии значения v , P_n устанавливали исходя из обеспечения определенной скорости деформации (осадки) при нагреве, которую изменяли в процессе нагрева в диапазоне $v_{ос.н} = 0,1...1,0$ м/с, приложении давления проковки $P_{пр}$ выполняли на стадии регулируемого по заданной программе торможения вращения [9]. При комбинированной СТ значения t_n , t_t устанавливали исходя из результатов предварительных опытов таким образом, чтобы общая осадка для всех исследуемых режимов составляла $\Delta_{св} = 6$ мм.

Как видно из рис. 4, а, деформация заготовок при сварке на режиме 1 преимущественно происходит за счет стали 40X. В зоне соединения наблюдается неравномерная по сечению заготовок переходная зона (см. рис. 4, б) шириной от

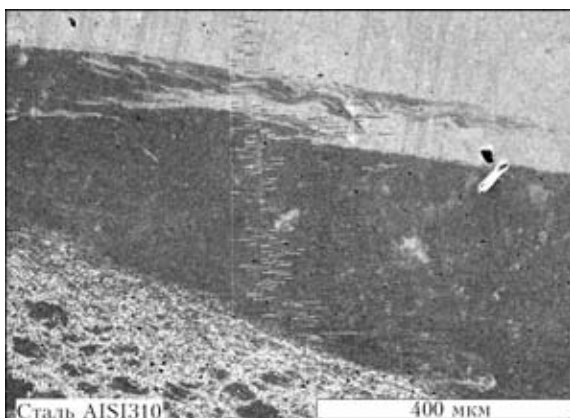


Рис. 5. Микроструктура соединения сталей AISI310 и 40X (режим 1)

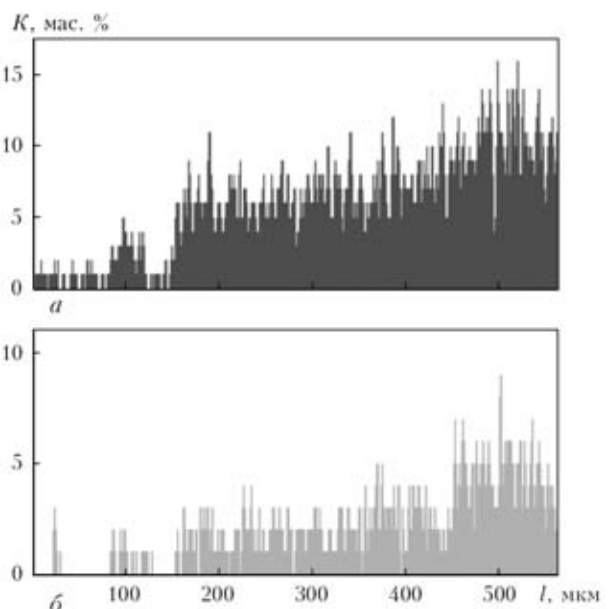


Рис. 6. Распределение хрома (а) и никеля (б) поперек зоны соединения сталей AISI310 и 40X (режим 1)

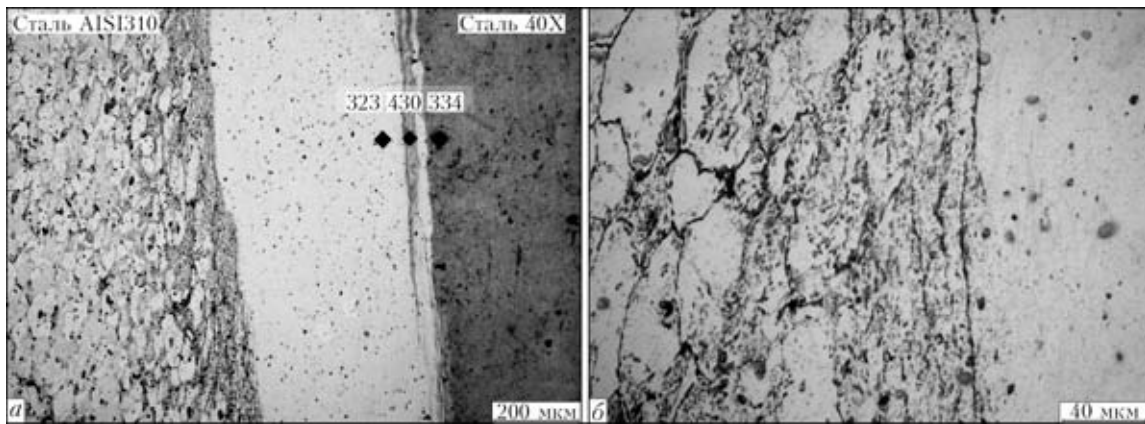


Рис. 7. Микроструктуры переходной зоны (а) (отпечатки уколов $HV\ 3, MPa \cdot 10^{-1}$) и металла соединения со стороны стали AISI310 (б)

25 мкм в периферийной части сечения до ~500 мкм в центре.

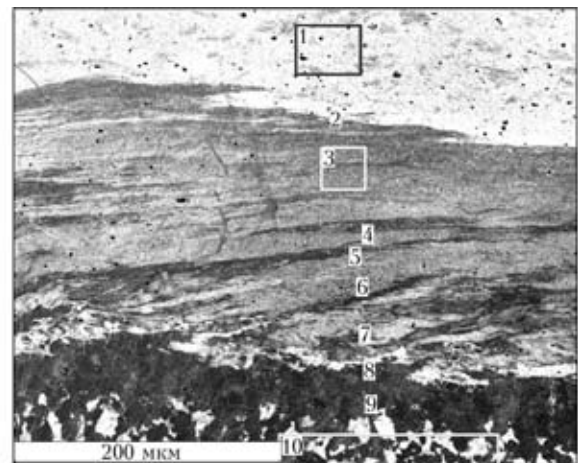
При микрорентгеноспектральном анализе фиксируется переменный состав переходной зоны по ширине (см. рис. 5 и 6). Наличие равномерно распределенных неметаллических включений SiO_2 в переходной зоне свидетельствует о том, что последняя образуется со стороны стали AISI310. Размер частиц SiO_2 в переходной зоне составляет 3...4 мкм, что может свидетельствовать о частичном их растворении. Монотонное увеличение концентрации хрома и никеля при переходе от стали 40X к стали AISI310 (рис. 6), очевидно, связано с диффузионным перемещением этих элементов в процессе сравнительно длительной стадии нагрева трением ($t_n = 30$ с). В переходной зоне со стороны стали 40X наблюдаются прослойки промежуточного между свариваемыми сталями состава (см. рис 5, 6), имеющие повышенную твердость (рис. 7). Формирование прослоек такого состава может быть результатом перемешивания приконтактных объемов металла свариваемых сталей в жидком или твердожидком состоянии на начальных стадиях СТ. Наличие таких прослоек ухудшает пластичность и снижает коррозионную стойкость соединений [13, 14].

В зоне термомодеформационного влияния со стороны стали AISI310 наблюдаются деформированные вытянутые в радиальном направлении зерна (рис. 7), остаточная пористость основного металла в этой зоне сохраняется. В непосредственной близости к переходной зоне сталь AISI310 имеет волокнистую структуру с размером структурных составляющих до 10 мкм. Сегрегаций неметаллических включений SiO_2 и пор в этой зоне не выявлено.

Для выявления структуры переходной зоны проводили отжиг сварного соединения и повторное травление. В результате выявлено слоистое строение переходной зоны и промежуточный между свариваемыми сталями состав слоев (рис. 8, спектры 3...8).

При испытаниях сварных соединений на разрыв разрушение происходит по зоне соединения (см. рис. 6, б). Химический состав металла с обеих сторон излома приблизительно соответствует стали AISI310. Фрактографические исследования изломов выявили наличие в пределах сечения двух видов разрушения — вязкого и квазихрупкого (рис. 9). Наблюдается повышенное содержание ниобия по всей поверхности излома, особенно в кольцевом участке хрупкого излома (рис. 9, спектр 2).

Результаты фрактографических исследований показывают, что разрушение соединения происходит между переходной зоной и сталью AISI310 и



Спектр	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb
1	1,77	21,93	0,00	51,76	22,20	2,33
2	0,85	16,51	0,00	57,09	25,55	0,00
3	0,82	12,77	1,52	72,14	11,05	1,70
4	0,00	10,65	0,00	80,97	8,38	0,00
5	0,62	11,38	1,33	73,68	13,00	0,00
6	0,00	10,05	1,55	74,22	12,86	1,32
7	0,49	10,83	1,45	71,76	15,47	0,00
8	0,67	8,62	0,97	81,25	8,49	0,00
9	0,00	0,78	1,18	98,04	0,00	0,00
10	0,00	1,00	0,99	98,01	0,00	0,00

Рис. 8. Микроструктура соединения сталей AISI310 и 40X после отжига, полученного на режиме 1, и результаты микрорентгеноспектрального анализа металла исследуемых участков (мас. %)

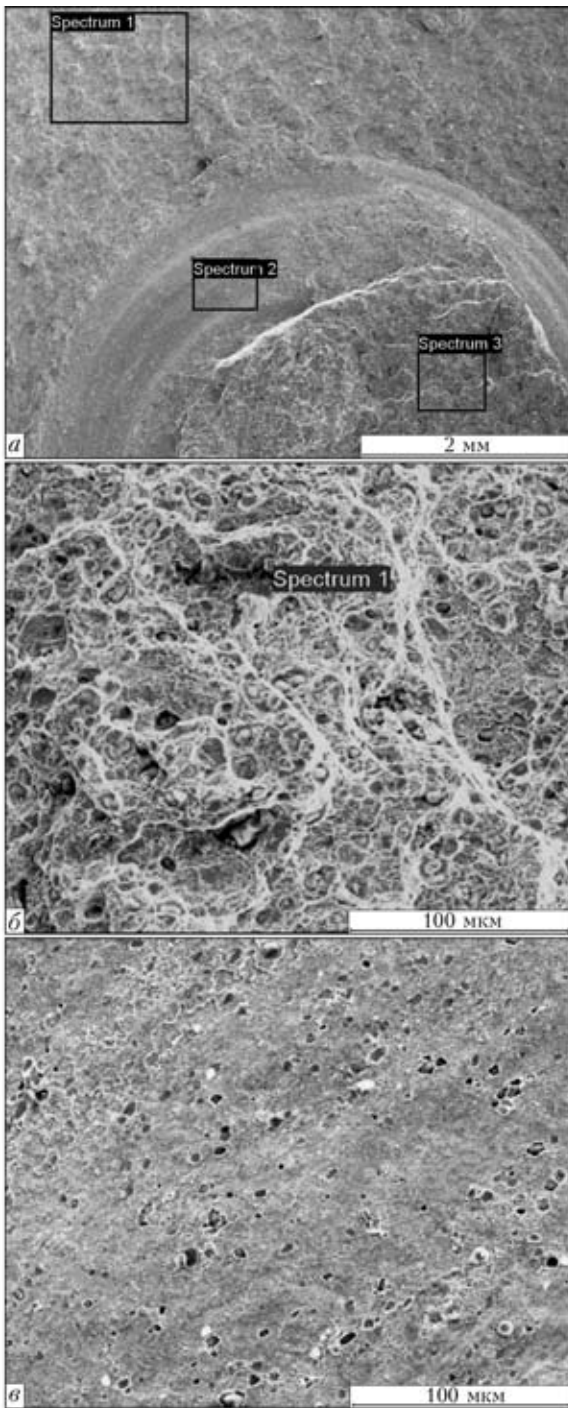


Рис. 9. Поверхность излома соединения (режим 1) сталей AISI310 и 40X со стороны стали 40X (а), участок вязкого (б) и квазихрупкого изломов (в) и результаты микрорентгеноспектрального анализа металла исследуемых участков (мас. %)

локализуется по сегрегационным скоплениям избыточных фаз с повышенным содержанием ниобия.

Таким образом, наличие в основном металле стали AISI310, полученной по PIM-технологии, незначительной пористости и дисперсных включений SiO₂, имеющего высокую температуру

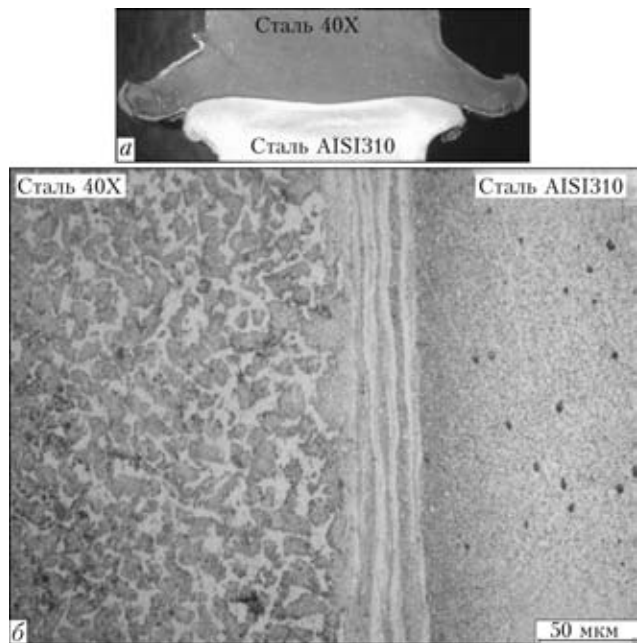
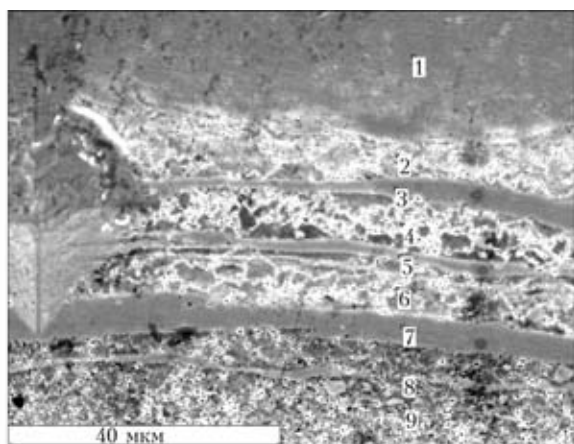


Рис. 10. Макрошлиф (а) и микроструктура (б) соединения сталей AISI310 и 40X (режим 2)

плавления ($T_{пл} = 1713 \text{ }^\circ\text{C}$), не оказывает существенного влияния на формирование сварных соединений. В то же время наличие в основном металле сегрегаций ниобия, образующего с железом эвтектику ($T_{пл} = 1355 \text{ }^\circ\text{C}$) и способствующего возникновению явления «контактного плавления» [15], оказывает отрицательное влияние на состав и механические свойства соединений при КСТ на «мягком» режиме.

Структура соединения, полученного на «жестком» режиме КСТ (режим 2, после отжига), представлена на рис. 10. В зоне соединения наблюдается практически равномерная по сечению заготовок переходная зона шириной 40...60 мкм, состоящая из чередующихся слоев с различной травимостью. Характер изменения концентрации хрома и никеля (рис. 11) при переходе от стали 40X к стали AISI310 не может быть обусловлен диффузионным перемещением этих элементов, а является следствием перемешивания свариваемых сталей.

Анализ микроструктуры сварных стыков, полученных при $t_n = 0,5...1,5 \text{ с}$ (начальная стадия процесса СТ), позволил установить, что слоистая структура зоны соединения образуется на ранних этапах процесса СТ и обусловлена характером контактного взаимодействия свариваемых поверхностей при заданном уровне технологических параметров. При низкой окружной скорости и высоком давлении нагрева преобладающим механизмом контактного взаимодействия на начальных стадиях СТ является процесс глубинного вырывания и перемешивания приконтактных объемов свариваемых материалов в пластифицированном или твердожидком состоянии на глубину до нескольких сотен микрометров [16, 17].



Спектр	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb
1	0,47	0,62	0,00	98,60	0,00	0,31
2	0,83	5,49	1,35	73,78	18,54	0,00
3	0,84	4,28	1,01	90,03	3,84	0,00
4	1,78	5,01	0,39	63,81	27,04	1,97
5	0,23	8,10	1,86	71,49	18,32	0,00
6	0,59	8,45	1,03	67,30	22,14	1,49
7	0,61	6,40	0,00	87,76	5,23	0,00
8	1,56	13,55	1,46	63,58	19,53	0,32
9	1,33	11,46	0,00	54,60	25,37	7,24

Рис. 11. Микроструктура соединения сталей AISI310 и 40X (режим 2), РЭМ и результаты микрорентгеноспектрального анализа металла исследуемых участков (мас. %)

Таким образом, основной особенностью соединений, полученных на «жестком» режиме КСТ, является наличие в переходной зоне чередующихся прослоек постоянного состава (рис. 11), в том числе соответствующих стали мартенситного (рис. 11, спектры 3, 7) и аустенитного классов (рис. 11, спектры 2, 4–6, 8). Принято считать [7, 8], что СТ является твердофазным процессом соединения материалов. Однако наличие слоистой структуры, состоящей из чередующихся «сплавов» различного состава, позволяет сделать вывод о существенной роли процессов локального плавления в зоне контактного взаимодействия, по крайней мере, на начальных стадиях процесса СТ при получении разнородных соединений.

В соединении, полученном на режиме 2, отсутствуют прослойки с повышенным содержанием ниобия, несмотря на присутствие локальных скоплений этого элемента в непосредственной близости от зоны соединения (рис. 11, спектр 9). Основное отличие «жесткого» и «мягкого» режимов КСТ состоит в скорости осадки в процессе нагрева трением ($v_{ос.н} = 0,9$ мм/с для режима 2, $v_{ос.н} = 0,15$ мм/с для режима 1). Очевидно, благодаря высокой скорости осадки и малой длительности стадии нагрева ($t_n = 6$ с) на «жестком» режиме КСТ предотвращается формирование прослоек с повышенным содержанием ниобия.

В соединении, выполненном на режиме 3 (комбинированная СТ с управляемой деформацией), не выявлено прослоек с повышенной твердостью;

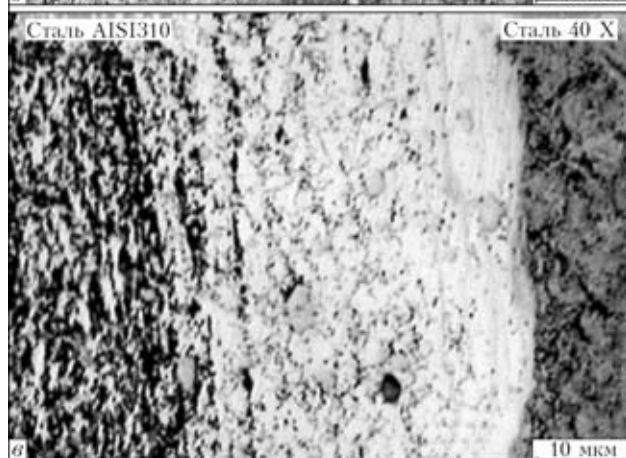
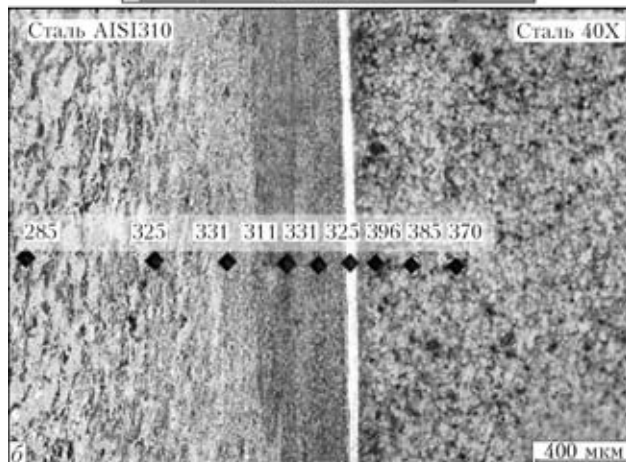
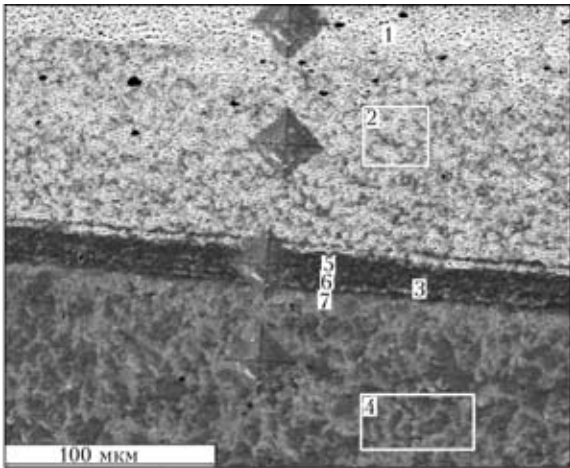


Рис. 12. Макрошлиф (а) и микроструктуры (б, в) соединения сталей AISI310 и 40X, режим 3 (отпечатки уколов HV_3 , МПа·10⁻¹)

наблюдается практически равномерная по сечению переходная зона шириной до 40 мкм (рис. 12) с размером зерна 5...6 мкм. Состав металла переходной зоны по всей ее ширине соответствует стали аустенитного класса (рис. 13, спектры 2, 3, 5–7), благодаря чему не снижается коррозионная стойкость соединений и исключается опасность возникновения трещин.

Обращает на себя внимание отсутствие локальных сегрегаций фаз с повышенным содержанием ниобия и резкое изменение концентрации хрома и никеля при переходе от стали 40X к AISI310, что свидетельствует о минимизации перемешивания свариваемых сталей в твердожидком состоянии и незначительном развитии диффузионных процессов в зоне соединения. Непосредственно к переходной зоне примыкает зона термомеханического влияния, имеющая мелкозернистую



Спектр	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb
1	1,71	26,15	1,25	47,44	21,09	2,37
2	0,56	23,31	1,47	53,88	20,39	0,40
3	1,22	22,67	0,00	54,03	20,62	1,46
4	0,55	1,26	1,61	96,58	0,00	0,00
5	0,67	23,40	0,47	56,23	18,88	0,36
6	0,22	19,37	2,45	60,92	17,04	0,00
7	0,53	18,20	0,00	58,59	22,68	0,00

Рис. 13. Микроструктура соединения сталей AISI310 и 40X (режим 3), РЭМ и результаты микроанализа металлов исследуемых участков (мас. %)

динамически рекристаллизованную структуру. В этой зоне не обнаруживаются поры и неметаллические включения SiO_2 , что отчетливо видно при анализе микроструктуры соединения как после сварки (рис. 13), так и после отжига (рис. 14). Исчезновение в зоне соединения частиц SiO_2 может быть связано с частичным их растворением и установленным ранее явлением разрушения оксидов потоком движущихся дислокаций [18–21], в том числе, при термомеханических условиях инерционной и комбинированной СТ.

При механических испытаниях соединений разрушение происходит по основному металлу стали AISI310 (рис. 15). Зафиксированы показатели предела прочности $\sigma_B = 580...630$ МПа. Измерения микротвердости показали, что металл зо-

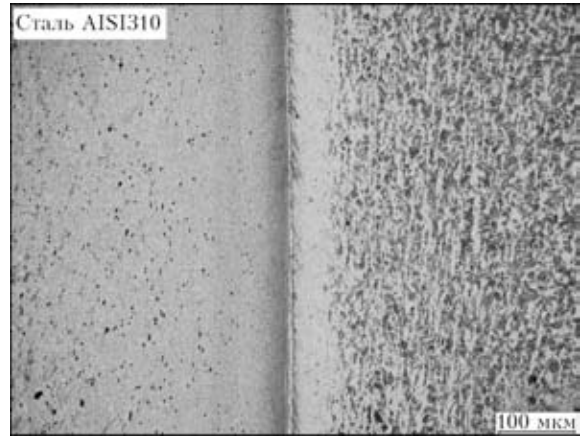


Рис. 14. Микроструктура соединения сталей AISI310 и 40X после отжига (режим 3)

ны соединения с мелкозернистой динамически рекристаллизованной структурой отличается повышенными показателями прочности (см. рис. 12), очевидно, благодаря значительному (с 60 до 5...6 мкм) уменьшению размеров структурных составляющих.

Сравнительный анализ структуры и химического состава зоны соединений стали AISI310, полученных по PIM-технологии, со сталью 40X при различных термомеханических циклах СТ позволяет предположить следующий механизм формирования переходной зоны при СТ исследуемого сочетания материалов.

На начальной стадии процесса СТ вследствие более низкого значения теплопроводности аустенитной стали поверхность максимальных сдвиговых деформаций («плоскость трения») смещается в сторону аустенитной стали AISI310. Явление «смещения поверхности трения» известно для различных сочетаний разнородных материалов [22–24]. В плоскости трения достигаются максимальные значения температуры нагрева. Между плоскостью трения и сталью 40X образуется переходная зона, являющаяся по сути сплавом на основе стали AISI310, «наплавленным» на сталь 40X. На начальной стадии процесса нагрева не

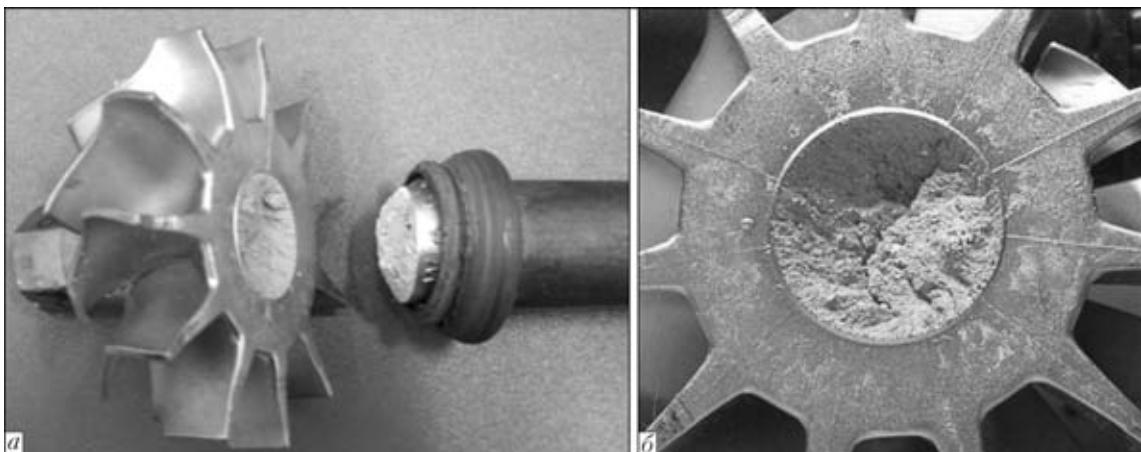


Рис. 15. Сварной вал ТКР после испытаний на разрыв (а), поверхность излома в основном металле стали AISI310 (б), полученная по PIM-технологии



наблюдается осадки заготовок, следовательно, не происходит вытеснение переходного слоя за пределы сечения.

При увеличении продолжительности стадии нагрева ширина переходной зоны в периферийных частях сечения остается практически неизменной, а в центральной части сечения увеличивается за счет дальнейшего перемещения плоскости трения в сторону стали AISI310. Об этом свидетельствуют металлографические исследования соединений, полученных при различной продолжительности стадии нагрева. В результате форма переходной зоны в центральной части сечения становится выпуклой в сторону стали AISI310.

При сварке на «мягком» режиме КСТ в плоскости трения, где температура нагрева и тангенциальные деформации максимальны, скорость диффузии легирующих и примесных элементов может быть соизмерима с таковой для расплавов. В результате в этой зоне образуются скопления легкоплавких фаз, в частности, эвтектических фаз железа с ниобием, избыточное содержание которого зафиксировано в основном металле стали AISI310.

При переходе к квазистационарной стадии нагрева, сопровождающейся осадкой заготовок, образовавшаяся слоистая структура переходной зоны сохраняется. Процесс осадки заготовок преимущественно происходит за счет стали 40X, при этом металл переходной зоны частично вытесняется за пределы сечения в виде тонкого слоя, нанесенного на поверхность усиления стали 40X. Поскольку плоскость максимальных сдвиговых деформаций располагается в аустенитной стали, то одновременно происходит восстановление «наплавленного» слоя — наступает состояние равновесия между процессами формирования и вытеснения металла переходной зоны.

Ширина и форма переходной зоны определяется различием теплофизических характеристик свариваемых сталей и параметрами режима СТ. «Мягкий» режим 1 отличается низкой скоростью осадки при нагреве $v_{ос.н}$ (около 0,15 мм/с), при этом ширина переходной зоны наибольшая, а условия для ликвации примесных элементов и образования в плоскости трения легкоплавких фаз — наиболее благоприятные. В результате приложения повышенного усилия проковки, которую выполняют на невращающиеся заготовки, наблюдается уменьшение толщины переходной зоны, частичное вытеснение из стыка прослоек переменного химического состава и скоплений легкоплавких фаз. Оставшаяся их часть определяет механические и эксплуатационные (коррозионные, усталостные) свойства сварного соединения.

При уменьшении окружной скорости вращения и увеличении давления при нагреве («жест-

кий» режим 2 КСТ) в процесс сдвиговой (тангенциальной и радиальной) деформации вовлекаются более глубокие слои металла свариваемых заготовок, значительно увеличивается скорость осадки при нагреве $v_{ос.н}$ (до 0,9 мм/с) и уменьшается время сварки. В результате такого «жесткого» термомодеформационного цикла СТ в соединении формируется узкая (до 60 мкм) переходная зона в виде чередующихся прослоек переменного химического состава, в том числе, соответствующих стали мартенситного класса. Эти прослойки, образующиеся на начальных стадиях процесса СТ, полностью не вытесняются из зоны контакта на последующих этапах нагрева и сохраняются в сварном соединении после выполнения проковки.

Поскольку проковка при КСТ осуществляется после прекращения вращения заготовок, воздействие на металл переходной зоны характеризуется наличием радиальной составляющей деформации. Осадка преимущественно происходит за счет деформации металла в зоне термического влияния стали 40X, при этом наблюдается лишь уменьшение толщины прослоек с переменным и постоянным химическим составом.

Соединения, полученные при комбинированной СТ с управляемой деформацией (режим 3), свободны от указанных несовершенств структуры. Отсутствие в переходной зоне чередующихся прослоек, соответствующих стали мартенситного и аустенитного классов, обусловлено особенностью начальной стадии процесса СТ с управляемой деформацией. Технологические параметры (давление, окружная скорость) на этой стадии задавали исходя из условия минимизации процессом глубинного вырывания и перемешивания приконтактных объемов свариваемых материалов.

Отсутствие в соединении локальных сегрегаций легкоплавких фаз обусловлено минимизацией длительности квазистационарной стадии нагрева, что достигается за счет обеспечения заданной скорости деформации (осадки) заготовок $v_{ос.н}$ при определенном сочетании значений давления и окружной скорости.

Ключевую роль в формировании соединения играет стадия проковки. Программирование длительности стадии торможения вращения и приложении повышенного давления проковки $P_{пр}$ на этой стадии позволяют значительно увеличить скорость осадки заготовок и интенсивность деформации приконтактных объемов свариваемых сталей. Зафиксированное резкое изменение концентрации хрома и никеля в зоне соединения при режиме 3 свидетельствует о минимизации процессов перемешивания свариваемых сталей и локального плавления в зоне контакта. О существенном увеличении интенсивности термомодеформационного воздействия на металл зоны соединения при комбинированной СТ свидетельствует



также отсутствие в этой зоне частиц SiO_2 , присутствующих в основном металле стали AISI310 и переходной зоне стыков, полученных на «мягком» режиме КСТ.

Таким образом, особенности структуры и состава металла соединений сталей AISI310 и 40X, выполненных КСТ и комбинированной СТ, обусловлены характером и интенсивностью деформации в зоне контакта на начальной, квазистационарной и заключительной стадиях процесса при этих разновидностях СТ. Особенностью деформационного воздействия в зоне контакта на заключительной стадии формирования соединений при КСТ является наличие радиальной составляющей, обусловленной приложением повышенного давления проковки к невращающимся заготовкам. Проковка в этом случае обеспечивает незначительное уменьшение ширины переходной зоны и толщины хрупких прослоек, образовавшихся на начальных стадиях процесса СТ.

При комбинированной СТ с управляемой деформацией обеспечиваются условия для минимизации процессов локального плавления и перемешивания объемов металла в твердожидком состоянии. Воздействие на металл в зоне соединения на заключительной стадии процесса СТ характеризуется наличием радиальной и тангенциальной составляющих в условиях увеличивающегося в процессе торможения вращения градиента температур. Благодаря локализации деформации и значительному увеличению ее интенсивности на заключительной стадии сварки обеспечивается диспергирование и разрушение оксидных фаз, вытеснение за пределы свариваемого сечения промежуточных прослоек. В соединении формируется переходная зона с мелкозернистой динамически рекристаллизованной структурой и резким перепадом концентрации легирующих элементов.

На основе полученных данных разработана технология СТ колес из жаропрочного никелевого сплава Inconel 713C, изготовленных по PIM-технологии, с хвостовиками из стали 40X. В настоящее время проводятся стендовые испытания опытной партии сварных валов роторов ТКР.

Выводы

1. Характерными особенностями жаропрочной стали AISI310, полученной технологией литья порошков под давлением (исходное сырье «Catamold»), являются равноосная кристаллическая структура с размером зерна около 60 мкм, наличие аустенитных зерен с однородной и ламельной структурой, незначительная остаточная пористость, наличие равномерно распределенных неметаллических включений диоксида кремния размером 2...10 мкм и сегрегаций фаз с повышенным содержанием ниобия.

2. На «мягком» режиме КСТ сталей AISI310 и 40X в зоне соединения образуется неравномерная по сечению переходная зона шириной от 25 до 500 мкм, имеющая слоистую структуру и представляющая собой «сплав» на основе стали AISI310, наплавленный на сталь 40X. В переходной зоне со стороны стали 40X обнаруживаются прослойки постоянного состава, в том числе, соответствующие стали мартенситного класса. Разрушение соединений при испытаниях на разрыв происходит между переходной зоной и сталью AISI310 и локализуется по сегрегационным скоплениям избыточных фаз с повышенным содержанием ниобия.

3. В соединениях, полученных на «жестком» режиме КСТ, не выявлено сегрегаций легкоплавких фаз, однако наблюдаются чередующиеся прослойки постоянного состава, соответствующие сталям мартенситного и аустенитного классов. Эти прослойки образуются на начальных стадиях процесса СТ, полностью не вытесняются из зоны контакта на последующих этапах нагрева и при проковке, осуществляемой после прекращения вращения заготовок.

4. Наличие в соединениях, полученных КСТ, слоистой структуры, состоящей из чередующихся «сплавов» различного состава, свидетельствует о том, что в зоне контактного взаимодействия на начальных стадиях процесса СТ происходит перемешивание свариваемых сталей как в пластифицированном, так и в твердожидком состоянии.

5. Разработана технология комбинированной СТ с управляемой деформацией, при которой значения технологических параметров задаются исходя из обеспечения определенной скорости деформации (осадки) на стадии нагрева, а приложение давления проковки выполняется на стадии регулируемого по установленной программе торможения вращения.

6. Соединения, полученные комбинированной СТ с управляемой деформацией, имеют мелкозернистую динамически рекристаллизованную структуру с практически равномерной по сечению переходной зоной шириной до 40 мкм. Состав металла переходной зоны по всей ее ширине соответствует стали аустенитного класса, не содержит пор, сегрегаций легирующих элементов, неметаллических включений. На границе переходной зоны со сталью 40X наблюдается резкий перепад концентрации легирующих элементов, и отсутствуют прослойки с повышенной твердостью.

7. Изделия из материалов, полученных технологией литья порошков под давлением, пригодны для изготовления качественных биметаллических соединений с использованием СТ при условии соответствующего задания значений технологических параметров.



1. Довыденков В. А., Крысь М. А., Фетисов Г. П. Получение металлических деталей путем формования и спекания металлополимерных композиций // Технология металлов. — 2008. — № 6. — С. 28–31.
2. Heaney D. Qualification method for powder injection molded components // P/M Science & Technology Briefs. — 2004. — 6, № 3. — P. 21–27.
3. Грабой И. Э., Том А. Материалы Catamold компании BASF для литья порошков под давлением. Технология. Производство. Применение. (ТПП — ПМ 2005) // Материалы докл. науч.-практ. семин. — Йошкар-Ола, 20–21 июня 2005 г. — Йошкар-Ола, 2005. — С. 71–74.
4. Salk N. Metal injection moulding of Inconel 713C for turbocharger applications // PIM International. — 2011. — 5, № 3. — P. 61–64.
5. Froes F. H. (Sam). Advances in titanium metal injection molding // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. — 2007. — 46, № 56. — P. 303–310.
6. Hamill J. A. What are the joining processes, materials and techniques for powder metal parts? // Welding J. — 1993. — Febr. — P. 37–44.
7. Лебедев В. К., Черненко И. А., Вилль В. И. Сварка трением: Справочник. — Л.: Машиностроение, 1987. — 236 с.
8. Сварка трением. Машиностроение: Энциклопедия. — Т. 1–4. — М.: Машиностроение, 2006. — С. 153–157.
9. Пат. 46460, Україна. Спосіб зварювання тертям і машина для його реалізації. / С. І. Кучук-Яценко, І. В. Зяхор. — 15.11.2004; Бюл. № 11.
10. Son C.-Y., Yoon T. S., Lee S. Correlation of microstructure with hardness, wear resistance, and corrosion resistance of powder-injection-molded specimens of Fe-alloy powders // Metallurgical and Materials Transactions A. — 2009. — 40, № 5. — P. 1110–1117.
11. Heany D. F., Mueller T. J., Davies P. A. Mechanical properties of metal injection moulded 316L stainless steel using both prealloy and master alloy techniques // Powder Metallurgy. — 2003. — № 1. — P. 1–7.
12. Krug S., Zachmann S. Influence of sintering conditions and furnace technology on chemical and mechanical properties of injection moulded 316L // Technical Paper: PIM International. — 2009. — 3, № 4. — P. 66–70.
13. Transition joints for high temperature service. Discussion session 3 // Metal Construction and British Welding J. — 1969. — № 12. — P. 134–142.
14. Готальский Ю. Н. Сварка разнородных сталей. — Киев: Техніка, 1981. — 184 с.
15. Залкин В. М. Природа эвтектических сплавов и эффект контактного плавления. — М.: Металлургия, 1987. — 152 с.
16. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
17. Зяхор І. В. Формування з'єднань при зварюванні тертям жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗ-ДК із конструкційною сталлю 40X // Вісн. Черніг. держ. техн. ун-ту. — 2010. — № 42. — С. 148–155.
18. Сміян О. Д. Атомний механізм взаємодії речовини середовища з металом, що деформується // Фіз. та хімія твердого тіла. — 2002. — № 4. — С. 662–674.
19. Сміян О. Д., Кружков А. Г. О некоторых особенностях движения диффузионного потока газов в металлах // Докл. АН СССР. — 1972. — 202, № 6. — С. 1311–1313.
20. Распределение примесей внедрения в зоне соединения при сварке трением / О. Д. Сміян, С. И. Кучук-Яценко, И. В. Зяхор и др. // Автомат. сварка. — 2007. — № 9. — С. 5–9.
21. Розподіл і дія водню, кисню й вуглецю в зоні з'єднання жароміцного нікелевого сплаву при зварюванні тертям / О. Д. Сміян, І. В. Зяхор, О. В. Нікольников та ін. // Вісн. Черніг. держ. техн. ун-ту. — 2008. — № 34. — С. 138–143.
22. Импульсная сварка трением сплава ЖС6-К и стали 40Г / В. П. Воинов, Р. Н. Болдырев, К. И. Мулюков и др. // Свароч. пр-во. — 1976. — № 3. — С. 28–30.
23. Зяхор І. В. Особенности сварки трением разнородных металлов и сплавов // Автомат. сварка. — 2000. — № 5. — С. 37–46.
24. Кучук-Яценко С. И., Зяхор І. В. Механизм формирования биметаллических соединений при сварке трением // Там же. — 2002. — № 7. — С. 3–11.

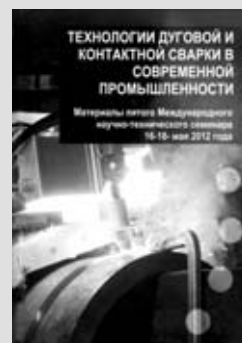
Experimental data are given on evaluation of structure of heat-resistant steel AISI310 produced by the powder injection moulding technology. The investigation results are presented on peculiarities of formation of dissimilar joints between steel AISI310 and structural steel 40X under different thermal-deformation cycles of friction welding in manufacture of bimetal shafts for automotive engine turbocharger rotors.

Поступила в редакцию 25.06.2012

НОВАЯ КНИГА

Материалы пятого Международного научно-технического семинара.
СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — 208 с.

В сборнике представлены материалы научно-технического семинара, проведенного в рамках Международной специализированной выставки «Сварка 2012» (г. Санкт-Петербург, 15-18 мая). Они включают 32 доклада специалистов и ученых в области дуговой сварки и наплавки, а также сварки давлением, в том числе в них освещаются сведения о новых разработках оборудования, технологий и материалов.





ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И РАСПЛАВЛЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ (АЛЮМИНИЙ–ТАНТАЛ)

Б. А. ГРИНБЕРГ, д-р физ.-мат. наук, **О. А. ЕЛКИНА**, науч. сотру-д., **А. М. ПАЦЕЛОВ**, канд. физ.-мат. наук, **А. В. ИНОЗЕМЦЕВ**, **А. В. ПЛОТНИКОВ**, науч. сотру-дники, **А. Ю. ВОЛКОВА**, инж. (Ин-т физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург, РФ), **М. А. ИВАНОВ**, д-р физ.-мат. наук (Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Укра-ины, г. Киев), чл.-кор. РАН **В. В. РЫБИН** (С.-Петербургский гос. политехн. ун-т, г. Санкт-Петербург, РФ), **Ю. П. БЕСШАПОШНИКОВ**, канд. техн. наук (ОАО «Уралхиммаш», г. Екатеринбург, РФ)

Представлены результаты исследования структуры переходной зоны соединений алюминий–тантал, имеющих разную плоскую и волнообразную форму границ раздела. Независимо от формы границ обнаружены два типа фрагментации: одна подобна фрагментации при взрыве, а другая — при интенсивной пластической деформации. Эти же типы фрагментации ранее наблюдались и в соединениях металлов медь–тантал, не имеющих в отличие от алюминий–тантал взаимной растворимости. Обнаружено расплавление в переходной зоне исследуемых соединений. Структура расплавленных областей существенно зависит от того, имеют ли свариваемые металлы взаимную растворимость или не имеют.

Ключевые слова: сварка взрывом, фрагментация, переходная зона, локальное расплавление, взаимная растворимость, интерметаллид

При всем многообразии материалов и режимов сварки основной является проблема перемешивания в переходной зоне вблизи границы раздела [1, 2]. Именно структура переходной зоны определяет возможность сцепления обоих материалов. Перемешивание происходит в результате сильного внешнего воздействия, которое предполагает большую пластическую деформацию (включая давление, сдвиговые компоненты, поворотные моменты напряжений, неоднородность деформации и т. д.), трение поверхностей, влияние кумулятивной струи и другие факторы. Однако до сих пор остается неясным, как при таком сильном внешнем воздействии успевает произойти перемешивание за столь короткое время, пока длится сварка.

Сварку взрывом проводили ФГУП ЦНИИКМ «Прометей» (С.-Петербург), Волгоградский государственный технический университет, Уральский завод химического машиностроения (Екатеринбург). В зависимости от режима сварки были получены различные соединения, у которых была волнообразная или плоская форма границ раздела.

Первоначально были исследованы сварные соединения металл–интерметаллид с нормальной взаимной растворимостью [3–7]. В качестве металла был выбран технически чистый титан, а в качестве интерметаллида — орторомбический алюминид титана (далее для краткости — алюминид). В зависимости от режима сварки получены различные соединения, которые для удобства были названы следующим образом: A_w , A_p , B_w , B_p , где нижний индекс указывает форму гра-

ницы (плоская, волнообразная). Для соединений А использовали орторомбический сплав, содержащий 16 ат. % Nb, для соединений В — 23,5 ат. % Nb. У любого из указанных соединений расплавленные области представляют собой истинные растворы, в которых перемешивание происходит на атомном уровне.

Для того чтобы выяснить, насколько важным фактором является наличие взаимной растворимости исходных материалов, для сварки взрывом были выбраны металлы (медь–тантал, железо–серебро), которые как в твердом, так и в жидком состояниях практически не имеют взаимной растворимости, причем в жидком состоянии образуют несмешивающиеся взвеси. Обнаружено, что у соединений C_p , C_w медь–тантал [8, 9] и D_p железо–серебро [10] зоны локального расплавления заполнены именно такими коллоидными растворами.

Используя полученные результаты, были выяснены возможные причины хорошего качества соединения медь–тантал, благодаря которым удалось провести сварку взрывом на больших площадях пластин [11], из которых сконструирован химический реактор. Корпус реактора сделан из композита: углеродистая сталь–медь–тантал. Внутренней оболочкой служит тантал и именно его коррозионная стойкость положена в основу всей конструкции. Для коллоидных растворов существует опасность расслоения эмульсии [12]. Однако у зон локального расплавления соединения C_w расслоение не наблюдалось [9]. Суспензия же, состоящая из частиц тантала в медной матрице, напротив, содействует дисперсионному упрочнению соединения.



В настоящей работе, являющейся продолжением работ [8, 9], исследуются сварные соединения E_p и E_w металлов алюминий–тантал с нормальной взаимной растворимостью. Параметры сварки (γ — угол соударения; v_k — скорость точки контакта) для этих соединений приведены на рис. 1. При уменьшении параметров сварки алюминий–тантал ($\gamma = 7,5^\circ$, $v_k = 1900$ м/с) сварка вообще не происходила. На рисунке приведены также параметры сварки для соединений C_p , C_w медь–тантал. Как видно из рис. 1 параметры для соединений E_p и C_p , имеющих плоские поверхности раздела, находятся вблизи нижней границы свариваемости. Если сравнивать соединения E_w и C_w , то параметры сварки для соединения E_w существенно выше. На основе сопоставления результатов, полученных для указанных соединений, авторы попытались выявить процессы, являющиеся общими как для металлов, имеющих взаимную растворимость, так и не имеющих ее. При этом удачным оказалось одновременное использование для одной и той же пары металлов двух соединений с разной формой границы (плоская, волнообразная).

Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе «Eriquant», снабженном вы-

числительным комплексом SIAMS. Микроструктуру исследовали с помощью просвечивающих электронных микроскопов JEM 200CX и CM-30 Super Twin, сканирующего электронного микроскопа Quanta 200 3D. Рентгеновскую съемку выполняли на дифрактометре «ДРОН-3М» в монохроматизированном $Co-K_\alpha$ -излучении.

Изображения поверхности раздела, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), плоские для соединения E_p (рис. 2, а) и волнообразные для соединения E_w , приведены на рис. 2. Для волнообразной поверхности раздела период составляет примерно 300 мкм, амплитуда — 30 мкм.

Фрагментация при взрыве. Явление фрагментации как процесса разделения твердого тела на части (осколки), происходящего под сильным внешним воздействием, известно давно. Оно вошло даже в название оружия: fragmentation warhead, fragmentation shell, fragmentation bomb. Описание разлета осколков связано с именем Н. Мотта [13]. Им, совместно с другими авторами (см., например, работу [14]), было показано, что с помощью методов простой геометрической фрагментации можно описать динамическую фрагментацию цилиндрической оболочки.

Полагаем, что фрагментация при взрыве, исследованная Моттом, происходит и при сварке взрывом. В соединениях A_w титан–алюминид разлет микронных частиц алюминида удивительно похож на происходящий при взрыве разлет осколков, только других размеров [15]. При этом следует отметить, что при взрыве разлет осколков происходит в открытом пространстве, тогда как при сварке взрывом частицы разлетаются в замкнутом пространстве, ограниченном материалом пластин.

Для фрагментации, наблюдаемой при сварке взрывом, ранее нами использовался термин «фрагментация типа дробления» (ФТД). Хотя в обоих случаях наблюдается образование и разлет частиц,

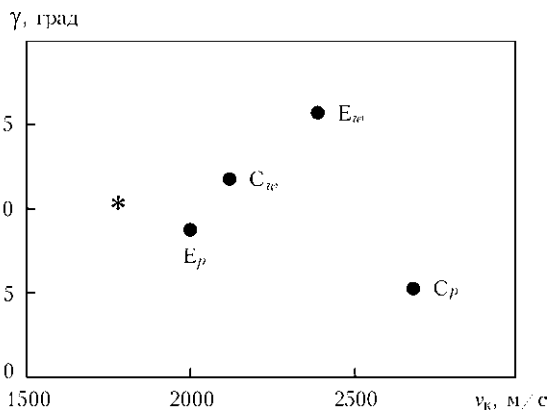


Рис. 1. Параметры сварки для исследуемых соединений (звездочка — режим, принятый в работе [11])

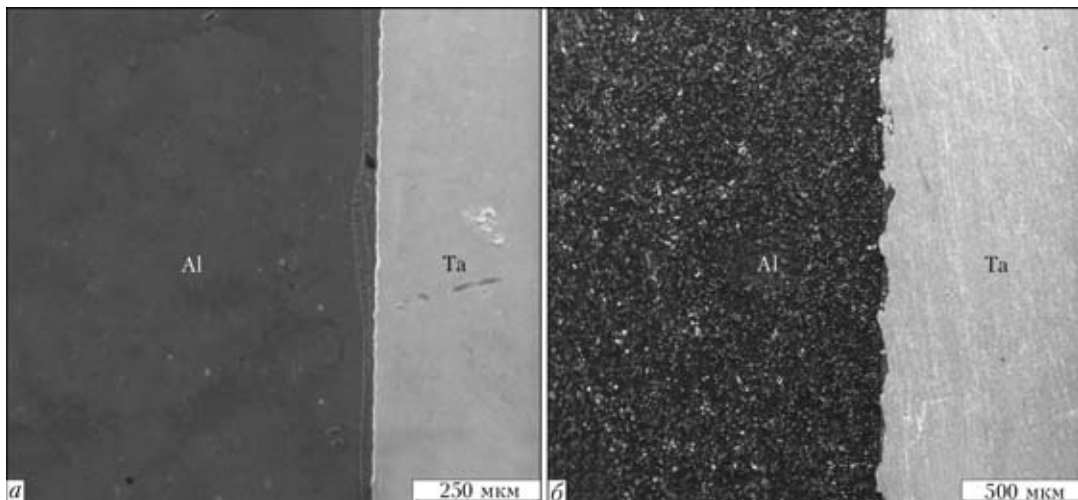


Рис. 2. Поверхность раздела (поперечное сечение) для соединений алюминий–тантал: а — соединение E_p ; б — соединение E_w



эти виды фрагментации не являются тождественными. ФТД представляет собой процесс разделения на частицы, которые либо разлетаются либо стыкуются друг с другом. Как и фрагментация при взрыве, ФТД представляет собой быстротечный процесс, который успевает произойти за время взрыва.

На рис. 3, *а* видно множество частиц тантала произвольной формы на фоне алюминия. Полагаем, что наблюдаемый при сварке взрывом разлет частиц тантала, как и упоминаемый выше разлет частиц алюминидов, подобен разлету осколков при взрыве. На рис. 3, *б* после того, как алюминий был полностью вытравлен, на поверхности тантала видны частицы тантала, которые высыпаются при вытравливании алюминия. На рис. 3, *в* видны крупные частицы тантала, достигающие размеров 20...40 мкм, которые гораздо больше наблюдаемых у соединения E_p . Возможная причина такого различия состоит в том, что соединение E_w получено при более сильном внешнем воздействии, чем соединение E_p (см. рис. 1).

Наблюдение при сварке взрывом разлета частиц подтверждает концепцию о фрагментации, подобной фрагментации при взрыве. ФТД наблюдается как у соединений металл–металл, так и металл–интерметаллид и при нормальной растворимости, и в отсутствии взаимной растворимости свариваемых металлов, независимо от формы границы раздела. Это является доказательством доминирующей роли взрыва при исследуемом способе сварки.

ФТД обеспечивает мощный канал для диссипации подводимой энергии, поскольку поверхность разлетающихся частиц имеет большую суммарную площадь. ФТД возникает в результате микроразрушений и является процессом, альтернативным разрушению. Вместо свободных поверхностей, возникновение которых привело бы к разрушению, происходит связанное с микроразрушением образование поверхностей, которые либо принадлежат разлетающимся частицам либо «залечиваются» при их консолидации. В результате ФТД повышает «живучесть» материала, препятствуя его разрушению даже при таком сильном внешнем воздействии, каким является сварка взрывом.

Фрагментация при интенсивной деформации. При сварке взрывом наблюдается фрагментация еще одного типа, когда вообще не происходит образования новых частиц. Имеется в виду фрагментация [16], существование которой подтверждено многочисленными наблюдениями структуры материалов при сильной деформации. Такая, в известной степени, традиционная фрагментация [15] включает накачку дислокаций (двойников), формирование клубковой, ячеистой и полосовой структур, рекристаллизацию.

В настоящей работе для соединения E_p алюминий–тантал приведены ТЭМ изображения сильно деформированной, но не перемешанной с танталом структуры алюминия: области с высокой дислокационной плотностью (рис. 4, *а*) и рекристаллизованные области (рис. 4, *б, в*). Так, на рис. 4, *б* видно формирование тройного стыка. Изображения сильно деформированной структуры тантала подобны наблюдаемым для соедине-

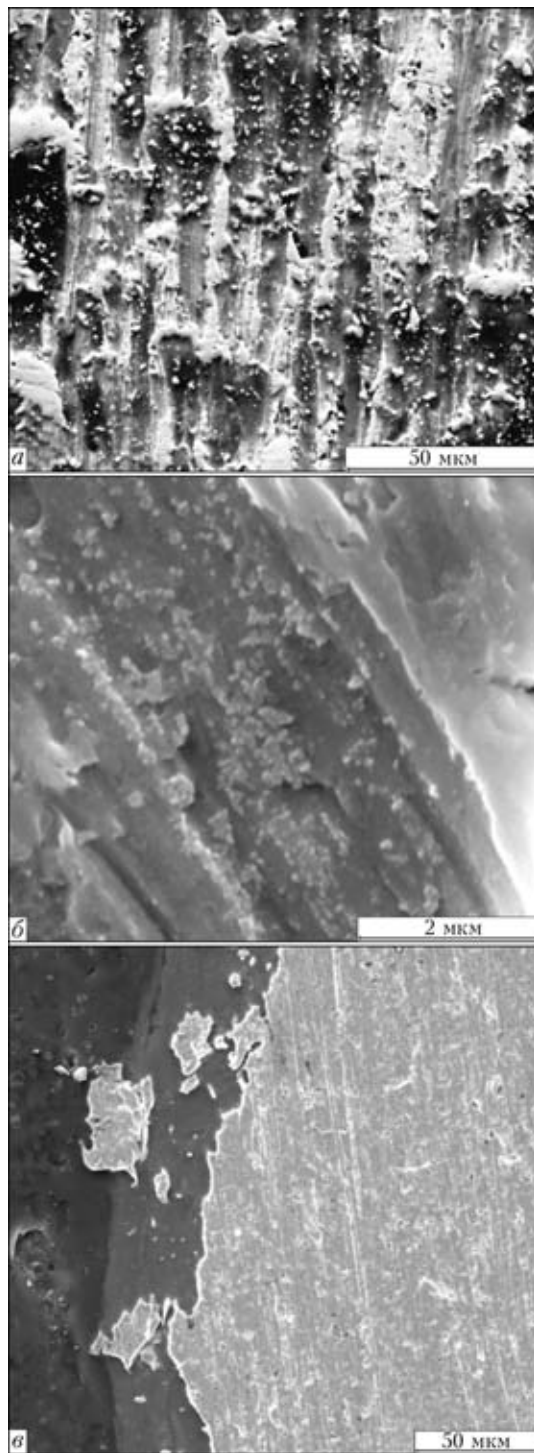


Рис. 3. Микроструктуры продольного сечения переходной зоны (*а, б*) и поперечного сечения (*в*): *а* — соединение E_p ; *б* — соединение E_p , алюминий вытравлен; *в* — соединение E_w

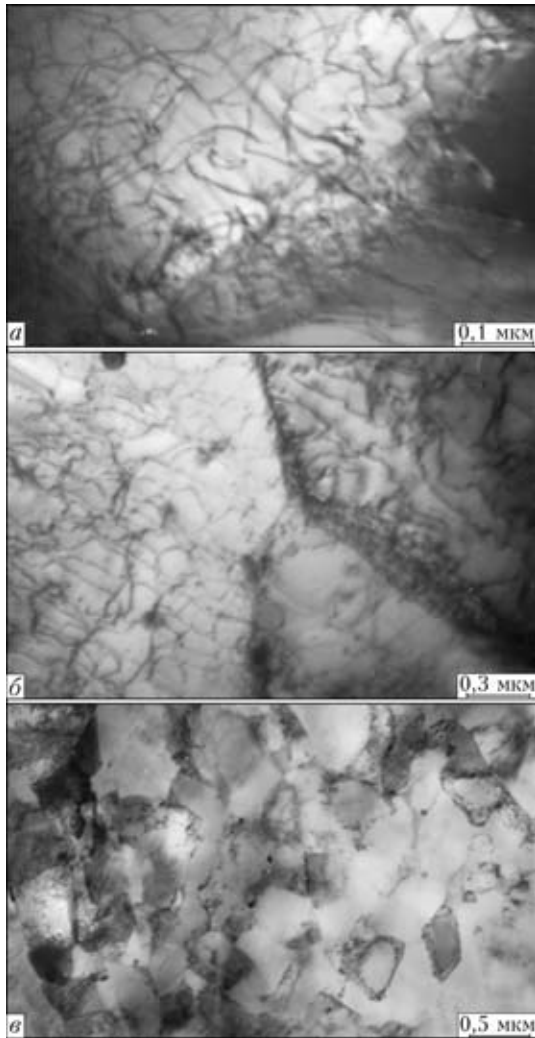


Рис. 4. ТЭМ изображение структуры сильно деформированного алюминия: *а* — наклеп; *б, в* — рекристаллизованные области

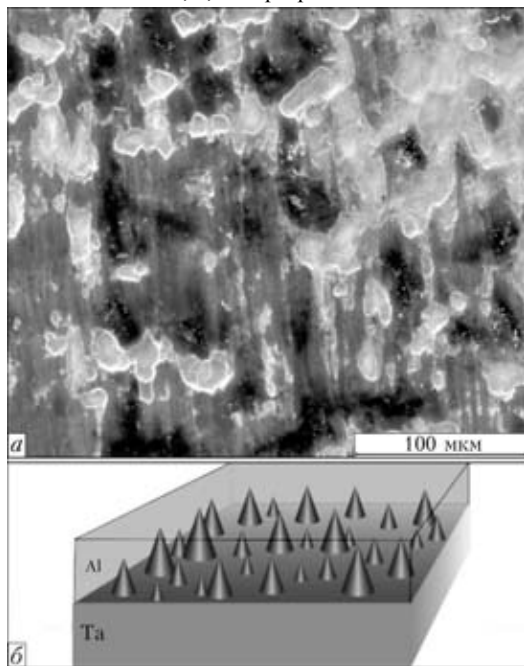


Рис. 5. Переходная зона для соединения E_p : *а* — микроструктура с области тантала, алюминия и зоны локального расплавления (продольное сечение); *б* — схематическое изображение выступов (конусы) на плоской поверхности раздела

ния C_p медь–тантал [15]. Если же сопоставить изображения деформированной структуры алюминия и меди [15], то видно, что рекристаллизация алюминия проходит более полно по сравнению с рекристаллизацией меди. Это связано с тем, что алюминий является, во-первых, легкоплавким, а во-вторых, имеет более высокую энергию дефекта упаковки.

Хотя температура в зоне контакта при сварке взрывом может быть достаточно высокой, но при быстротечном взрывном воздействии протекание термоактивированных процессов, определяющих движение и перестройку дислокаций, затруднено и едва ли возможно. Можно полагать, что эти процессы, как и диффузия, становятся возможными лишь при остаточных температурах и напряжениях. Именно эти процессы определяют традиционную фрагментацию. В отличие от традиционной фрагментации ФТД происходит только в узкой области вблизи границы раздела, где внешнее воздействие является наиболее сильным. Традиционная же фрагментация наблюдается несколько дальше от поверхности раздела. Соответственно ФТД — несравнимо более быстрый процесс, чем традиционная фрагментация. Характерные времена можно оценить примерно как микросекунду для ФТД и $10^8 \dots 10^9$ мкс (время структурной релаксации) для традиционной фрагментации.

Неоднородности поверхности раздела: выступы, зоны локального расплавления. На рис. 5, *а* изображение состоит из пятен трех цветов: белого, черного и серого. Соответственно переходная зона состоит из областей трех типов, что является результатом возникновения выступов на поверхности раздела. Впервые выступы были обнаружены у соединений титан–алюминид [5]. Данные по химическому составу указанных областей, образующих переходную зону, получены с помощью СЭМ по многочисленным замерам. Показано, что белому цвету соответствует зона тантала, черному — зона алюминия, серому — смесь исходных металлов.

Выступы скорее всего возникают в результате бездиффузионного (из-за быстротечности сварки) выброса одного металла в другой (рис. 5, *б*). На самом деле они, конечно, не имеют идеальной конической формы: вершины являются закругленными, а поверхности не такими гладкими. Только образованием выступов можно объяснить картину переходной зоны для соединения E_p на рис. 5, *а*. В результате поверхность представляет собой хаотический рельеф с большим количеством выступов одного материала в другом, аналогично наблюдаемому в работе [8].

У обоих соединений E_p и C_p отчетливо видно выстраивание выступов вдоль некоторого выделенного направления. Можно предположить, что существует связь между самоорганизацией выс-



тупов и волнообразованием, но это требует специальных исследований.

Если бы поверхность раздела была гладкой, то возникали бы проблемы со сцеплением и требовались бы либо реконструкция металлических связей, либо транспорт точечных дефектов. Однако наличие выступов решает эту проблему: выступы играют при этом роль «клиньев», связывая контактирующие материалы между собой. Трение на поверхности выступа, усиленное за счет того, что сам выступ не является гладким, содействует сцеплению поверхностей.

Существует точка зрения [17], что прочность биметалла, получаемого сваркой взрывом, может быть повышена, благодаря предварительному профилированию поверхности неподвижной пластины, которое можно осуществить, например, за счет продольных углублений и выступов, ориентированных примерно параллельно направлению распространения детонации. А. З. Богунов и др. [17] считают, что при наличии выступов можно говорить о клепке взрывом, которая в случае профилирования сопровождается сварку взрывом.

Полагаем, что аналогичная ситуация имеет место при сварке взрывом из-за выступов, возникающих естественным путем, хотя их размеры меньше, чем при предварительном профилировании. В исследуемых нами случаях размеры выступов меняются от микрометра до сотен микрометров, тогда как после профилирования размеры выступов варьировались в пределах от нескольких миллиметров до десятков миллиметров [17].

Более того, можно предположить, что существование нижней границы свариваемости как раз и связано с невозможностью образования выступов на плоской поверхности раздела. Ниже указанной границы выступы либо вообще не образуются, либо оказываются слишком маленькими. Существует, по-видимому, некоторая критическая высота выступов, когда они обеспечивают сцепление поверхностей. По мере увеличения внешнего воздействия выступы растут, выстраиваются в ряды. Далее начинается волнообразование.

Рентгеновская дифрактограмма переходной зоны (рис. 6, а) содержит линии тантала, алюминия и не содержит линий других фаз. Полученные с помощью СЭМ результаты точечных замеров химического состава серой зоны показали, что концентрация тантала здесь не превышает 5 ат. %, так что серая зона представляет собой зону локального расплавления алюминия, легированного танталом. Но для этого необходимо расплавление узкой кромки тантала.

Именно серая зона, являющаяся зоной перемешивания, оказалась чувствительной к тому, имеют ли свариваемые металлы взаимную растворимость или не имеют. При нормальной растворимости они образуют истинные растворы.

При отсутствии взаимной растворимости возникают коллоидные растворы, как в случае медь-тантал [8].

Расплавление вдоль поверхности раздела.

У волнообразной границы в отличие от плоской поверхность раздела является гофрированной, так что ее продольное сечение представляет собой набор чередующихся полос обоих материалов с почти параллельными границами. Продольное сечение переходной зоны у соединения E_w алюминий-тантал, приведенное на рис. 7, а, на самом деле представляет собой слегка наклонное сечение из-за малой амплитуды волнообразной поверхности. На продольном сечении переходной зоны у того же соединения после того, как был вытравлен алюминий (рис. 7, б), видны полосы тантала, а также частицы, которые высыпались после растворения алюминия.

Для сравнения на рис. 8, а приведено продольное сечение переходной зоны для соединения C_w медь-тантал. Система полос на рис. 7, а и 8, а не является регулярной. Если по приведенным изображениям восстановить поверхность раздела, то в обоих случаях она будет несовершенной. На рис. 8, а отчетливо видны многочисленные зоны локального расплавления, имеющие вихреобразную структуру. Как видно из рис. 8, б, для обоих соединений C_p и C_w медь-тантал независимо от формы границы зона локального расплавления заполнена коллоидным раствором.

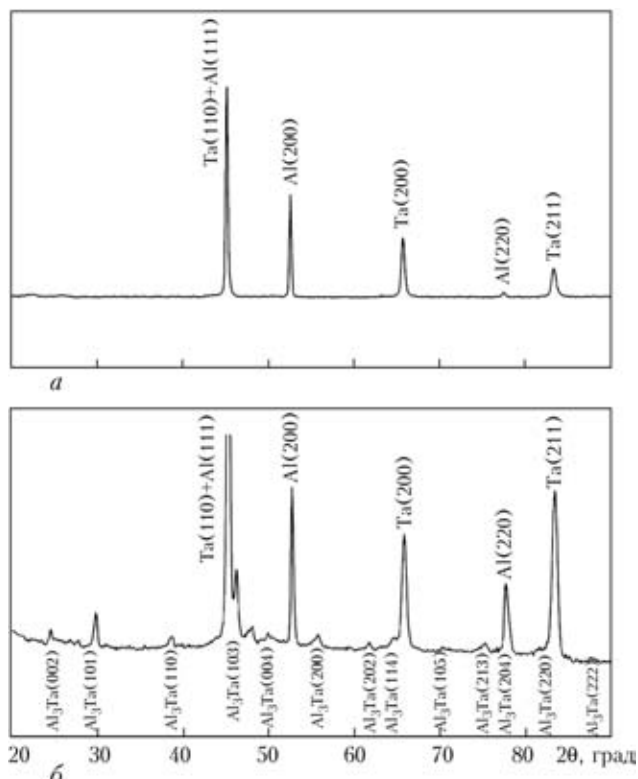


Рис. 6. Дифрактограмма переходной зоны (продольная поверхность шлифа): а — соединение E_p ; б — соединение E_w

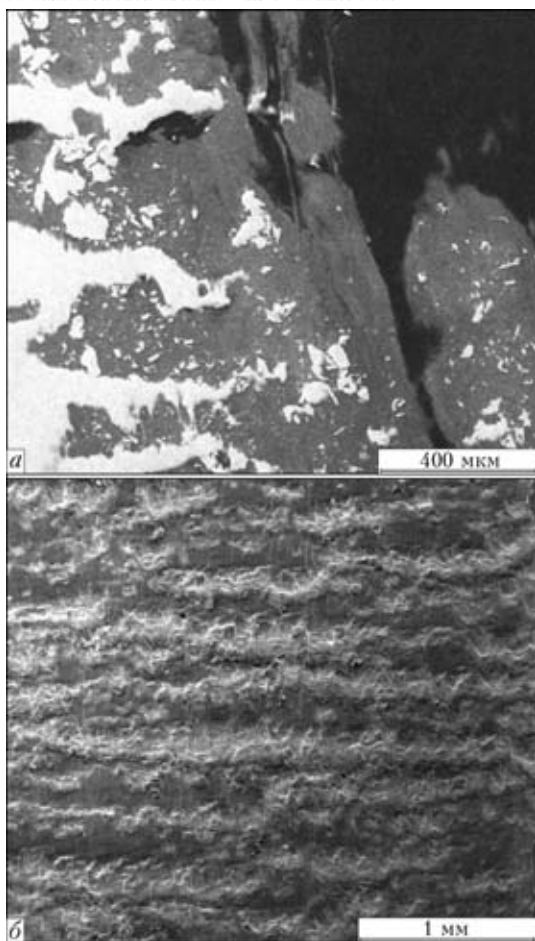


Рис. 7. Микроструктуры переходной зоны для соединения E_w , продольное сечение: *a* — полосы алюминия и тантала; *б* — алюминий полностью вытравлен

На рис. 8, *a* видно множество выступов разных размеров от нескольких микрометров до 100...150 мкм. Некоторые из них начинаются на одной полосе, пересекают другую и образуют перетяжку между полосами. О роли выступов, содействующих образованию соединений, отмечалось выше при анализе соединения E_p .

Как видно из рис. 7 и 9, у соединения E_w в отличие от S_w не наблюдаются зоны локального расплавления, т. е. изолированные расплавленные области. Вместо них на рис. 9, если двигаться от твердой фазы алюминия, видны слои расплавленного алюминия, вначале не содержащие, а затем содержащие частицы другой фазы (с малой, затем с большой плотностью частиц). Размеры частиц изменяются в широких пределах: от 50 до 500 нм. Обращает на себя внимание достаточно резкая огранка частиц. Далее идет кромка тантала, наблюдаемая на рис. 9, *a*, *б*, как светящаяся линия. Такую светящуюся границу («жгут»), которая представляет собой расплавленную пленку, авторы наблюдали ранее у соединения A_p титан-алюминид [5].

На дифрактограмме, снятой с продольной поверхности шлифа (см. рис. 6, *б*), отчетливо видно, как регистрируются рентгеновские пики не только

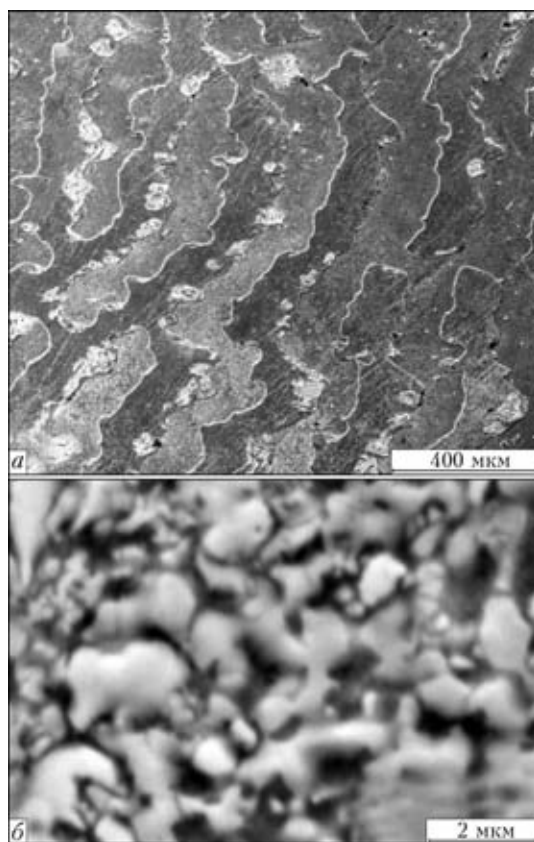


Рис. 8. Микроструктуры продольного сечения поверхности раздела для соединения S_w : *a* — полосы меди и тантала, видны многочисленные зоны локального расплавления; *б* — зона локального расплавления

от тантала и алюминия, но от интерметаллической фазы Al_3Ta . Соединения Al_3Ta имеет тетрагональную кристаллическую решетку, пространственная группа 14/mmm, структурный тип Al_3Ti . Именно частицы Al_3Ta видны на рис. 9, *б*. Очевидно, что для протекания интерметаллической реакции требуется расплавление тантала. Действительно, на рис. 9, *в* видны сферолиты, которые являются свидетелями расплавления тантала. Подобную структуру имеет упоминаемая выше расплавленная пленка для соединения A_p титан-алюминид, где также наблюдались сферолиты (см. рис. 5, *д* в работе [5]).

На рис. 9, *г* приведена структура слоя, содержащего интерметаллические включения, после отжига при 500 °С в течение 1 ч. Видно, что структура является неоднородной, но в целом произошло укрупнение частиц по сравнению с наблюдаемыми на рис. 9, *б*.

У соединения E_w пленка включает кромку тантала шириной 2...2,5 мкм и упоминаемый выше расплавленный слой с шириной примерно 40 мкм (30 мкм с частицами, 10 мкм — без частиц). Наблюдаемая структура переходной зоны формируется следующим образом: вначале расплавление алюминия как более легкоплавкого, затем подплавление поверхности тантала, образование твердого раствора на основе алюминия, по достиже-



нию определенных концентраций образование частиц интерметаллической фазы. Указанные частицы сохраняются при растворении алюминия и наблюдаются (см. рис. 7, б) наряду с частицами тантала.

Однако прежде чем в соответствии с предложенным выше сценарием начинается расплавление, происходит самый быстротечный процесс: разлет твердых частиц тантала, которые видны на рис. 3, в, 7, а, 9, а.

Тот факт, что у соединения E_w расплавленная область представляет собой пленку на поверхности раздела, тогда как у соединения E_p — изолированные зоны согласуются с интенсификацией режима сварки, используемого для получения соединения E_w по сравнению с соединением E_p (см. рис. 1). С этим же связано наблюдение интерметаллических включений у соединения E_w и их отсутствие у соединения E_p .

Расплавление и склеивание. Сильное взрывное воздействие при получении соединения E_w свидетельствует о приближении к верхней границе свариваемости. В этом случае расплавление становится опасным для сплошности соединения. Однако, как полагают авторы, в благоприятном случае (при не слишком высоких значениях параметров взрывного воздействия) расплавление,

напротив, содействует образованию соединения, благодаря склеиванию поверхностей. В этом отношении чрезвычайно убедительной является микрофотография (см. рис. 9, а), которая демонстрирует переход от алюминия к танталу, происходящий через расплавленный алюминий, алюминий с частицами, расплавленный тантал. Очевидно, что такой переход облегчает сцепление алюминия и тантала по сравнению с резким твердофазным переходом.

Для других материалов, а именно полимеров, лучшим клеящим веществом считается раствор или расплав данного полимера [18]. Это в какой-то степени подтверждает возможность склеивания также исследуемых металлов за счет их расплавления при сварке взрывом, поскольку при расплавлении сразу решаются проблемы смачивания, адгезии и защиты от контактной коррозии. Обратим внимание на следующее обстоятельство. Алюминий — один из немногих металлов, склеивание которого невозможно без предварительной химической обработки поверхности [19]. Одной механической обработки оказывается недостаточно. Однако пластина алюминия перед сваркой не подвергалась химической обработке. Тем не менее сварное соединение с танталом было получено. Здесь, скорее всего, проявилась замеча-

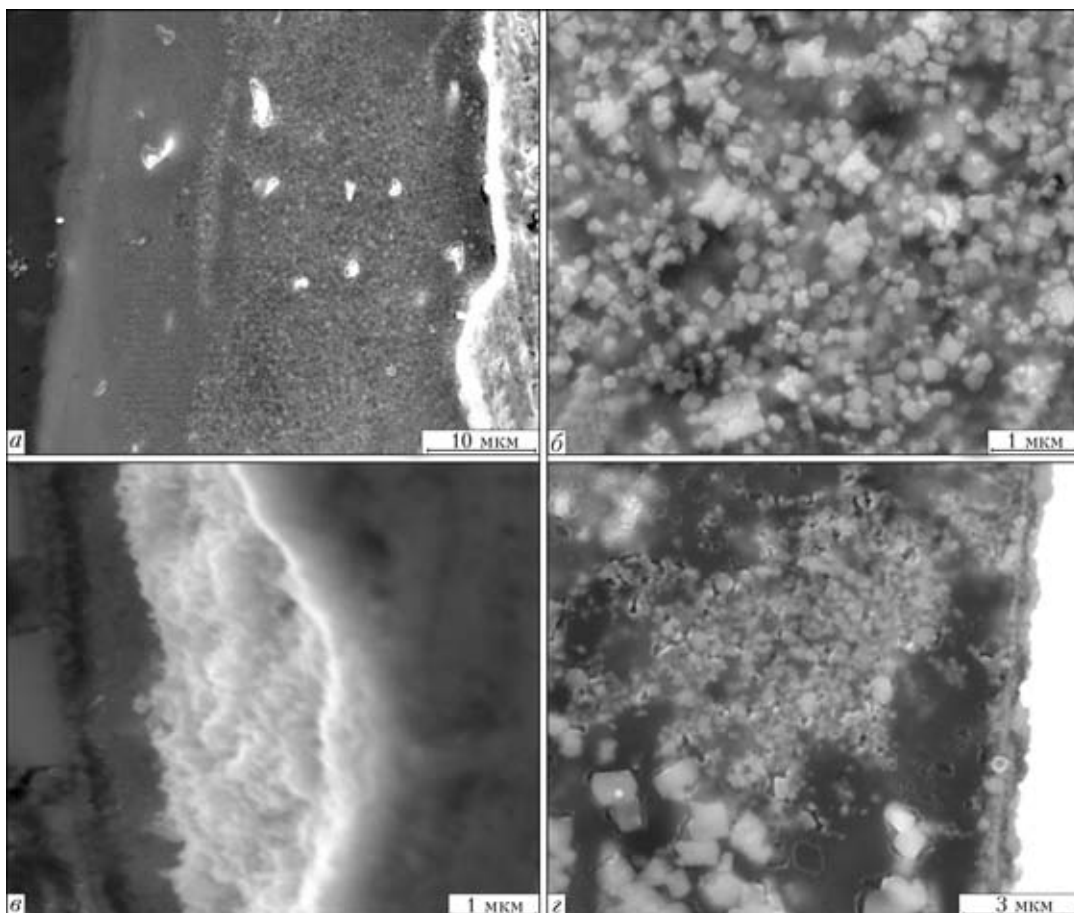


Рис. 9. Микроструктуры поперечного сечения переходной зоны для соединения E_w : а — слои расплавленного алюминия без частиц и с частицами; б — частицы интерметаллида Al_3Ta в расплаве алюминия; в — сферолиты; г — после отжига



тельная особенность сварки взрывом: самоочищение свариваемых поверхностей благодаря кумулятивному эффекту [1, 20].

Известно, что пленка клеящего вещества не должна по толщине превышать определенное значение [18]. В применении к сварным соединениям это может означать ограничение на толщину расплавленной области. При интенсификации режима сварки и приближении к верхней границе свариваемости будет достигнута критическая толщина расплавленной области, при которой склеивание становится невозможным.

Таким образом, сварка взрывом в той или иной степени вбирает в себя и другой способ соединения материалов, а именно их склеивание путем образования расплавленных областей.

Электронно-микроскопические исследования выполнены в Центре коллективного пользования электронной микроскопии УрО РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант № 10-02-00354, проекта Президиума РАН № 12-П-2-1053, проектов УрО РАН № 12-У-2-1011, 12-2-006-УТ и Государственной целевой программы Украины «Нанотехнологии и наноматериалы» № 1.1.1.3-4/10-Д.

1. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1980. — 220 с.
2. Lysak V. I., Kuzmin S. V. Lower boundary in metal explosive welding. Evolution of ideas // J. Mat. Proc. Technol. — 2012. — **212**. — P. 150–156.
3. Биметаллическое соединение орторомбического алюминид титана с титановым сплавом (диффузионная сварка, сварка взрывом) / В. В. Рыбин, В. А. Семенов, И. И. Сидоров и др. // Вопр. материаловедения. — 2009. — **59**, № 3. — С. 17–31.
4. Образование вихрей при сварке взрывом (титан — орторомбический алюминид титана) / В. В. Рыбин, Б. А. Гринберг, О. В. Антонова и др. // Физика мет. и металловедение. — 2009. — **108**, № 4. — С. 371–384.
5. Структура зоны соединения титана с орторомбическим алюминидом титана при сварке взрывом. I. Границы раздела разных типов / В. В. Рыбин, Б. А. Гринберг, М. А.

- Иванов и др. // Деформация и разрушение материалов. — 2010. — № 11. — С. 27–33.
6. Структура зоны соединения титана с орторомбическим алюминидом титана при сварке взрывом. II. Локализованные вихревые расплавленные зоны / Б. А. Гринберг, М. А. Иванов, В. В. Рыбин и др. // Там же. — 2010. — № 12. — С. 26–34.
7. Nanostructure of vortex during explosion welding / V. V. Rybin, B. A. Greenberg, M. A. Ivanov et. al. // J. Nanosci. and Nanotechnol. — 2011. — **11**, № 10. — P. 8885–8895.
8. Особенности формирования структуры переходной зоны соединения Cu–Ta, полученного сваркой взрывом / Б. А. Гринберг, О. А. Елкина, О. В. Антонова и др. // Автомат. сварка. — 2011. — № 7. — С. 24–30.
9. Неоднородности поверхности раздела при сварке взрывом / Б. А. Гринберг, М. А. Иванов, В. В. Рыбин и др. // Физика мет. и металловедение. — 2012. — **113**, № 2. — С. 187–200.
10. Сварка взрывом: процессы перемешивания металлов, не имеющих взаимной растворимости (железо–серебро) / Б. А. Гринберг, М. А. Иванов, В. В. Рыбин и др. // Там же. — 2012. — **113**, № 11 (В печати).
11. Frey D., Banker J. Recent successes in tantalum clad pressure vessel manufacture: A new generation of tantalum clad vessels // Proc. of corrosion solutions conf., 2003, USA. — Wah Chang, 2003. — P. 163–169.
12. Коллоидная химия / М. И. Гельфман, О. В. Ковалевич, В. П. Юстратов и др. — СПб.: Лань, 2004. — 336 с.
13. Mott N. F. Fragmentation of shell cases // Proc. Royal Soc. A. — 1947. — **189**, Jan. — P. 300–308.
14. Grady D. Fragmentation of rings and shells. The legacy of N. F. Mott. — Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, 2006. — 361 p.
15. Процессы фрагментации при сварке взрывом / Б. А. Гринберг, М. А. Иванов, В. В. Рыбин и др. // Деформация и разрушение материалов. — 2012. — № 8. — С. 2–13.
16. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. — М.: Металлургия, 1986. — 224 с.
17. Богунов А. З., Кузовников А. А. Получение биметалла алюминий–сталь с профилированной контактной границей // Автомат. сварка. — 2009. — № 11. — С. 74–77.
18. Фрейдин А. С., Турусов Р. А. Свойства и расчет адгезионных соединений. — М.: Химия, 1990. — 256 с.
19. Капелюшник И. И., Михалев И. И., Эйдельман Б. Д. Технология склеивания деталей в самолетостроении. — М.: Машиностроение, 1972. — 224 с.
20. Захаренко И. Д. Сварка металлов взрывом. — Минск: Наука і тэхніка, 1990. — 205 с.

Presented are the results of investigation of structure of transition zone of aluminium-tantalum joints, having different flat and wavy shape of the interfaces. Independently of the shape of boundaries, two types of fragmentation were revealed: one of them is similar to fragmentation in explosion, another one — at intensive plastic deformation. The same types of segmentation were earlier observed also in joints of copper-tantalum metals, having no mutual solubility unlike aluminium-tantalum. Melting was observed in transition zone of joints being investigated. Structure of melted areas depends greatly on the availability of mutual solubility in metals being welded.

Поступила в редакцию 03.07.2012



ВЛИЯНИЕ ПАЛЛАДИЯ НА СТРУКТУРУ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИПОЕВ СИСТЕМЫ Ag–Cu–Zn–Ni–Mn

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

Исследовано влияние палладия на структуру, интервалы плавления и технологические свойства сплавов системы Ag–Cu–Zn–Ni–Mn. Установлено, что легирование палладием позволяет повысить прочностные свойства паяных соединений и незначительно уменьшить угол смачивания.

Ключевые слова: пайка, алмазно-твердосплавный инструмент, бескадмиевые припои, структура, интервал плавления, контактный угол смачивания, индукционный нагрев, температура фазовых превращений, палладий, серебряный припой, прочность соединений

Для пайки различных материалов широко применяют припои на основе серебра, содержащие кадмий. Учитывая негативное влияние кадмия на здоровье человека, были проведены исследования для определения возможности разработки припоев без кадмия, которые имели бы такие же или подобные характеристики смачивания и температуры плавления [1–3].

Как показал анализ литературных данных, для пайки алмазно-твердосплавного инструмента хорошо зарекомендовали себя бескадмиевые припои системы Ag–Cu–Zn–Ni–Mn. Типичным их представителем является американский припой ВAg-22, химический состав которого следующий, мас. %: 48...50 Ag; 15...17 Cu; 21...25 Zn; 4...5 Ni; 7...8 Mn; $T_{\text{сол}} = 680$ °C; $T_{\text{ликв}} = 699$ °C; $T_{\text{пайки}} = 699...830$ °C.

Целью настоящей работы являлось изучение технологических свойств стандартного припоя при пайке твердосплавных пластин, определение прочностных характеристик паяных соединений и оценка возможности улучшения последних за счет дополнительного легирования.

Для выплавки опытных сплавов систем Ag–Cu–Zn–Ni–Mn и Ag–Cu–Zn–Ni–Mn–Pd в лабораторных условиях использовали индукционный нагрев с помощью высокочастотного генератора типа ВЧИ4-10У4 с двухвитковым индуктором. Припои выплавляли в алундовых тиглях, причем последний размещали в графитовом тигле, т. е. фактически осуществлялся радиационный нагрев. Сначала в тигель засыпали флюс ПВ-200, загружали шихту Ag–Cu–Ni–Mn(Pd), помещенную в никелевую фольгу, а затем снова засыпали флюс. Нагрев шихты проводили до полного ее расплавления

и наведения жидкой ванны. Изготовленный слиток помещали в новый тигель, засыпали флюс ПВ-209 и нагревали сплав до получения жидкой ванны. В процессе охлаждения ванны до температуры 400...500 °C вводили цинк. После этого несколько раз проводили кратковременный нагрев до полного расплавления и обеспечения однородности расплава за счет индукционного и механического перемешивания.

Температурный интервал плавления сплавов определяли путем дифференциального термического анализа на установке ВДТА-8М в тиглях, изготовленных из оксида циркония. Нагревы и охлаждения проводили в атмосфере гелия со скоростью 80 °C/мин. Масса исследуемого образца составляла $1,25 \pm 0,05$ г. Образцы нагревали дважды для достижения хорошего прилегания навески ко дну тигля и обеспечения получения надежных сведений о тепловых эффектах. Термические эффекты фиксировали по кривой второго нагрева, солидус и ликвидус сплава определяли по кривой нагрева (при охлаждении сплава существенное влияние оказывает переохлаждение перед началом кристаллизации). В то же время значения тепловых эффектов лучше отражены на кривой охлаждения сплавов.

Анализ полученных данных показывает, что легирование палладием существенно влияет на температуру фазовых превращений и интервал плавления (табл. 1, рис. 1, а). Так, в сплаве системы Ag–Cu–Zn–Ni–Mn фиксируется только одна фаза (рис. 1, б). Температура солидуса составляет 670, ликвидуса — 710 °C. В сплаве с 2 % палладия вторая фаза при нагреве имеет не ярко выраженный термический эффект, но при охлаждении он проявляется четко (рис. 1, в). Температура солидуса составляет 660, ликвидуса — 720 °C, т. е. несколько расширяется интервал кристаллизации. Сплав с 5 % палладия также двухфазен (рис. 1, г, табл. 2).



Таблица 1. Интервалы плавления промышленного припоя (1) и исследуемых сплавов (2–4)

Номер сплава	Состав сплава	$T_{\text{сол}}^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ликв}}^{\circ}\text{C}$
1	40Ag–17Cu–17Zn–26Cd	590	610
2	49Ag–16Cu–23Zn–4,5Ni–7,5Mn	670	710
3	49Ag–16Cu–23Zn–4,5Ni–7,5Mn–2Pd	660	720
4	49Ag–16Cu–23Zn–4,5Ni–7,5Mn–5Pd	670	740

Увеличение концентрации палладия приводит к повышению температуры солидуса и ликвидуса (рис. 2).

Металлографические исследования и микро-рентгеноспектральный анализ сплавов проводили на образцах после определения температурного интервала плавления, при этом все сплавы были охлаждены до комнатной температуры с одинаковой скоростью.

Сплав системы Ag–Cu–Zn–Ni–Mn имеет три четко выраженные фазы (рис. 3, а). Все они кристаллизуются в близких температурных интервалах, поэтому на термической кривой не отражаются. Характерно, что первичные дендриты на основе твердого раствора содержат примерно равное количество меди, никеля, цинка, около 15 % марганца, но мало серебра (табл. 2). В близком температурном интервале кристаллизуется твердый раствор на основе серебра (74,4 %). Никель в этой фазе отсутствует, содержание меди и марганца уменьшилось в несколько раз, а цинка — вдвое. Эти две фазы участвуют в процессе кристаллизации эвтектики, типичная структура которой наблюдается на отдельных участках (табл. 2, рис. 3, а).

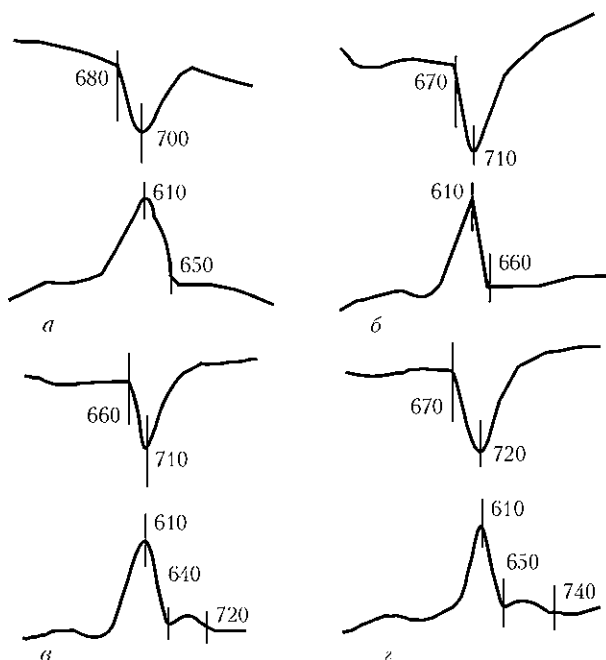


Рис. 1. Данные дифференциального термического анализа сплавов: а — Ag–Cu–Zn–Ni–Mn (аморфная фольга); б — Ag–Cu–Zn–Ni–Mn (литой); в — Ag–Cu–Zn–Ni–Mn–2Pd; г — Ag–Cu–Zn–Ni–Mn–5Pd

При легировании данной композиции палладием описанный механизм кристаллизации выражается более четко. Кристаллизация первичных дендритов (темные кристаллы на основе меди, рис. 3, б, табл. 2) не развивается, поскольку вокруг сразу кристаллизуется вторая фаза (на основе серебра). Вначале происходит отдельная кристаллизация составляющих эвтектику фаз, а затем осуществляется кристаллизация нормальной эвтектики, которая занимает большую часть шлифа. Этот механизм допускался в работе А. А. Бочвара [4],

Таблица 2. Химическая неоднородность сплавов системы Ag–Cu–Zn–Ni–Mn(Pd), мас. %

Исследуемый участок (фаза)	Ag	Cu	Zn	Ni	Mn
49Ag–16Cu–23Zn–4,5Ni–7,5Mn					
Общий	49,885	16,894	21,024	6,592	5,607
Дендрит (темная)	4,591	28,938	27,285	24,802	14,987
Зерно (матрица светлая)	74,483	6,692	16,068	0,00	2,761
Эвтектика	58,706	15,784	21,284	1,088	3,139
49Ag–16Cu–23Zn–4,5Ni–7,5Mn–2Pd					
Общий	64,541	11,082	16,919	1,044	3,430 +(2,995 Pd)
Дендрит (темная)	13,696; 11,471	43,421; 34,875	14,573; 25,190	10,905; 14,031	5,274+(12,123Pd)...7,258+(6,162 Pd)
Зерно (матрица светлая)	74,810	6,214	16,959	0,00	2,021+(0,00 Pd)
Эвтектика (полосчатая)	67,617; 52,748	9,727; 20,488	15,417; 21,156	1,291; 0,335	2,564...2,219+2,850...3,057 Pd
49Ag–16Cu–23Zn–4,5Ni–7,5Mn–5Pd					
Общий	63,603	11,371	16,723	1,932	3,239+(3,143 Pd)
Дендрит (темная)	8,122	22,072	27,821	13,127	9,753+(19,038 Pd)
Зерно (матрица светлая)	70,685	7,437	15,380	0,905	2,676+(2,919Pd)
Эвтектика (полосчатая)	60,781;59,666	13,038;12,086	17,836;14,758	1,105;2,363	2,153+(5,093Pd)...2,963+(8,166Pd)

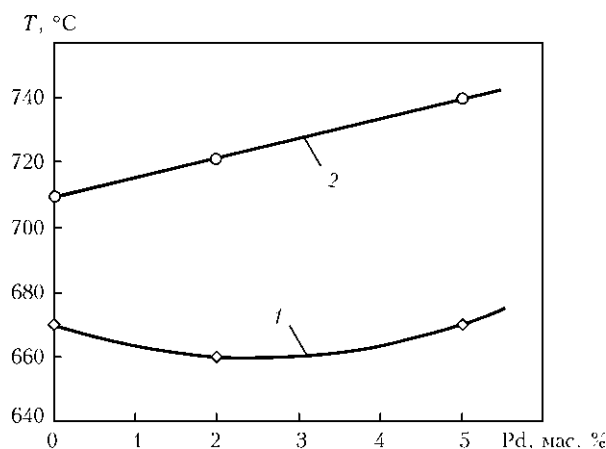


Рис. 2. Температура солидуса (1) и ликвидуса (2) сплавов в зависимости от содержания палладия

но он в большей степени характерен для органических веществ, а в металлических сплавах наблюдается редко [5]. Отметим, что в дендритах (темного оттенка) сосредоточены никель и палладий, в светлой фазе (на основе серебра) они отсутствуют (рис. 3).

При увеличении содержания палладия в сплаве количество первичных кристаллов увеличивается, хотя они и не получают большого развития, так как начинает кристаллизоваться фаза на основе серебра. Участки раздельной кристаллизации эвтектики занимают большую часть шлифа. И значительно реже наблюдаются участки нормальной эвтектики (рис. 3, в). Отметим, что в этом сплаве зерна на основе меди содержат небольшое количество никеля и палладия.

С использованием исследуемых припоев были проведены эксперименты по определению площади растекания по нержавеющей стали и твер-

Таблица 3. Площадь растекания и прочность паяных образцов на срез стали 12Х18Н10Т

Номер припоя	Система припоя	Площадь растекания, $S_{\text{сред}}, \text{мм}^2$	Среднее значение прочности $\tau_{\text{ср}}, \text{МПа}$
1	Ag-Cu-Zn-Cd	-	263,3 [6]
2	Ag-Cu-Zn-Ni-Mn	704,7	342,3
3	Ag-Cu-Zn-Ni-Mn-2Pd	573,0	321,3
4	Ag-Cu-Zn-Ni-Mn-5Pd	971,0	359,1

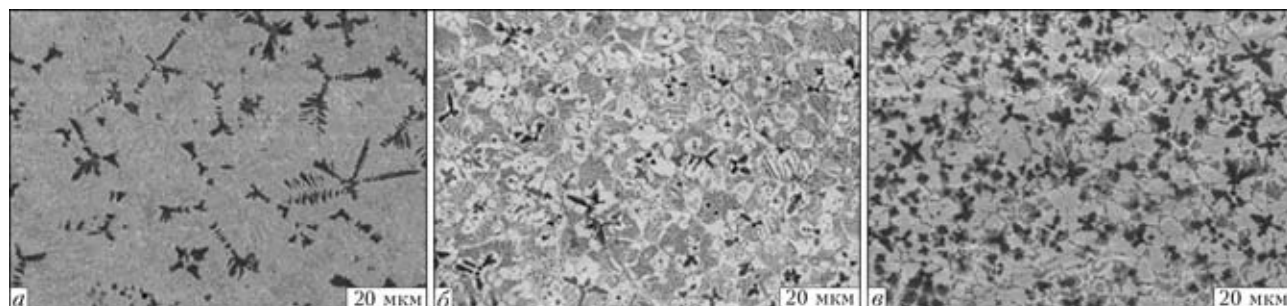


Рис. 3. Микроструктуры опытных сплавов: а — 49Ag-16Cu-23Zn-4,5Ni-7,5Mn; б — 49Ag-16Cu-23Zn-4,5Ni-7,5Mn-2Pd; в — 49Ag-16Cu-23Zn-4,5Ni-7,5Mn-5Pd

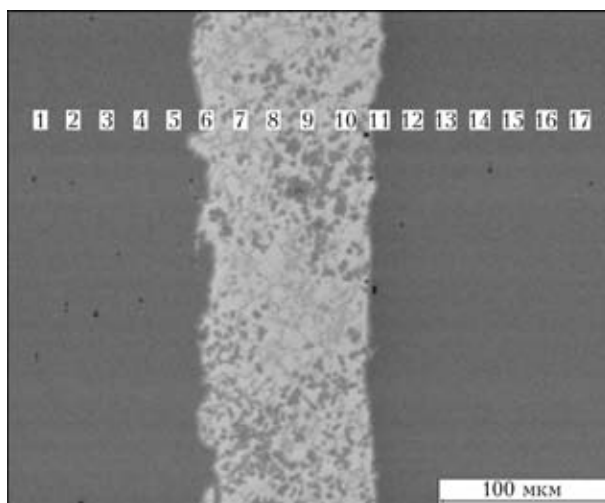


Рис. 4. Расположение точек рентгеноспектрального микроанализа паяного шва и основного металла

дославному материалу ВК8 и прочности паяных соединений при соединении этих материалов. Эксперименты проводили на нержавеющей стали по ГОСТ 23904-79 и ГОСТ 23047-75 соответственно. Полученные результаты приведены в табл. 3.

Исследована структура и химическая неоднородность соединений нержавеющей стали, полученных с использованием припоя системы Ag-Cu-Zn-Ni-Mn. Структура паяного шва оказалась аналогична структуре чистого припоя: четко выявлены первичные дендриты твердого раствора, вокруг которых кристаллизуется вторая фаза и участки нормальной эвтектики, т. е. на границе соединения диффузионный обмен интенсивно не развивался. Это подтверждается как данными микрорентгеноспектрального анализа в отдельных точках (рис. 4, табл. 4), так и диаграммами распределения элементов в

поперечном сечении шва (рис. 5).

Из данных табл. 4 следует, что железо и хром — основные элементы паяемого металла в шве практически отсутствуют так же, как и отсутствует переходная зона. Массовая доля железа в основном металле у границы соединения составляет 60...70 %, а со стороны шва 0,3...0,75 %. Аналогичная си-

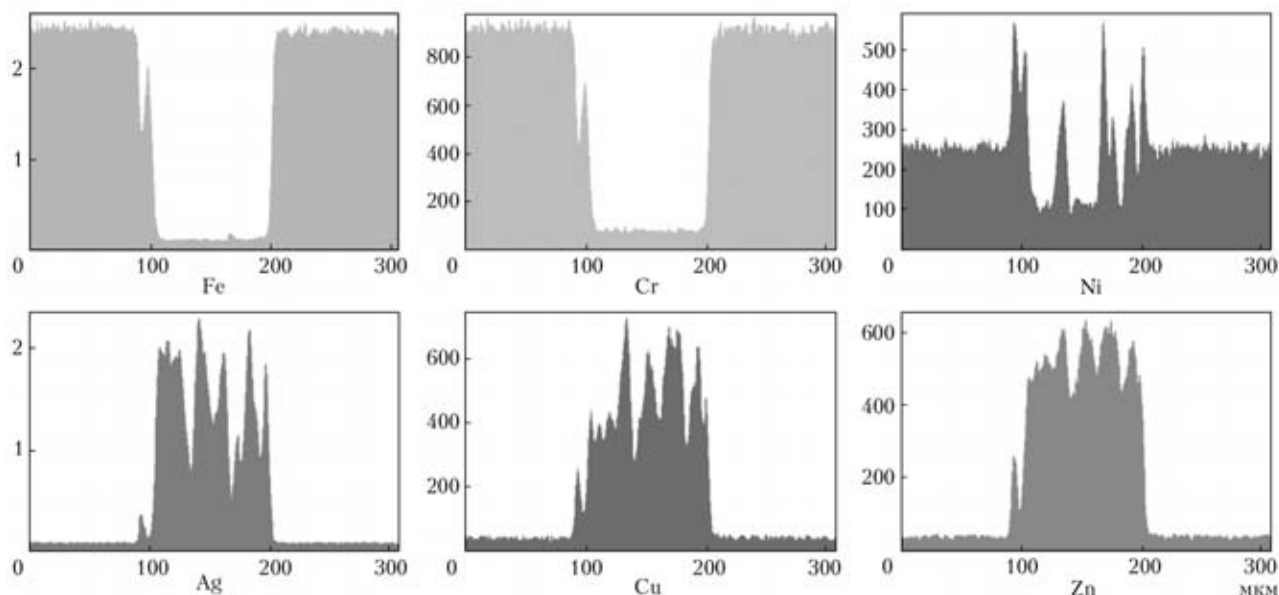


Рис. 5. Диаграммы качественного распределения элементов в металле паяного шва при использовании припоя системы Ag-Cu-Zn-Ni-Mn

туация с хромом: у границы сплавления со стороны основного металла его концентрация составляет 13,5...16,5 %, а со стороны припоя 0,18...0,4 %. Титан и кремний в шве вообще отсутствуют.

Элементы припоя присутствуют в шве и практически не обнаруживаются в основном металле (табл. 4). Так, массовая доля серебра у границы соединения со стороны шва находится в пределах 65,0...69,5 %, а со стороны основного металла в

пределах 0...0,97 %. Подобное характерно и для меди с цинком.

Для проведения экспериментов по растеканию в качестве подложки использовали пластины из твердосплавного материала ВК8 диаметром 13,5 мм и толщиной 4,5 мм и припой в виде кубиков размером 4×4×4 мм.

Образцы перед пайкой обезжировали ацетоном (спиртом), затем в центре образца устанавливали исследуемый припой и сверху по всему

Таблица 4. Содержание элементов (мас. %) в отдельных точках паяного соединения

Номер спектра	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ag
1	0,6	0,43	17,08	1,80	70,51	9,58	0	0	0
2	0,5	0,38	17,06	1,89	70,62	9,54	0	0	0
3	0,57	0,77	17,6	1,84	69,54	9,68	0	0	0
4	0,7	0,30	16,7	1,33	69,9	11,08	0	0	0
5	0,66	0,52	17,04	2,02	69,45	9,62	0,70	0	0
6	0,26	0,35	13,57	3,40	59,74	17,34	2,51	2,84	0
7	0	0	0,40	0,71	0,30	3,12	13,34	17,13	64,99
8	0	0	0,24	0,67	0,65	2,13	11,33	15,52	69,46
9	0	0	0	0,37	0,23	0,74	8,90	13,40	76,37
10	0,11	0	0	0,95	0,76	4,25	11,59	15,34	67,00
11	0	0	0,18	0,79	0,75	3,24	11,65	13,79	69,60
12	0,36	0,44	16,56	2,21	70,02	9,43	0	0	0,97
13	0,26	0,71	16,95	2,09	70,91	9,06	0	0	0
14	0,5	0,41	16,99	1,44	70,71	9,95	0	0	0
15	0,6	0,59	17,33	1,71	68,70	9,81	0	0	1,26
16	0,53	0,27	17,18	1,92	70,44	9,67	0	0	0
17	0,34	0,50	17,7	1,62	69,45	9,34	0	0	1,06

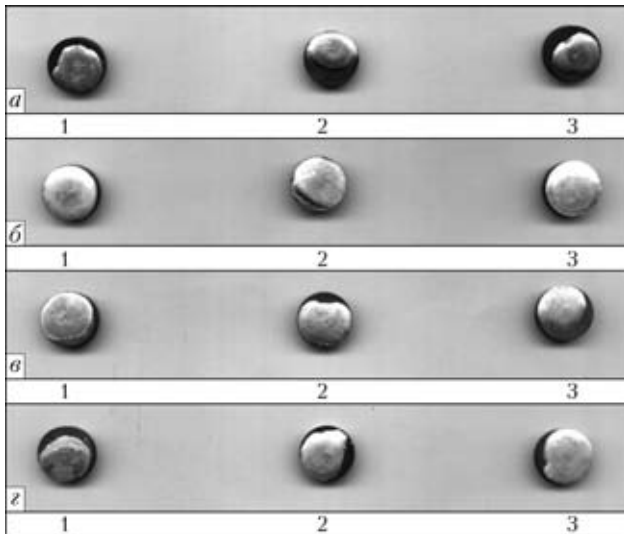


Рис. 6. Внешний вид образцов при исследовании на растекание по твердосплавному материалу ВК8 припоями № 1–4 (а–г)

периметру образца наносили флюс ПВ-209, температурный интервал активности которого находится в интервале 600...850 °С [7]. Нагрев образцов проводили с использованием высокочастотного генератора ВЧИ4-10У4 (с частотой 440 кГц) и мощностью 10 кВт. Для этих иссле-

дований применяли двухвитковый индуктор, внутрь которого устанавливали подставку из термостойкой керамики с каналом для подвода термпары, измеряющей температуру нагрева образца до полного растекания припоя. После расплавления припоя делали выдержку в течение трех секунд, после чего нагрев прекращали. Степень смачивания твердой подложки припоями определяли путем оценки площади растекания расплавленного припоя (по три образца на каждый припой) и контактного угла между подложкой и растекшейся каплей металла припоя (рис. 6). Контактный угол определяли на шлифах, вырезанных из образцов перпендикулярно плоскости смачивания (рис. 7). Данные получены с использованием программы Auto Cad.

Образцы для механических испытаний паяли на воздухе с применением высокочастотного нагрева. На твердосплавные пластины (BK8+BK8, BK15+BK15 и др.) предварительно наносили флюс в виде пасты, замешанной на воде. Затем между твердосплавными пластинами помещали навеску припоя и осуществляли нагрев до полного расплавления флюса, припоя и формирования соединения.

Прочность на срез определяли в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, использовав специальное устройство (к разрывной машине Р-05). Как видно из приведенных данных в табл. 5, легирование опытного припоя палладием существенно повысило прочность соединений.

С применением припоев исследуемых систем изготовили партию долот для сверления скважин для добычи рассеянного метана, что в несколько раз увеличило длину проходки скважин [8].

Таблица 5. Результаты испытаний соединений ВК8, паяных припоями различных систем

Номер припоя	Система припоя	Площадь растекания $S_{2\text{сред}}^*$, мм ²	Контактный угол смачивания θ , град	Прочность на срез $\tau_{\text{ср}}$, МПа
1	Ag–Cu–Zn–Cd	95,3	17	245
2	Ag–Cu–Zn–Ni–Mn	136,32	10	225
3	Ag–Cu–Zn–Ni–Mn–2Pd	111,06	16	250
4	Ag–Cu–Zn–Ni–Mn–5Pd	112,01	13	315

* Определение площади растекания проводили с применением высокочастотного нагрева по нестандартной методике.

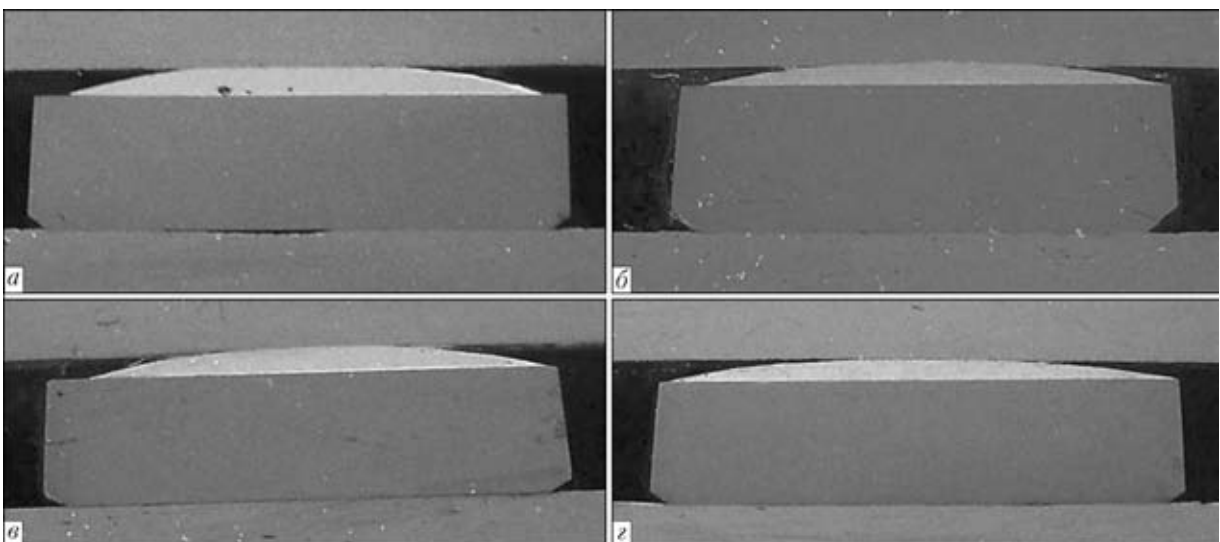


Рис. 7. Поперечное сечение образцов после испытания на растекание припоями соответственно 1–4 (см. табл. 5)



Таким образом, применение экологически чистых припоев систем Ag–Cu–Zn–Ni–Mn и Ag–Cu–Zn–Ni–Mn–Pd вместо припоев системы Ag–Cu–Zn–Cd для пайки породоразрушающего и металлорежущего инструмента позволяет не только устранить вредное воздействие кадмия на организм человека, но и получить более прочные паяные соединения.

1. Roberts P. M. Recent developments in cadmium-free silver brazing alloys // *Welding J.* — 1978. — № 10. — P. 23–30.
2. Timmins P. F. The development of Ag-based brazing alloys // *Ibid.* — 1994. — № 10. — P. 31–33.
3. Хорунов В. Ф., Максимова С. В., Стефанив Б. В. Влияние присадок олова на структуру и технологические

свойства припоев системы Ag–Cu–Zn // *Автомат. сварка.* — 2010. — № 7. — С. 19–24.

4. Бочвар А. А. *Металловедение.* — М.: Металлургиздат, 1956. — 495 с.
5. Таран Ю. Н., Мазур В. И. *Структура эвтектических сплавов.* — М.: Металлургия, 1978. — 312 с.
6. Петрунин И. Е., Лоцманов С. Н., Николаев Г. Ф. *Пайка металлов.* — М.: Металлургия, 1973. — 2-е изд. — 280 с.
7. Клочко Н. А. *Основы технологии пайки и термообработки твердосплавного инструмента.* — М.: Металлургия, 1981. — 200 с.
8. Хорунов В. Ф., Максимова С. В., Стефанив Б. В. Изготовление буровых долот для добычи рассеянного метана в шахтных выработках // *Автомат. сварка.* — 2010. — № 6. — С. 48–51.

Palladium influence on the structure, melting ranges and technological properties of Ag–Cu–Zn–Ni–Mn system alloys was studied. It is established that alloying with palladium allows improvement of strength properties of brazed joints and slightly lowering the wetting angle.

Поступила в редакцию 22.05.2012

НОВАЯ КНИГА

Проблемы современного материаловедения: Труды XVI сессии Научного совета по новым материалам Международной ассоциации академий наук (26 мая 2011 г., г. Киев). — Гомель: ИММС НАНБ, 2012. — 70 с.

В сборнике представлены доклады ведущих ученых-материаловедов стран СНГ, доложенных на сессии Научного совета МААН:

В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. Новые пути и подходы к созданию композиционных металлических, металлокерамических и интерметаллических материалов

Е. Н. Каблов. Перспективные материалы для авиационной техники. Технологические платформы как основной механизм формирования инновационной экономики

Ю. Д. Третяков, Е. А. Гудилин. Инженерия функциональных и конструкционных материалов

Л. И. Леонтьев, Б. Р. Гельчинский. Новые перспективные материалы и технологии

Б. А. Мовчан. Электронно-лучевая технология твердо-жидкофазных медицинских субстанций с наноразмерной структурой

В. М. Бузник. Новые подходы и применения фторполимеров в конструкционном и функциональном материаловедении

В. М. Иевлев. Фотонная обработка в активации твердофазных процессов синтеза функциональных тонкопленочных материалов

О. Н. Григорьев. Ультравысокотемпературная керамика на основе боридов — получение, свойства и некоторые применения

В. Г. Гаврилюк. Водородная хрупкость металлов и перспективы разработки водородостойких сталей

С. В. Добаткин. Развитие нано- и субмикроструктурных металлических материалов, полученных деформационными методами

Ю. В. Савельев. Биологически активные полимеры и материалы на их основе

И. И. Булык, В. В. Панасюк. Водородные технологии формирования наноструктуры в ферромагнитных материалах системы самарий–кобальт

С. А. Клименко. Современные инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях механической обработки

С. Е. Кондратюк. Структурообразование, наследственность и свойства литой стали





ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ «ТЕЧЬ ПЕРЕД РАЗРУШЕНИЕМ» ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ВЕРТИКАЛЬНЫМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ РЕЗЕРВУАРАМ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТИ

В. В. КНЫШ, д-р техн. наук, **А. Ю. БАРВИНКО**, **Ю. П. БАРВИНКО**, кандидаты техн. наук,
А. Н. ЯШНИК, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты экспериментальных исследований циклической трещиностойкости образцов стыковых сварных соединений из стали 06ГБ-390 применительно к резервуарам для хранения нефти при стабильном развитии сквозной усталостной трещины, образовавшейся от поверхностного надреза по линии сплавления, с момента ее появления до достижения длины ≈ 30 мм. Крупномасштабные образцы сварных соединений с размерами $650 \times 160 \times 20$ мм испытывались при гармоническом отнулевом переменном растяжении с $\sigma_{\max} = 2/3 \sigma_T$. Показано, что применение для расчетных поясов стенки резервуаров листового проката указанной стали позволяет при использовании критерия «течи перед разрушением», исключить протяженные разрушения в сварных соединениях стенки.

Ключевые слова: усталостная трещина, развитие сквозной усталостной трещины, критерий «течь перед разрушением», циклическое нагружение

В последнее десятилетие из-за отсутствия на мировом нефтяном рынке стабильной цены на нефть во многих странах для создания необходимого запаса этого продукта строят резервуары вместимостью 50...100 тыс. м³ и более. Соответственно с каждым годом ужесточаются и требования к экологической безопасности таких сооружений. Существенно возросли нормативные требования относительно механических свойств сталей, включая и в Z направлении, к листовому прокату стенок резервуара и их сварных соединений. Однако в силу различных особенностей в сварных соединениях стенки нельзя полностью исключить дефекты, которые при ее работе в условиях циклического нагружения могут стать источником зарождения и развития усталостных вязких разрушений. При таких условиях особую актуальность приобретает задача установления долговечности стадии стабильного докритического развития образовавшейся в расчетных поясах стенки резервуаров сквозной усталостной трещины. Появление темного пятна на белой стенке от просачивающейся нефти с образовавшейся сквозной трещины может служить надежным критерием выявления трещины в тех случаях, когда время ее подрастания до критических размеров позволит гарантированно выявить трещину в условиях технического осмотра резервуаров согласно применяемым регламентам. Такой критерий выявления трещин в сосудах давления получил название «течи перед разрушением» [1].

Целью предлагаемой работы являлось экспериментальное обоснование возможности приме-

нения критерия «течи перед разрушением» к вертикальным резервуарам для хранения нефти, в которых нижние пояса изготовлены из нового класса качественной стали 06ГБ-390.

Применение для расчетных нижних поясов стенки резервуаров ниобийсодержащих сталей нового поколения 06ГБ-390; 06Г2Б-440 [2] (в дальнейшем в работе классы прочности будут опущены) с показателями ударной вязкости $KCV_{-40} \geq 120$ Дж/см² толщиной от 8 до 40 мм и мелкозернистой изотропной структурой, существенно повысило их трещиностойкость. В этом отношении представляет интерес работа [3], в которой показано, что для ряда испытанных сталей с $KCV_{-20} \geq 80$ Дж/см² наблюдается стабилизация критического раскрытия трещины в пределах $\delta_{кр} = 0,18...0,20$ мм. С учетом этого логично ожидать, что при применении для нижних поясов стенки резервуаров стали 06ГБ и возможном образовании в ней сквозной усталостной трещины скорость ее подрастания обеспечит достаточное время для обнаружения указанной трещины на докритическом этапе развития.

Как отмечалось выше, при применении критерия «течи перед разрушением» в условиях эксплуатации резервуаров важно, чтобы продолжительность стадии стабильного роста трещины на линейном (втором) участке диаграммы усталостного разрушения [4], выраженная количеством циклов заполнения — опорожнения емкости, гарантировала наличие достаточного времени для возможности обнаружения сквозной трещины по истечении из нее нефти и принятия необходимых мер безопасности. В данной работе для обоснования критерия «течи перед разрушением» применительно к стенке резервуаров для хранения нефти испытывали на усталость плоские образцы с поперечным стыковым швом (рис. 1). У образ-

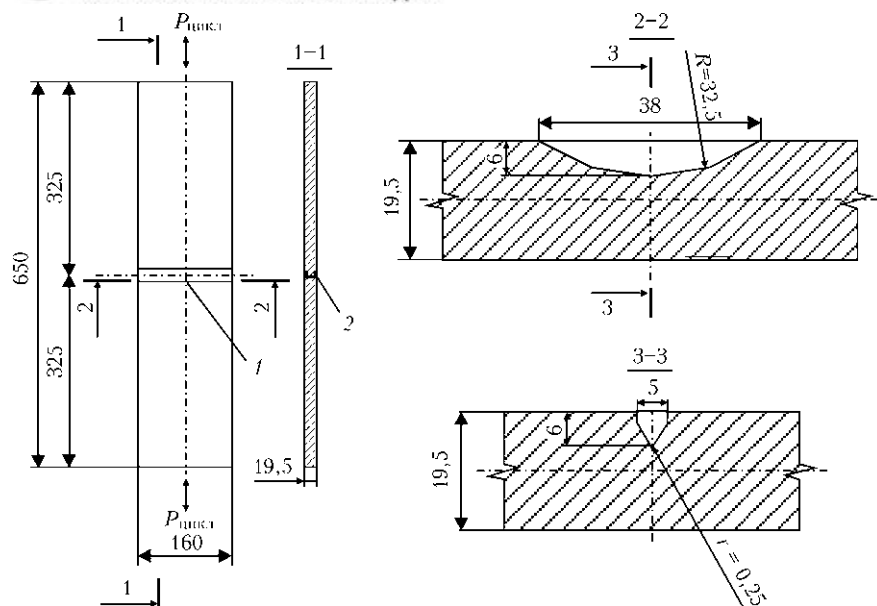


Рис. 1. Схема и размеры образцов для испытания сварных соединений стали 06ГБ на циклическую трещиностойкость: 1 — надрез в зоне сплавления; 2 — усиление шва снято с двух сторон

цов, изготовленных из листового проката стали 06ГБ, поперечное сечение с учетом снятия усиления шва, составляло 160×19,5 мм, а длина — 650 мм. Максимальное напряжение цикла гармонического нагружения принимали с учетом максимального значения расчетных кольцевых напряжений в стенке резервуаров [5], определяемых из условия

$$\sigma_k \leq R_y \gamma_c / \gamma_n,$$

где R_y — расчетное сопротивление, равное 350 МПа; γ_c — коэффициент условий работы поясов стенки, равный 0,8; γ_n — коэффициент надежности по назначению, равный 1,1.

С учетом приведенного максимальное напряжение цикла переменного нагружения образцов принято $\sigma_{\max} = 260$ МПа. Такой уровень кольцевых напряжений учитывает допуски [5] на отклонение геометрической формы стенки новых резервуаров от проектной. Учитывая, что стенка емкости представляет собой тонкостенную оболочку диаметром до 60 м и высотой до 20 м, через 15–20 лет эксплуатации нормы [6] допускают превышение первоначальных геометрических отклонений (просадка основания под стенкой, появление вмятин и др.) в два раза. Естественно, в этих условиях в отдельных областях стенки кольцевые напряжения будут существенно выше начальных значений, что учитывалось коэффициентом $\gamma_c = 0,8$, но эти напряжения не должны превышать расчетных для данной стали с учетом сроков тех-

нического обследования резервуаров. Подростание начального поверхностного надреза в образце на первом этапе до образования сквозной трещины, а затем и рост этой трещины приводит к уменьшению площади нетто-сечения образца и увеличению напряжений в образце, что в определенной мере имитирует отмеченное локальное повышение кольцевых напряжений в стенке реальных резервуаров.

Начальный трещиноподобный поверхностный надрез выполняли по центру образца, вдоль линии сплавления шва, специально заточенной фрезой. Длина полуэллиптического надреза $2a$ составляла 38 мм, а его глубина — 6 мм, радиус закругления надреза — 25 мм. Все образцы испытывали на гидропульсаторе ЦДМ 200пу при одноосном отнулевом переменном растяжении с частотой 5 Гц. Долговечность стадий образования поверхностной трещины от надреза и ее подростания по тол-

Рост длины сквозной трещины $2a$ на поверхности, противоположной надрезу, и напряжений в образцах по нетто-сечению в зависимости от количества циклов нагружения N

№ п/п	Количество циклов нагружения N	Длина сквозной трещины* $2a$, мм	Площадь ослабления образца, см ²	Площадь образца-нетто, см ²	Максимальные напряжения по нетто-сечению**, МПа
1	0	10,1	6,2	25,0	332,0
2	150	15,2	6,7	24,5	338,8
3	200	16,7	6,9	24,3	341,5
4	250	18,0	7,0	24,2	343,0
5	300	19,4	7,2	24,0	345,0
6	600	26,2	8,0	23,4	354,2
7	1400	40,0	9,5	21,7	373,0

* Длина трещины, площадь сечения и напряжения даны как среднее значение по результатам испытания шести образцов. ** Максимальное усилие циклирования 8300 кг; сквозная трещина длиной $2a$ расположена по линии сплавления сварного стыкового соединения стали 06ГБ.



щине образца до появления сквозной трещины приведены в работе [7].

Испытания образцов на усталость проводили при комнатной температуре, однако, учитывая, что листовой прокат стали 06ГБ с толщиной 8...50 мм сохраняет постоянными свои высокие пластические свойства в температурном интервале $T = +20...-40$ °С [2], можно считать, что полученные результаты испытаний корректны до температуры $T = -40$ °С. В процессе испытаний на противоположной надрезу стороне образца измеряли начальную длину образовавшейся сквозной трещины и фиксировали количество циклов, при которых она сформировалась. В дальнейшем фиксировали количество циклов при ее удлинении на каждые 3...6 мм. При длине трещины $2a \approx 40$ мм в ее вершинах появлялись пластические утяжки и испытания прекращали. Результаты усталостных испытаний образцов приведены в таблице. На рис. 2 приведена зависимость длины усталостной трещины от количества циклов переменного нагружения.

Данные таблицы показывают, что при длине трещины $2a \leq 30$ мм в нетто-сечении образца напряжения не превышали расчетного сопротивления стали 06ГБ ($R_y = 350$ МПа). При достижении трещиной длины $2a > 40$ мм в нетто-сечении образца максимальные напряжения достигали значений, близких к пределу текучести стали, т. е. появление наблюдаемых пластических утяжек при такой длине трещины не связано с предельным состоянием циклической трещиностойкости, а обусловлено ограниченными размерами образца. Такие высокие напряжения при указанной длине трещины в поясах стенки реального резервуара не будут возникать в силу многократно меньшего ослабления стенки рассматриваемым дефектом.

Использование применяемой в нормах [8] эмпирической зависимости между K_{1C} и KCV позволяет определить для данного сварного соединения критическую длину трещины $2a_{кр}$ при минимальной температуре эксплуатации резервуаров $T = -40$ °С. В соответствии с [8] $K_{1C} = 0,1 \sqrt{0,1 \frac{E}{1-\mu^2} KCV_{-40}}$, МПа·√м. При $KCV_{-40} = 246$ Дж/см² для сварного шва получаем $K_{1C} = 236$ МПа·√м. При возможных повышенных кольцевых напряжениях в стенке $\sigma_k = R_y = 350$ МПа, исходя из известного соотношения для сквозной трещины критической длины $2a_{кр}$, $K_{1C} = \sigma_k \sqrt{\pi a_{кр}}$, для данного σ_k получаем значение $a_{кр} = 145$ мм и соответственно $2a_{кр} = 290$ мм. Для новых резервуаров вместимостью 50 тыс. м³ в соответствии с нормами [5], кольцевые напряжения в стенке принимают равными $\sigma_k = 260$ МПа. При таких напряжениях расчетное значение критической длины трещины достигает $2a_{кр} = 520$ мм.

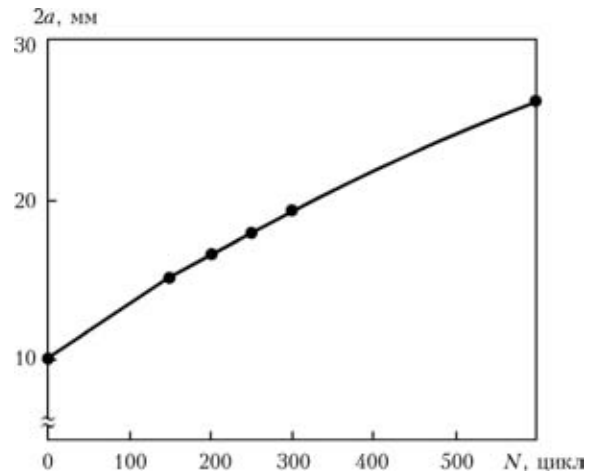


Рис. 2. Зависимость длины $2a$ сквозной трещины в зоне сплавления от количества циклов нагружения N образцов стыковых сварных соединений стали 06ГБ. Значение длины трещины $2a$ в каждой точке дано как среднее по результатам испытания шести образцов

Учитывая, что значения KCV_{-40} для основного металла и шва фактически одинаковы, полученные значения критической длины трещины можно распространить и на основной металл стенки.

Заниженное значение критической длины сквозной трещины около 30 мм, принятое при усталостных испытаниях образцов сварных соединений, которое позволяет надежно фиксировать на поверхности стенки темное нефтяное пятно, дает десятикратный запас относительно реальной критической длины трещины резервуаров примерно 300 мм.

Из рис. 2 видно, что при устойчивом стабильном развитии сквозной усталостной трещины в образцах зависимость ее длины от количества циклов нагружения близка к линейной. На протяжении первых 300 циклов нагружения наблюдается стабильное ее развитие до длины 20,0 мм. При последующих 300 циклах длина трещины увеличивается всего на 6 мм. Длина трещины, соответствующая 300 циклам нагружения, имеет важное практическое значение, поскольку данное количество циклов нагружения (слива-налива нефти) соответствует одному году эксплуатации резервуаров на отдельных нефтепарках с самым высоким оборотом нефти [9]. На обычных нефтепарках этот показатель не превышает 100...120 в год.

Применительно к эксплуатируемым резервуарам полученные при испытании образцов результаты должны быть скорректированы коэффициентом запаса по количеству циклов нагружения. Эта корректировка необходима для учета масштабного фактора касательно возможного наличия не выявленных дефектов, имеющихся в реальных резервуарах. В работе [10] на основании обобщения исследований по широкой экспериментальной программе натуральных усталостных испытаний сосудов давления предлагается принимать коэффициент запаса по количеству циклов равным 20.



В нашем случае это означает, что в реальности будет гарантировано время для обнаружения на стенке пятна вытекающей нефти, соответствующее выполнению пятнадцати (300:20) циклов слива-налива нефти. Для нефтепарков с обычным режимом эксплуатации это составляет один месяц, а при усиленном режиме не менее двух недель эксплуатации. При наличии в соответствии с правилами эксплуатации резервуаров обязательного ежедневного визуального осмотра поверхности стенки емкостей данного времени вполне достаточно для гарантированного обнаружения по критерию «течи перед разрушением» появившегося дефекта и принятия мер по его ремонту. Период стабильного подрастания трещины при последующих циклах нагружения от 300 до 600 может рассматриваться как гарантия безопасного обнаружения трещины при форс-мажорных обстоятельствах.

Гарантированное выявление усталостных трещин на этапе их стабильного развития исключает возможность разрушения расчетных поясов стенки как по основному металлу, так и по сварным соединениям. Поэтому при расчетах резервуаров необходимо прежде всего обеспечить условия исключения локальных (местных) разрушений основной стенки, днища, арматуры и узлов патрубков. Главной задачей при расчете основной стенки резервуара становится обеспечение ее статической прочности. Исключение образования на ее поверхности протяженных разрушений будет обеспечиваться применением критерия «течи перед разрушением» при условии использования для стенки сталей, имеющих группу стойкости к слоистым разрушениям Z 35 и ударную вязкость $KCV \geq 80$ Дж/см² при минимальной температуре эксплуатации емкостей. Как пример, таким требованиям отвечает сталь 06ГБ. При наличии основной стенки с применением данной стали защитная стенка будет только локализовывать в своих пределах возможный разлив нефти, подвергаясь при этом статическому нагружению.

Предложенный подход исключает необходимость устройства на основной стенке дополнительных конструкций в виде бандажей или других решений, как инструмента остановки протяженных разрушений, а на защитной — специальных колец жесткости для сохранения геометрической формы стенки.

Исключение протяженных разрушений на стенке резервуаров путем применения листового проката новых сталей с указанными выше механическими свойствами и обоснованного использования критерия «течи перед разрушением» не снимает требований высокого качества листового проката и его сварных соединений. Получение для новых сталей сварных соединений с механическими свойствами не ниже свойств основного ме-

талла и исключение образования в них холодных трещин требует специальных технологий сварки и повышенного по сравнению с требованием норм на резервуары [11] объема контроля их качества.

Результаты экспериментальных исследований, представленные в данной публикации и в работе [12], успешно реализованы при проектировании и строительстве двух резервуаров с защитной стенкой вместимостью по 50 тыс. м³ на нефтеперекачивающей станции «Мозырь» (Республика Беларусь). Монтажные и сварочные работы при строительстве данных резервуаров выполняли под авторским надзором специалистов ИЭС им. Е. О. Патона.

Выводы

1. Показано, что долговечность стадии стабильного докритического развития образовавшейся сквозной усталостной трещины превышает 300 циклов нагружения. С учетом принятого для сосудов давления коэффициента запаса по количеству циклов нагружения равного 20 указанная долговечность обеспечивает минимум две недели безопасной эксплуатации резервуара для хранения нефти. При осуществлении в соответствии с правилами эксплуатации резервуаров обязательного ежедневного визуального осмотра поверхности стенки емкостей данного времени достаточно для гарантированного обнаружения появившегося дефекта по критерию «течи перед разрушением» и принятия мер по его ремонту.

2. Выполнение расчетных поясов стенки резервуаров из стали 06ГБ с толщиной до 30 мм при использовании критерия «течи перед разрушением» позволяет исключить протяженные разрушения в сварных соединениях стенки и устранить возможность появления потока изливающейся нефти с высокой кинетической энергией. В этой связи нет необходимости в устройстве на основной стенке резервуара дополнительных конструкций в виде бандажей, а на защитной стенке — специальных колец жесткости для сохранения геометрической формы стенки.

1. Броек Д. Основы механики разрушения / Пер. с англ. — М.: Высш. шк., 1980. — 368 с.
2. ТУ У 27.1-05416923-085:2006. Прокат листовой, свариваемый из качественной стали классов прочности 355-590 для машиностроения. — Введ. 02.04.2007.
3. 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. — 1982. — № 12. — С. 5-9.
4. Карзов Г. П., Леонов В. П., Тимофеев Б. Т. Сварные сосуды высокого давления. — Л.: Машиностроение, 1975. — 464 с.
5. ПБ 03-605-03. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. — М., 2003. — 85 с.
6. Инструкция по техническому надзору, методам ревизии и отбраковке трубчатых печей, резервуаров для нефти и нефтепродуктов. — М., 2003. — 85 с.



7. *Развитие* поверхностного трещиноподобного дефекта в сварном соединении стали 06ГБ-390 при циклическом нагружении / А. Ю. Барвинко, В. В. Кныш, Ю. П. Барвинко, А. Н. Яшник // Автомат. сварка. — 2012. — № 4. — С. 48–51.
8. *ВБН В.2.3-00018201.04-2000*. Расчеты на прочность действующих магистральных трубопроводов с дефектами. — Киев, 2000. — 25 с.
9. *РД 16.01-60.3000-КТН-026-1-04*. Нормы проектирования стальных вертикальных резервуаров для хранения нефти объемом 1000...50000 м³. — М.: АК «Транснефть», 2004. — 71 с.
10. *Никольс Р.* Конструирование и технология изготовления сосудов давления. — М.: Машиностроение, 1975. — 464 с.
11. *ГОСТ 31385-2008*. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. — М., 2009. — 109 с.
12. *Хладостойкость* и сопротивляемость слоистому разрушению сварных соединений стали 06ГБ-390 / В. Д. Позняков, А. Ю. Барвинко, Ю. П. Барвинко и др. // Автомат. сварка. — 2012. — № 3. — С. 5–7.

The paper gives the results of experimental studies of cyclic crack resistance of samples of butt welded joints on 06GB-390 steel in the case of oil storage tanks at stable development of a through-thickness crack, initiating from the notch surface along the fusion line, from the moment of its initiation up to reaching the length of ~ 30 mm. Large-scale samples of welded joints of 650×160×20 mm dimensions were tested at harmonic alternating zero-to-tension stress cycle with $\sigma_{\max} = 2/3 \sim \sigma_y$. It is shown that application of rolled sheets of the mentioned steel for design rings of tank wall allows, when using the "leak-before-break" criterion, eliminating extended fractures in the wall welded joints.

Поступила в редакцию 06.04.2012

МЕЛКОПОЛЮСНЫЙ ВЕРХНИЙ БЛОК МАГНИТНОЙ ПЛИТЫ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО СТАНКА, ИЗГОТОВЛЕННЫЙ МЕТОДОМ АВТОВАКУУМНОЙ ПАЙКИ

В Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины разработан технологический процесс изготовления мелкополюсных верхних блоков магнитной плиты, основанный на высокотемпературной автовакуумной пайке.

Технологический процесс, рассчитанный на изготовление блоков любой формы (прямоугольной, круглой) и размеров, не требует применения специального оборудования, дорогих припоев и наряды с этим обеспечивает высокое качество изделий.

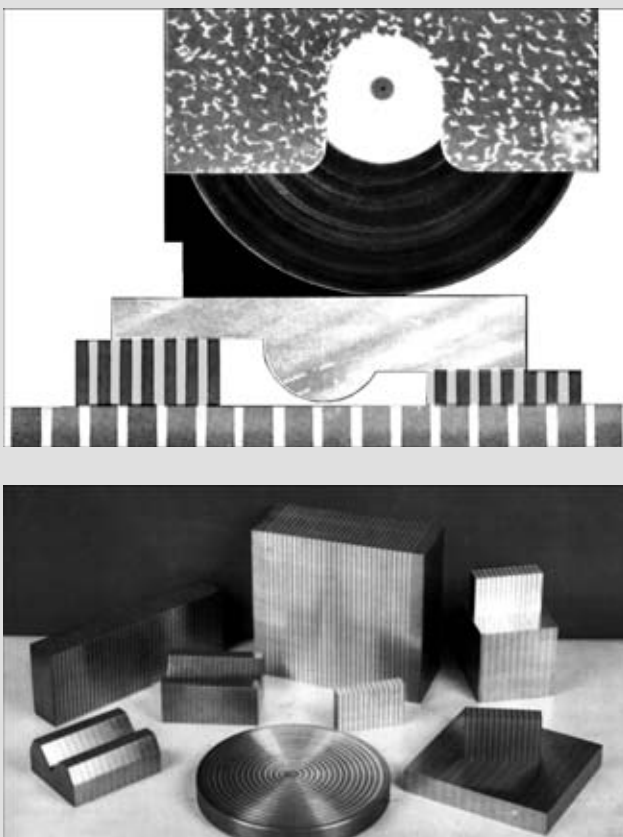
Мелкополюсные блоки, предназначенные для закрепления мелких и тонких деталей на магнитных станочных приспособлениях, позволяют равномерно распределить силу магнитного крепления по всей рабочей поверхности. Минимальная сила притяжения при полной загрузке детали диаметром 10 мм составляет 50 Н/см², что дает возможность производить обработку на форсированных режимах.

При использовании технологии автовакуумной пайки можно получать монолитные, герметичные, жесткие блоки с любой степенью магнитной неоднородности.

Так, многослойный блок длиной 1250 мм в процессе эксплуатации деформируется не более чем на 2 мкм, т. е. ведет себя как однородный листовый материал, благодаря чему удается достичь высокой точности обработки.

Изготовление мелкополюсных блоков методом автовакуумной пайки не требует использования драгоценных и дорогостоящих материалов, в качестве припоя применяются сплавы на медной, марганцевой или никель-марганцевой основе.

Оптимальное соотношение толщины магнитных и немагнитных элементов, соединенных автовакуумной пайкой, повышает КПД блоков на 30...40 % по сравнению с известными.





ТРАНЗИСТОРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ (ОБЗОР)

А. В. ЛЕБЕДЕВ, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описаны наиболее распространенные схемы транзисторных источников питания электрической дуги. Рассмотрены особенности параллельной работы транзисторов, способы защиты от перенапряжений и формирования траектории переключения, современные драйверы, конструкции высокочастотных трансформаторов, корректоры мощности, системы управления плавлением и переносом электродного металла.

Ключевые слова: электродуговая сварка, источник питания, транзистор, трансформатор, система управления, плавление и перенос металла

Ведущие производители сварочного оборудования в основном изготавливают источники питания для электродуговой сварки транзисторного типа. Тиристорные выпрямители и выпрямители со ступенчатым переключением напряжения выпускаются в небольших количествах. Транзисторные источники имеют небольшую массу и габариты, высокую точность регулирования и быстродействие. Простейшим транзисторным источником является источник на основе импульсного регулятора (чоппера) (рис. 1). По сравнению с инверторными источниками транзисторы работают при существенно меньших напряжениях без сквозных токов, схема управления намного проще, отсутствует высокочастотный трансформатор. Чопперные источники генерируют относительно небольшие помехи и мало искажают напряжение сети, коэффициент мощности близок к 1. Недостатком является большая масса. Чопперный источник Origo Mig 4002c (ESAB) на 400 А имеет массу 139 кг. Масса инверторного источника Origo Mig 4001i на такой же ток равна 43,5 кг. Один из первых транзисторных чопперных источников, выполненный в Украине в 1972 г. в Институте электродинамики по заказу Института электросварки им. Е. О. Патона, был предназначен для сварки в космосе плавящимся электродом. Максимальный ток составлял 300 А, питание 27 В от бортовой сети космического корабля. В 1980-х годах Институт электродинамики разработал чопперные источники на 500 А для многопостовой полуавтоматической сварки в судостроении [1]. Для исследования переноса металла при сварке плавящимся электродом был изготовлен источник на 1000 А, который снижал потери металла на разбрызгивание до 0,5 % при сварке в углекислом газе [2, 3].

Использование в чоппере двух транзисторов и высокочастотного трансформатора дает возмож-

ность отказаться от сетевого трансформатора (рис. 2). Другие названия такой схемы — однотактный преобразователь, асимметричный мост, «косой» мост [4–6]. Использование такой схемы устраняет причины, вызывающие сквозные токи и несимметричное намагничивание высокочастотного трансформатора. Поэтому в начальный период развития инверторных источников «косые» мосты были очень популярны. Сейчас значительная доля источников выполняется по этой схеме. Уменьшение пульсаций выходного напряжения и повышение мощности достигается работой двух «косых» мостов на одну нагрузку (рис. 3). Недостаток «косого» моста — увеличенная в два раза масса высокочастотного трансформатора — устраняет полумостовая схема (рис. 4). Такая схема наиболее часто применяется в источниках мощностью несколько киловатт и сетевым напряжением 220 В. Однако в ней существует возможность прохождения сквозного тока через транзисторы, что может вывести инвертор из строя. Другим недостатком является увеличенная

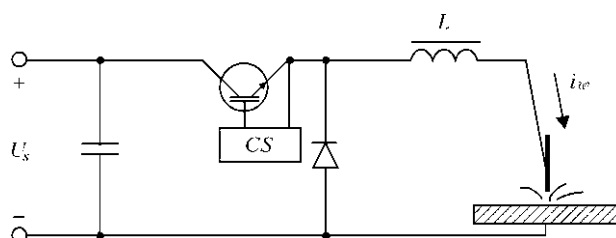


Рис. 1. Схема понижающего импульсного регулятора (чоппера)

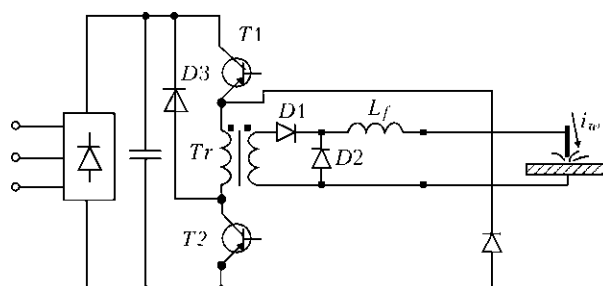


Рис. 2. Схема асимметричного («косого») моста

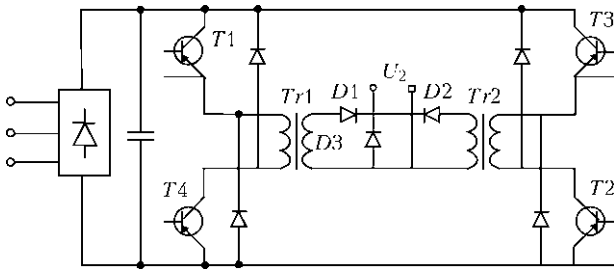


Рис. 3. Схема источника питания, состоящая из двух асимметричных мостов

в два раза токовая нагрузка на транзисторы по сравнению с мостовой схемой (рис. 5). В Институте электродинамики опытный образец мостового сварочного инвертора с питанием от сети 380 В был выполнен в 1982 г. Отсутствие в то время надежно работающих транзисторов на напряжения более 600 В не позволило внедрить его в серийное производство. Эта проблема полностью не решена даже сейчас. Максимально допустимый ток наиболее популярных IGBT транзисторов при температуре корпуса 25 °С 50 А. С повышением температуры до 100 °С ток заметно падает. Для надежной работы транзисторов их необходимо загружать не более чем на 30...50 % от максимально допустимого тока. Поэтому даже в источниках с питанием от напряжения 220 В и сварочным током 120 А часто используют параллельное включение транзисторов, которое начали использовать еще в 1950-е годы [7]. Надежность такого соединения может быть меньше, чем надежность одного транзистора, так как возрастает количество полупроводниковых кристаллов и паек. Чтобы не уменьшать, а увеличить надежность параллельного соединения, в Институте электродинамики был предложен способ глубокого резервирования. В начале 1960-х годов с использованием этого способа был выполнен транзисторный коммутатор на ток 100 А [8]. Параллельно было соединено 1000 (тысяча!) германиевых транзисторов, каждый из которых имел максимально допустимый ток 0,4 А. Транзисторы проходили предварительную сортировку по падению напряжения. Соединяли параллельно транзисторы с одинаковым падением напряжения, что уменьшало разброс тока между транзисторами. Кроме того, в цепь эмиттера и базы каждого транзистора включали предохранители. Отказ транзистора вызывал сгорание предохранителей и его отключение. Ток, который коммутировал отказавший транзистор, перераспределялся между оставшимися транзисторами. Так как все транзисторы даже в случае коммутирования максимального тока работали существенно недогруженными, то увеличение тока на 1/1000 не снижало надежности работы. Теоретические исследования и эксперименты подтвердили высокую надежность такого соединения. В современных сварочных источниках способ глубо-

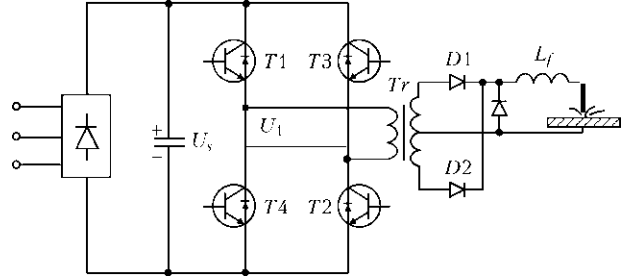


Рис. 5. Схема мостового инвертора

кого резервирования не используется, поэтому отказ одного транзистора может вывести источник из строя.

При конструировании высокочастотных силовых трансформаторов необходимо решить две основные проблемы: получить минимальную индуктивность рассеяния и принять меры по устранению влияния поверхностного эффекта в проводниках. Индуктивность рассеяния вызывает паузы в выпрямленном напряжении, которые снижают эффективность источника [9]. Наиболее простой способ борьбы с индуктивностью рассеяния — использовать ее как индуктивность в резонансном источнике питания. В остальных случаях следует уменьшать индуктивность путем минимизации расстояния между обмотками и их секционированием. В современных источниках используется частота от 20 до 80 кГц. Магнитопроводы трансформаторов изготавливают из феррита. Глубина проникновения тока в проводник на таких частотах составляет от 0,5 до 0,34 мм. Поэтому имеет смысл использовать провода с поперечными размерами не более 1...2 мм. В источниках мощностью несколько киловатт токи относительно небольшие, поэтому первичная обмотка мотается проводом круглого сечения. Во вторичной обмотке используется параллельное соединение проводов круглого или прямоугольного сечения [6, 10, 11]. Другим вариантом уменьшения влияния поверхностного эффекта является применение в качестве проводников литцендрата, который можно заменить одновременной намоткой параллельными проводниками. В трансформаторах большей мощности первичная обмотка мотается проводником прямоугольного сечения. Вторичная обмотка может быть изготовлена из медной изоли-

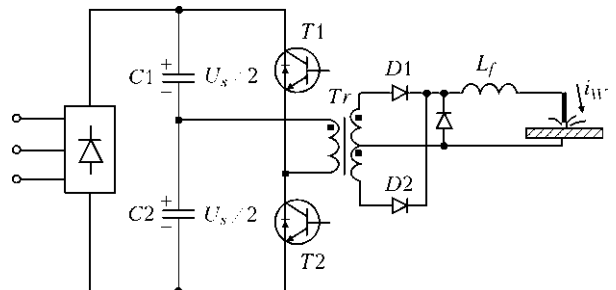


Рис. 4. Схема полумостового инвертора



рованной ленты с толщиной, равной удвоенной глубине проникновения тока и шириной, закрывающей всю первичную обмотку. По такой конструкции был сделан в 1982 г. для инверторного источника питания трансформатор броневых типа мощностью 15 кВт (ПВ = 100 %) массой 1 кг. Современные источники питания в основном используют броневые трансформаторы как наиболее технологичные, реже стержневые и кольцевые, хотя они уменьшают индуктивность рассеяния и улучшают условия охлаждения. Еще реже применяют наиболее технологичные кабельные трансформаторы. Для источника мощностью 3 кВт магнитопровод кабельного трансформатора состоит из нескольких ферритовых колец с площадью поперечного сечения 8 см², обмотками $w_1 = 12$ и $w_2 = 2$ витка [12, 13].

В современных источниках питания в основном используют IGBT транзисторы. Полевые транзисторы применяют намного реже. При параллельном соединении IGBT транзисторов транзистор, имеющий меньшее напряжение насыщения, пропускает больший ток и больше нагревается [14, 15]. Наибольшее влияние на надежность соединения оказывает знак температурного коэффициента напряжения насыщения (ТКНН). Если ТКНН имеет положительное значение, то в транзисторе с большим током увеличивается температура, падение напряжения возрастает, что приводит к уменьшению тока. Если ТКНН имеет отрицательное значение, то транзистор с большим током больше нагревается, падение напряжения на нем уменьшается, что приводит к еще большей нагрузке по току и дальнейшему нагреву. В IGBT транзисторах знак ТКНН зависит от тока. Например, для транзисторов типа GA100TS60SQ при небольших токах ТКНН отрицательный, а при больших — положительный [15]. Существует несколько факторов, способствующих выравниванию токов между параллельно соединенными транзисторами [16]. Первый фактор — транзисторы должны иметь одинаковую температуру, что достигается установкой их на одном радиаторе. В этом случае температуры кристаллов отличаются незначительно, что способствует снижению дисбаланса токов. Повышение общего тока (второй фактор) вызывает увеличение падения напряжения на всех транзисторах, что способствует еще более равномерному распределению [15]. Третий фактор — соединение предварительно подобранных транзисторов с одинаковыми падениями напряжения. Этим достигается разница в токах меньше 5 % [17, 18]. Если не подбирать транзисторы, то с увеличением их количества возрастает неравномерность распределения токов, которая в конце концов приведет к выходу из строя одного из них. В источниках питания соединяют параллельно также диоды выпрямителя сварочного тока.

Для уменьшения токов дисбаланса следует использовать диоды с одинаковым падением напряжения [18].

Кроме неравномерного распределения токов, в статике существует неравномерное распределение токов в динамике. Это вызвано разными временами включения и выключения транзисторов и пороговыми напряжениями отпирания. Подбор транзисторов по одинаковым динамическим характеристикам практически не применяется. Поэтому для уменьшения дисбаланса токов в динамике целесообразно в цепь управления каждого транзистора включать сопротивление [18]. Неравномерность распределения токов при переключении транзисторов вызывается индуктивностями соединительных проводников [19]. Применение IGBT модулей снимает с разработчика задачу уменьшения неравномерного распределения токов между дискретными транзисторами и диодами [20].

Управление выходным напряжением источника питания возможно несколькими способами. Первый — изменение напряжения питания инвертора, например, с помощью чоппера. Второй способ — использование регулируемого сварочного выпрямителя выходного напряжения. Третий, наиболее часто используемый способ, регулирование инвертора [21]. Регулирование возможно широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), ШИМ с регулируемым фазовым сдвигом (ШИМ-ФС), изменением частоты (ЧИМ) или комбинациями способов. Наиболее простой и часто используемый способ — это ШИМ. В мостовом инверторе при ШИМ транзисторы плеча коммутируются одновременно. Если транзисторы плеча коммутировать с временным сдвигом (ШИМ-ФС), то можно снизить динамические потери и помехи. При ЧИМ возможно изменение длительности импульса при постоянной длительности паузы или ее изменении при постоянной длительности импульса. Частотный способ чаще всего применяется в бюджетных и самодельных источниках [6, 11].

На надежность источника и энергетическую эффективность большое влияние оказывают процессы переключения транзисторов. В моменты переключения в кристалле транзистора выделяется большая мощность, вызывающая ускоренное старение кристаллов. Применение цепочек из конденсаторов, диодов и резисторов (снабберы) позволяет в моменты переключения перевести ток транзистора на конденсатор [21, 22]. В перерывах между коммутациями энергия, запасенная в конденсаторе, рассеивается в сопротивлении, увеличивая температуру внутри источника. При небольших паузах между коммутациями конденсатор не успевает разрядиться, эффективность снаббера снижается. Более сложные цепочки с дополнительной индуктивностью обеспечивают возврат энергии [4, 5, 21]. Эффективно действующие снаб-



беры достаточно громоздки. Наиболее простым способом улучшения условий переключения транзисторов и повышения безопасности их работы является отключение напряжения питания от инвертора в моменты коммутации дополнительным транзистором. Современные IGBT транзисторы могут кратковременно пропускать максимально допустимый ток при максимально допустимом падении напряжения на них. Поэтому во многих источниках не используются специальные устройства для формирования траектории переключения транзисторов. Часто обходятся применением одного высокочастотного конденсатора по питанию инвертора, расположенного максимально близко к транзисторам.

Напряжение на транзисторе, даже кратковременно, не должно превышать максимально допустимого значения. Коммутационные перенапряжения, вызванные индуктивностью проводов, могут достигать сотен вольт. Уменьшение перенапряжений достигается снижением площади контура протекания тока внутри инвертора [20, 21, 23]. Ограничение коммутационных перенапряжений осуществляется также конструированием контуров с минимальной площадью. Применение транзисторно-диодных модулей уменьшает перенапряжения.

Еще одним способом снижения динамических потерь и перенапряжений является применение резонансных инверторов, в которых переключение транзисторов происходит при нулевом токе или напряжении [5, 6, 21, 24–27]. Чаще всего первичная обмотка высокочастотного трансформатора включается последовательно с конденсатором C и индуктивностью L . В этом случае переключение транзисторов происходит при нулевом токе. Конденсатор также устраняет постоянную составляющую тока намагничивания. Схемы с параллельным включением C , L и первичной обмотки применяют реже. Инвертор должен обеспечивать широкий диапазон регулирования напряжения и тока при изменении нагрузки в диапазоне от короткого замыкания до холостого хода. В таких условиях тяжело обеспечить коммутацию транзисторов без тока во всех режимах. Поэтому в некоторых случаях динамические потери резонансного инвертора могут превышать потери в обычных инверторах. Наиболее часто резонансные инверторы применяют в источниках с питанием от сети 220 В. Ток регулируется частотным методом. Переключение транзисторов при нулевом токе происходит при максимальном сварочном токе и минимальной частоте. При возрастании частоты импеданс контура возрастает, сварочный ток уменьшается. Напряжение на конденсаторе во время резонанса может достигать нескольких киловольт [6, 11]. Исследование и проектирование резонансного инвертора аналитическими методами — сложная

задача, более удобно моделировать его с помощью пакетов MatLab, MicroCap и др. [26].

Ток, потребляемый из сети сварочным инвертором, имеет импульсную составляющую, обусловленную зарядом входного конденсатора. Особенно существенны импульсные токи при питании от однофазной сети. Это увеличивает среднеквадратичное значение потребляемого тока и искажает напряжение сети. Применение корректоров коэффициента мощности (ККМ) уменьшает среднеквадратичный ток, позволяет увеличить сварочный ток при той же нагрузке на сеть. Это особенно актуально для источников питания, подключенных к маломощной сети [4]. Достаточно простой и эффективно работающий ККМ можно построить на схеме преобразователя с повышением напряжения (рис. 6). Выходное напряжение ККМ равно 400 В, что позволяет применить коэффициент трансформации 5/1 и уменьшить ток транзисторов. Такую же схему можно применить при питании от трехфазной сети. Дальнейшее уменьшение искажений сети требует более сложных алгоритмов управления и схем [4, 28]. Корректоры мощности усложняют в целом источник питания и повышают стоимость. Поэтому, несмотря на преимущества, они применяются редко.

Для хорошего зажигания дуги и предотвращения ее обрывов напряжение холостого хода источника должно быть 60...80 В. Напряжение на дуге на токе 200 А не превышает 24 В. Если применять коэффициент трансформации трансформатора, обеспечивающий плавное регулирование напряжения в диапазоне от 0 до 80 В, то транзисторы в рабочем режиме будут пропускать увеличенный ток короткими импульсами. Это повышает потери энергии и вынуждает использовать транзисторы с большим допустимым током. Поэтому выгодно применять трансформаторы, максимальное вторичное напряжение которых равно номинальному напряжению дуги, а для повышения напряжения холостого хода применять дополнительный, маломощный источник питания с крутопадающей характеристикой. Для того чтобы не использовать отдельный инвертор, повышенное напряжение для маломощного выпрямителя можно получить от дополнительной обмотки основного трансформатора. Другим способом явля-

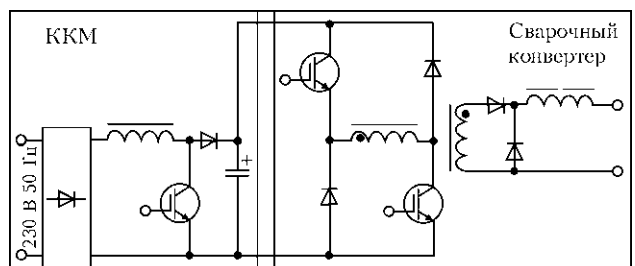


Рис. 6. Схема источника питания с ККМ



ется применение умножителя вторичного напряжения [6]. Дежурный ток в дуге будет поддерживаться все время, что снижает требования к индуктивности сглаживающего дросселя.

Транзисторы и диоды выходят из строя даже при кратковременном превышении напряжения выше предельных значений. Поэтому крайне важно обеспечить быстродействующую защиту от перенапряжений. Перенапряжения возникают во время коммутационных процессов в самом инверторе, при обрывах дуги или могут приходиться из питающей сети. Перенапряжения сглаживаются с помощью демпфирующих цепочек, максимальное значение ограничивается стабилиторами [21]. Наиболее часто стабилиторами защищается затвор транзистора, так как из-за емкости между затвором и коллектором напряжение при коммутации может неконтролируемо возрасти. Стабилиторы увеличивают емкость цепи управления, что может вызвать высокочастотную генерацию. Существенно реже стабилиторы защищают выводы коллектор–эмиттер, хотя это повышает надежность. Достаточно часто RC цепочками и стабилиторами защищают диоды выпрямителя сварочного тока [4, 6, 12]. При подключении напряжения сети происходит заряд конденсаторов питания инвертора. Для предотвращения кратковременного увеличения тока, который может вывестись из строя диоды входного выпрямителя, последовательно включается резистор, который после заряда конденсаторов шунтируется контактами реле. Такая схема применяется практически во всех однофазных источниках питания.

Кроме перенапряжений, для транзистора опасно превышение тока, температуры, работа в активном режиме, высокочастотные генерации. Целесообразно возложить часть защиты от таких опасных воздействий на драйверы, которые могут быть выполнены в виде одной микросхемы или в гибридном исполнении. Последний тип отличается большими функциональными возможностями [29]. В одном корпусе микросхемы могут содержаться драйверы для управления верхним и нижним плечами инвертора. Для упрощения драйвер верхнего плеча питается от конденсатора, заряжаемого от источника питания нижнего драйвера при замкнутом нижнем транзисторе. Драйверы в гибридном исполнении часто имеют встроенный источник питания схемы верхнего плеча. Драйверы обеспечивают задержку между включениями транзисторов верхнего и нижнего плеча, устраняя сквозные токи. Для предотвращения работы транзисторов в активной области контролируется напряжение на транзисторе в открытом состоянии [30]. В драйвер может быть встроена защита от превышения током допустимого значения. В качестве датчика тока может быть использован шунт, включенный в цепь эмит-

тера нижнего транзистора или дополнительный вывод транзистора. Более совершенные драйверы различают мягкое и жесткое короткое замыкание. Мягкое замыкание происходит в нагрузке, соединенной с инвертором кабелем, имеющим индуктивность. Жесткое происходит внутри инвертора и намного опаснее. Драйверы определяют тип замыкания, изменяя при этом алгоритм отключения. Наиболее функционально полными являются драйверы с использованием цифровой технологии, обеспечивающие адаптацию под конкретные условия применения [31].

Инверторные источники питания дают возможность управлять плавлением и переносом электродного металла. Фирма «Lincoln Electric» разработала способ переноса металла при сварке в CO_2 силами поверхностного натяжения (Surface Tension Transfer). Основными его преимуществами являются уменьшение разбрызгивания, стабильность процесса сварки, меньшее количество дыма. В России похожее управление применяет «ТехноТрон» при сварке корневых швов трубопроводов [32]. Исследование переноса металла силами поверхностного натяжения проводилось ранее в Институте электросварки им. Е.О. Патона и Институте электродинамики НАН Украины [2, 3, 33].

Фирма «Fronius» разработала способ управления переносом металла с торговой маркой CMT (Cold Metal Transfer). Во время короткого замыкания проволока оттягивается назад, протекание тока прекращается, капля переходит в ванну без брызг. Уменьшается нагрев изделия и выделение вредных веществ. Подобные работы по ускорению перехода металла с помощью пульсирующей подачи проволоки проводили в Институте электросварки им. Е. О. Патона в 1970-е годы [34]. В CMT Advanced полярность напряжения на электроде изменяется во время короткого замыкания. Отрицательная полярность увеличивает скорость плавления электрода. На положительной полярности обеспечивается контролируемый прецизионный перенос металла. Соотношения между положительными и отрицательными полярностями определяются индивидуально [35].

Фирма «Lorch» объединила несколько алгоритмов управления под общей торговой маркой Speed — «Мастер скорости» [36]. По сравнению с обычной импульсно-дуговой сваркой SpeedPulse уменьшает диаметр каплей и увеличивает их количество. Перенос металла становится похожим на струйный. Увеличивается провар и производительность на 48 %. Технология SpeedArc предназначена для сварки металла толщиной до 15 мм в узкую разделку за один проход. Увеличенный вылет электрода способствует предварительному нагреву проволоки и повышению скорости плавления на 30 %. Подобные исследования систем автоматического управления при сварке с увели-



ченным вылетом были начаты в 1970-е годы [37, 38]. Для полуавтоматической сварки вертикальных швов применяют технологию SpeedUp. В горячей фазе горения дуги увеличенный ток расплавляет материал. В холодной стадии небольшой ток обеспечивает точное заполнение шва. Похожий способ приведен в работе [39]. Там же исследованы траектории движения держателя при полуавтоматической сварке вертикальных швов и предложены алгоритмы управления скоростью подачи, позволяющие еще больше снизить разбрызгивание и увеличить производительность. Технология SpeedRoot предназначена для сварки корня шва с зазором шириной до 8 мм методами MIG–MAG. Создаются управляемые колебания сварочной ванны в направлении электрода. Перенос капли в ванну происходит при коротком замыкании без тока в момент движения ванны от электрода, что уменьшает температуру металла.

Фирма «Kemppi» свои алгоритмы управления представляет под торговой маркой Wise. Полуавтоматическая и автоматическая сварка корня шва с зазором выполняется технологией WiseRoot с поперечными колебаниями электрода. Система управления контролирует объем ванны и периодически отключает подачу проволоки, давая время металлу остыть. Технология WiseThin позволяет сваривать металл толщиной до 0,6 мм.

В работе [40] показано, что колебания руки сварщика могут накладываться на скорость движения проволоки к поверхности изделия, увеличивая потери металла и ухудшая формирование шва. Стабилизировав реальную скорость подачи проволоки в дугу, можно снизить разбрызгивание. Особенно заметный эффект регулирования скорости подачи проволоки можно получить при сварке вертикальных швов. Такой способ управления пока не используется в серийном оборудовании.

Развитие систем автоматического управления сдерживается отсутствием углубленной информации о сварочном процессе. Как и много лет назад, основными сигналами обратных связей остались сварочный ток и напряжение. Напряжение на дуге удобно измерять в корпусе источника питания. Реально в этот сигнал входят падения напряжения на индуктивностях кабелей, подводящих ток от источника к дуге, падение напряжения в месте контакта проволоки с наконечником. При коротком замыкании в последней стадии разрушения перемычки падение напряжения не превышает нескольких вольт и его быстрые изменения заполняются помехами, имеющими близкий частотный спектр. Для эффективного управления сваркой необходимо знать мгновенные размеры капли и ванны, их температуру, состав выделяемого газа. Эту информацию можно было бы получить видеодатчиками. Высокая температура ду-

ги, разбрызгивание, портативность горелки и сложность системы управления препятствует их применению. Для системы управления необходимо знать скорость движения проволоки к дуге. Скорость подачи проволоки часто измеряют по ЭДС якоря двигателя. Погрешность такого измерения — десятки процентов. Реальная скорость движения проволоки в зону горения дуги еще больше отличается из-за упругих деформаций проволоки в шланге, периодических остановок в результате приваривания электрода к токоподводящему наконечнику, колебаний руки сварщика. Не зная главных параметров сварки, невозможно сделать хорошую систему управления.

В структурной схеме системы управления динамические характеристики инвертора можно представить звеном с чистым запаздыванием $T/2$, равным половине периода выходного напряжения. Микропроцессорную систему управления также можно представить звеном с чистым запаздыванием, значение которого зависит от алгоритма управления и быстродействия микропроцессора. Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения используют дроссель в сварочной цепи. Для хорошего сглаживания пульсаций тока постоянная времени сварочной цепи должна существенно превышать T . В системе управления используют обратные связи по току и напряжению, сигналы которых также должны фильтроваться с постоянными времени, намного превышающими T . Поэтому суммарное время звеньев с чистым запаздыванием и постоянных времени структурной схемы составляет единицы миллисекунд. Окончательная стадия разрыва перемычки между электродом и ванной проходит за единицы микросекунд [2, 33]. Хаотические движения капли на торце электрода при сварке в активных газах находятся в килогерцовом диапазоне частот. Поэтому современные источники не в состоянии реагировать на многие быстротекущие процессы в дуге.

Развитие транзисторных источников питания началось в 1950-е годы с появлением кристаллических триодов. В советский период было выполнено много разработок, опережавших свое время. Сейчас они внедряются в производство ведущими фирмами под различными торговыми марками. По мере развития элементной базы возможности источников питания будут расширяться. Перспективными направлениями улучшения являются увеличение надежности параллельного соединения транзисторов, расширение диапазонов мягкой коммутации транзисторов, надежная защита от всех, даже редко встречающихся аварийных случаев. Для обратных связей будут использоваться размеры капли и ванны, их температура, состав выхлопных газов дуги. Появятся алгоритмы управления для работы в мик-



росекундном диапазоне. Скорость подачи проволоки будет регулироваться в соответствии с колебаниями руки сварщика.

1. *Регулирование режимов механизированной сварки в CO₂ при использовании многопостовых источников тока* / Ю. И. Драбович, А. В. Лебедев, В. В. Кравченко и др. // Автомат. сварка. — 1987. — № 10. — С. 70–71.
2. *Лебедев А. В.* Исследование управляемого переноса металла при сварке в CO₂ // Там же. — 1991. — № 3. — С. 33–38.
3. *Транзисторный источник питания для дуговой сварки* / А. В. Лебедев, Н. П. Гриценко, И. В. Довбищенко и др. // Там же. — 1994. — № 9/10. — С. 50–51.
4. *Перспективная схематехника сварочных инверторов.* <http://radiohobby.org/modules/news/article.php>
5. *Петров С.* Перспективная схематехника сварочных инверторов // Совр. электроника. — 2009. — № 1. — С. 36–45.
6. *Негуляев В. Ю.* Сварочный инвертор — это просто. — Киев, 2005. — 42 с.
7. *Конев Ю. И.* Параллельное включение кристаллических триодов // Полупроводниковые приборы и их применение. — 1957. — Вып. 1. — С. 41–52.
8. *Проектирование мощных высоконадежных статических преобразователей* / А. С. Абрамов, В. Г. Вигдорчик, Г. М. Веденеев, Ю. И. Драбович // Устройства преобразования техники. — 1969. — Вып. 3. — С. 82–93.
9. *Лебедев А. В.* Выпрямление прямоугольного напряжения // Пробл. техн. электродинамики. — 1976. — № 57. — С. 66–69.
10. *Назаров В. И., Рыженко В. И.* Сварочный инвертор. — Рыбинск: Оникс, 2008. — 40 с.
11. *Володин В. Я.* Современные сварочные аппараты своими руками. — С.-Пб.: Наука и техника, 2008. — 304 с.
12. *Борисов Д. А.* Электрическая схема сварочного инвертора. <http://nanolife.info/svarochnoe-oborudovanie/>
13. *Петров С.* Схематехника промышленных сварочных инверторов // Совр. электроника. — 2007. — № 8. — С. 42–47.
14. *Parallel operation of dynex IGBT modules.* Application Note. AN5505-1.3 DYNEX SEMICONDUCTOR LTD. July 2002.
15. *Roccaro, R. Filippo, M. Salato.* AC TIG Welding: Output inverter design basics. APPLICATION NOTE. AN-1045. Intern. Rectifier. — 2/10/2003.
16. *International Rectifier.* IR AN-990 «Application characterization of IGBTs».
17. *Драбович Ю. И., Пономарев И. Г.* Исследование процессов в мостовой схеме инвертора при отказах транзисторов // Пробл. техн. электродинамики. — 1974. — № 45. — С. 56–62.
18. *Колтаков А.* Особенности параллельного соединения модулей IGBT // Компоненты и технологии. — 2005. — № 5. — С. 31–37.
19. *Колтаков А.* Подключение сигнальных цепей в мощных преобразовательных устройствах // Новости электроники. — 2008. — № 15. — С. 25–29.
20. *Симкин Я., Колтаков А.* Особенности применения силовых IGBT модулей фирмы Semikron // Электронные компоненты. — 2002. — № 6. — С. 18–16.

21. *Lebedev A. V.* Transistorized power sources for arc welding. — Harwood Acad. publ., 1998. — 180 p.
22. *Мелешин В. И.* Транзисторная преобразовательная техника. — М.: Техносфера, 2005. — 632 с.
23. *Лебедев А. В., Кравченко В. В.* Уменьшение коммутационных перенапряжений в импульсных преобразователях. М., 1986. — Деп. в ВИНТИ, 1986, №18734.
24. *Dudrik J., Dzurko P.* Arc welder with series-parallel resonant DC-DC converter. // Acta Technica CSAV.— 2006.— 51. — P. 415–426.
25. *Петров С.* Перспективы применения резонансных преобразователей в качестве источников сварочного тока // Совр. схематехника. — 2006. — № 7. — С. 16–23.
26. *Фельдшер И. Ф.* Компьютерное моделирование квазирезонансного инверторного источника питания для дуговой нагрузки // Математичні машини і системи. — 2007. — № 1. — С. 117–121.
27. *Horvath M., Borka J.* Up-to-date, integrated, multifunctional energy converters of welding technologies // Proc. of EPE-PEMC conf. 2006, Portoroz, Slovenia. — 2006. — Vol. 2–11. — P. 70–75.
28. *Leejn, Kim JJH., Kim S.S., Won CY., Kim Y.S., Choi S.* Harmonic reduction of CO₂ welding machine using single-switch, three-phase boost converter with six order harmonic injection PWM. IEEE ISJET01 Proc. — 2001. — 3. — P. 1526–1529.
29. *Крант Й.* Защитные функции современных драйверов IGBT // Силовая электроника. — 2010. — № 5. — С. 40–48.
30. *Никитин А.* Современные высоковольтные драйверы MOSFET- и IGBT-транзисторов // Новости электроники. — 2006. — № 6. — С. 23–31.
31. *Геммер Р., Квиз П., Венд М.* IGBT-драйверы с программно-управляемыми характеристиками // Силовая электроника. — 2010. — № 5. — С. 38–39.
32. *Создание многофункционального инверторного источника для сварки с управляемым переносом электродного металла* / О. Б. Гецкин и др. // Тяж. машиностроение. — 2009. — № 2. — С. 16–20.
33. *Патон Б. Е., Лебедев А. В.* Управление плавлением и переносом электродного металла при сварке в углекислом газе // Автомат. сварка. — 1988. — № 11. — С. 1–5.
34. *Управление процессом сварки программированием подачи проволоки* / Б. Е. Патон, Н. М. Воропай, В. Н. Бучинский и др. // Там же. — 1977. — № 1. — С. 1–5.
35. *Еще больше возможностей с CMT Advanced* // Weld+Vision. — 2009. — № 23.
36. *Принцип Качество.* Промышленная программа компании «Lorch». — Lorch Schweisstechnik GmbH, 2011.
37. *Лебедев А. В.* Структурная схема процесса саморегулирования дуги при переносе металла с короткими замыканиями // Автомат. сварка. — 1978. — № 5. — С. 7–12.
38. *Лебедев А. В.* Влияние тепловыделения в вылете электрода на процесс саморегулирования дуги // Там же. — 1978. — № 7. — С. 10–16.
39. *Лебедев А. В.* Управление скоростью подачи проволоки при механизированной сварке вертикальных швов // Там же. — 1986. — № 3. — С. 34–39.
40. *Лебедев А. В., Супрун С. А.* Эффективность стабилизации сварочного тока при полуавтоматической сварке // Там же. — 1978. — № 10. — С. 37–42.

The paper describes the most widely accepted schematics of electric arc transistor power sources. Features of parallel operation of transistors, methods of overvoltage protection and switching path formation, modern drivers, designs of high-frequency transformers, power correctors, systems of control of electrode metal melting and transfer are considered.

Поступила в редакцию 24.04.2012

ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТНОЙ СВАРКИ УЗЛОВ КОТЛОАГРЕГАТОВ БЕЗ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

А. К. ЦАРИЮК, канд. техн. наук, **В. Д. ИВАНЕНКО**, инж., **В. Ю. СКУЛЬСКИЙ**, д-р техн. наук,
С. И. МОРАВЕЦКИЙ, **А. Р. ГАВРИК**, **Г. Н. СТРИЖИУС**, **М. А. НИМКО**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
С. И. МАЗУР, **А. А. ТРОЙНЯК**, инженеры (Трипольская ТЭС, г. Украинка),
Ю. В. ОДИН, **О. В. ДЕРКАЧ**, инженеры (Кременчугская ТЭЦ, г. Кременчуг),
Р. И. КУРАН, инж. (ОАО «ЮТЭМ», г. Буча)

Рассмотрены вопросы ремонтной сварки поврежденных узлов котельного оборудования ТЭС и ТЭЦ из теплоустойчивых сталей систем Cr–Mo и Cr–Mo–V (коллекторы, трубы поверхностей нагрева, тройники, элементы паропроводов и др.), которые отработали сроки эксплуатации в жестких условиях (при высокой температуре и давлении), вызвавших повреждения в металле в основном в виде трещин. Для ремонта таких повреждений рекомендована технология с использованием ручной электродуговой сварки электродами (тип 06X1M) в комбинации с электродами типа 09X1MФ, предусматривающая применение предварительного и сопутствующего подогрева с последующим термическим отдыхом сварного соединения. Сварные соединения, выполненные по предложенной технологии, имеют высокую трещиностойкость и требуемые механические свойства. Данная технология прошла успешные испытания при ремонтной сварке узлов котельного оборудования.

Ключевые слова: ремонтная сварка, повреждения, теплоустойчивые стали, узлы котельного оборудования, электроды, предварительный подогрев, термический отдых, продление срока эксплуатации

Продление сроков эксплуатации энергетического оборудования на ТЭС и ТЭЦ, отработавшего парковый ресурс, возможно после технической диагностики и выявления эксплуатационных повреждений, а также исследования состояния металла (структура, свойства). Компоненты котельного оборудования (трубы поверхностей нагрева, пароперегреватели, коллекторы, тройники, элементы паропроводов и др.) изготавливают из теплоустойчивых хромомолибденовых (Cr–Mo) или хромомолибденованадиевых (Cr–Mo–V) сталей. Основные марки этих сталей в части использования при рабочих температурах, их химический состав и механические свойства приведены в табл. 1–3 [1, 2]. Основными легирующими элементами этих сталей являются хром, молибден и ванадий. Молибден как один из главных элементов, определяющих жаропрочность стали, находится в основном в твердом растворе. Он уменьшает диффузионную подвижность атомов и скорость движения дислокаций. Определенное количество молибдена позволяет получить оптимальное сочетание прочности и пластичности стали. При этом участие молибдена в образовании карбидов ограничено. В его присутствии формируются карбиды хрома и ванадия. Последний положительно влияет на повышение длительной прочности и предела ползучести благодаря образованию тер-

мически стойких карбидов. При изготовлении котельного оборудования и трубопроводов отечественных ТЭС стали системы Cr–Mo–V практически полностью вытеснили стали системы Cr–Mo в энергоблоках с рабочей температурой пара 545 °С. В то же время в процессе длительной работы при высокой температуре в котлоагрегатах, изготовленных из указанных сталей, образуются повреждения, обусловленные эксплуатационными, технологическими и конструкционными факторами [1, 3].

Наиболее характерными повреждениями в сварных соединениях теплоустойчивых сталей являются различного вида трещины. Основным способом ремонта поврежденных деталей и узлов котлоагрегатов является ремонтная сварка и восстановительная наплавка. Ремонт поврежденных деталей имеет определенные трудности, связанные с необходимостью проведения работ в производственных условиях электростанций. Поэтому разработка прогрессивных технологий сварки,

Таблица 1. Теплоустойчивые стали, используемые для бесшовных труб коллекторов и паропроводов при изготовлении котлоагрегатов

Марка стали	Стандарт		Граничная максимальная температура, °С
	Трубы	Сталь	
12MX	ТУ 14-3-610–75	ГОСТ 20072–74	530
15XM	ТУ 14-3-460–75	ТУ 14-3-460–75	550
12X1MФ			570
15X1M1Ф			570



Таблица 2. Химический состав теплоустойчивых сталей систем Cr–Mo и Cr–Mo–V, мас. %

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	S	P
							не более			
12MX	0,09...0,16	0,17...0,37	0,40...0,70	0,40...0,70	0,40...0,60	—	—	—	—	—
15XM	0,11...0,16	0,17...0,37	0,40...0,70	0,80...1,10	0,40...0,55	—	—	—	—	—
12X1MФ	0,08...0,15	0,17...0,37	0,40...0,70	0,90...1,20	0,25...0,35	0,15...0,30	0,25	0,20	0,025	0,025
15X1M1Ф	0,10...0,16	0,17...0,37	0,40...0,70	1,10...1,40	0,90...1,10	0,20...0,35	0,25	0,25	0,025	0,025

Таблица 3. Механические свойства труб из теплоустойчивых сталей при температуре 20 °С [1]

Марка стали	Термообработка	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	KCU , Дж/см ²
			не менее			
12MX	Норм. 910...930 °С + отп. 670...690 °С	≥ 410	235	21	45	60
15XM	Норм. 930...960 °С + отп. 680...730 °С	450...650	240	21	50	60
12X1MФ	Норм. 950...980 °С + отп. 720...750 °С	450...650	280	21	55	60

как основного способа ремонта энергетического оборудования, является важной и актуальной задачей для продления ресурса и надежной работы котлоагрегатов ТЭС [4].

Сварка теплоустойчивых сталей системы Cr–Mo–V, как правило, выполняется с применением предварительного и сопутствующего подогрева, а также последующей термической обработкой сварных соединений. Учитывая, что в условиях действующих ТЭС проведение термообработки отремонтированных деталей и узлов не всегда возможно, весьма перспективно применение способов сварки без последующей послесварочной термообработки. В связи с этим целью настоящей работы являлась разработка технологии ремонтной сварки без последующей термообработки, обеспечивающей высокую трещиностойкость и требуемые свойства сварных соединений узлов котлоагрегатов.

Одним из основных условий технологии ремонтной сварки являются мероприятия, предупреждающие образование холодных трещин в свар-

ных соединениях. Как известно [5, 6], образование холодных трещин (замедленное разрушение) обусловлено сочетанием трех факторов: образованием закалочных структур в зоне термического влияния (ЗТВ) или металле шва; содержанием диффузионного водорода и уровнем остаточных сварочных напряжений в сварном соединении.

Отсутствие закалочных структур в сварном соединении можно обеспечить выбором тепловых режимов и условий сварки. Как правило, это достигается применением предварительного и сопутствующего нагрева, при которых скорость охлаждения будет способствовать формированию структуры металла ЗТВ, устойчивой против образования трещин.

Характерной особенностью теплоустойчивых сталей перлитного класса является их большая чувствительность к скоростям охлаждения, начиная с температуры распада аустенита (A_{c3}). Поэтому в первую очередь было проанализировано влияние термического цикла сварки на структуру и свойства широко применяемой стали марки 12X1MФ (рис. 1) при различных условиях охлаждения. Из приведенной диаграммы видно, что при скорости охлаждения более 125 °С/с в температурном интервале 800...700 °С распад аустенита происходит в мартенситной области с образованием 100 % мартенсита. Уменьшение скорости охлаждения приводит к образованию структур промежуточного превращения — бейнита. При скорости охлаждения 16,5 °С/с уже образуется структура, которая на 30 % состоит из феррита и на 70 % из бейнита. Таким образом, за счет регулирования скорости охлаждения можно получить структуры, отличающиеся чувствительностью к замедленному разрушению и способствующие получению различных механических свойств металла [7]. Поэтому применение дополнительных мероприятий для регулирования про-

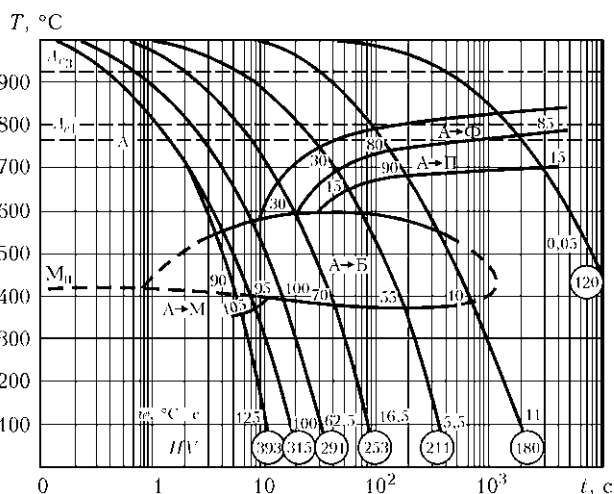


Рис. 1. Термокинетическая диаграмма превращения аустенита в стали 12X1MФ [3]

Таблица 4. Химический состав и механические свойства металла сварных соединений сталей системы Cr–Mo–V [3]

Марка электрода (тип)	Химический состав, мас. %						
	C	Si	Mn	S	P	Mo	Cr
ТМЛ-5 (Э-06Х1М) (для сварки корневых проходов)	Требования по НД (металл шва)						
	0,065	0,025...0,40	0,5...0,7	0,025	0,025	0,45...0,60	0,55...0,80
	Фактические значения (металл шва)						
	0,044**...0,05***	0,25...0,34	0,56...0,70	0,017...0,021	0,021...0,02	0,51...0,50	0,69...0,72
ТМЛ-3У (09Х1МФ) (для заполнения разделки)	Требования по НД (металл шва)						
	0,08...0,12	0,15...0,40	0,5...0,9	0,025	0,030	0,4...0,6	0,80...1,25
	Фактические значения (металл шва)						
	0,09	0,3	0,8	0,016	0,025	0,51	1,1

Окончание табл. 4

Марка электрода (тип)	Механические свойства при 20 °С, не менее				
	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
ТМЛ-5 (Э-06Х1М) (для сварки корневых проходов)	Требования по НД (металл шва)				
	550	350	18	60	88
	Фактические значения (металл шва)				
	580	430	20	69	130****
	Требования по НД (сварное соединение)				
500	—	—	40	—	
Фактические значения (сварное соединение)*					
490	—	16	—	78,5	
ТМЛ-3У (09Х1МФ) (для заполнения разделки)	Фактические значения (металл шва)				
	569	481	17	40	160

* Место разрушения — основной металл (12Х1МФ) в 6...8 мм от линии сплавления. ** Диаметр электродов 3,0 мм. *** Диаметр электродов 4,0 мм. ****61 Дж/см² при –20 °С, 40 Дж/см² при –40 °С.

цесса охлаждения зоны сварки в виде предварительного и сопутствующего подогрева или применения сварки, обеспечивающей автоподогрев соединения, позволяет формировать структуру металла, устойчивую против образования трещин.

Для получения требуемых свойств сварных соединений теплоустойчивых сталей при ремонте компонентов энергетического оборудования, работающего при температурах выше 540 °С, необходимо применять сварочные материалы, обеспечивающие химический состав и структуру металла шва, близкие к основному металлу [8]. Так, для ремонтной сварки литых деталей корпусного турбинного оборудования без последующей термообработки из сталей систем Cr–Mo и Cr–Mo–V рекомендованы и внедрены электроды ТМЛ-5 типа Э-06Х1М (ГОСТ 9467–75) [8–12]. Химический состав и механические свойства металла, напла-

вленного электродами марки ТМЛ-5, приведены в табл. 4. Эти электроды обеспечивают высокую трещиностойкость и оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств наплавленного металла сварных соединений хромомолибденовых сталей. Поэтому при ремонтной сварке соединений сталей системы Cr–Mo–V их также целесообразно использовать для сварки корневых швов и облицовки кромок, а дальнейшее заполнение разделки выполнять электродами марки ТМЛ-3У (тип 09Х1МФ).

Для оценки стойкости стали системы Cr–Mo–V против образования холодных трещин и определения необходимой температуры подогрева при ремонтной сварке электродами ТМЛ-3У были проведены исследования по методике Implant (метод вставок) [13]. Критерием трещиностойкости сварного соединения являлись максимальные (кри-

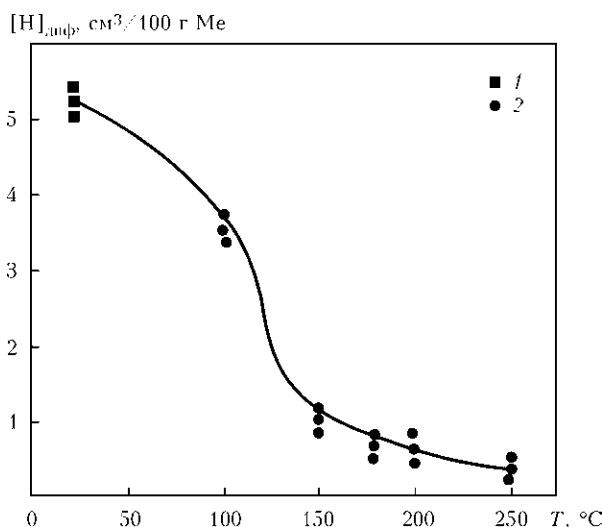


Рис. 2. Зависимость количества диффузионного водорода в наплавленном металле от температуры нагрева без отдыха (1) при отдыхе 10 мин (2)

тические) напряжения в образцах до начала разрушения. При этом серьезное внимание было уделено также исследованию влияния послесварочного нагрева (отдыха) на трещиностойкость сварных соединений. Предварительно было изучено влияние условий проведения отдыха на содержание диффузионного водорода $[H]_{\text{диф}}$ в наплавленном металле. Учитывая, что его содержание в металле, наплавленном стандартными электродами ТМЛ-3У, находится на сравнительно низком уровне (1,5...2,5 см³/100 г металла по спиртовой пробе), представляет интерес оценка влияния отдыха на содержание $[H]_{\text{диф}}$ более высокой исходной концентрации. В связи с этим были изготовлены опытные электроды ТМЛ-3У, в покрытие которых был специально введен мусковит, что обеспечивало повышенную концентрацию диффузионного водорода $[H]_{\text{диф}}$. После прокалки электродов при температуре 400 °С в течение 1,5 ч концентрация $[H]_{\text{диф}}$ в наплавленном металле составляла 5,3 см³/100 г металла по спиртовой пробе. Выдержка этих образцов наплавленного металла в течение 10 мин при различных температурах отдыха существенно снижает содержание диффузионного водорода (рис. 2). При термическом отдыхе при температуре 250 °С концентрация $[H]_{\text{диф}}$ находится на уровне 0,5 см³/100 г металла, что способствует повышению трещиностойкости сварных соединений. Для оценки влияния отдыха на трещиностойкость при испытании по методу вставок после приварки образца к пластине выполняли нагрев опытного соединения с помощью электронагревателя сопротивления. Температуру контролировали хромель-алюмелевыми термопарами в приваренном состоянии. Под нагрузкой образцы выдерживали до 24 ч. Испытания выполняли по этапам. Сначала испытывали соединения, сваренные без предварительного подогрева, для

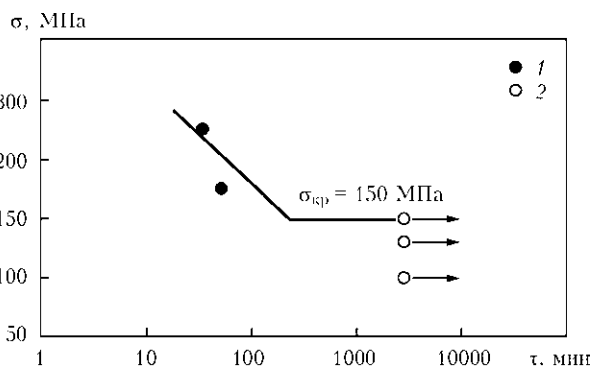


Рис. 3. Влияние напряжений на склонность сварных соединений стали 12Х1МФ к замедленному разрушению (1) и без разрушений (2)

оценки уровня критических напряжений, превышение которых вызывает развитие замедленного разрушения. Далее выполняли цикл испытаний с применением термического отдыха в условиях нагружающего напряжения, которое превышало критическое с целью подтверждения эффективности данной операции и установления параметров режима отдыха, необходимого для обеспечения стойкости против замедленного разрушения.

На рис. 3 представлены результаты испытаний сварных соединений без подогрева и дальнейшего термического отдыха. Проведенные исследования позволили установить, что критический уровень напряжений составляет примерно 150 МПа. Результаты изучения влияния послесварочного отдыха показали, что нагружающее напряжение 200 МПа из закритической области не вызывает развития разрушений в результате ослабленного влияния водородного фактора (рис. 2). Поэтому для иницирования разрушения дальнейшие исследования проводили под нагрузкой, соответствующей напряжению 400 МПа. Такое напряжение способствует разрушению. По полученным данным была построена обобщающая зависимость (рис. 4), которая устанавливает соответствие между температурой и продолжительностью отдыха, необходимого для обеспечения стойкости против замедленного разрушения. Данная зависимость может служить основой для выбора режима термического отдыха.

Таким образом, полученные результаты подтверждают высокую эффективность послесварочного отдыха для обеспечения стойкости сварных соединений против замедленного разрушения. При этом не наблюдаются фазовые превращения, но создаются благоприятные условия для удаления диффузионного водорода из зоны сварки [14, 15].

Поскольку уровень остаточных сварочных напряжений является одним из составных факторов, определяющих трещиностойкость сварных соединений, были проведены исследования влияния температуры послесварочного нагрева (отдыха и термической обработки) на степень ре-

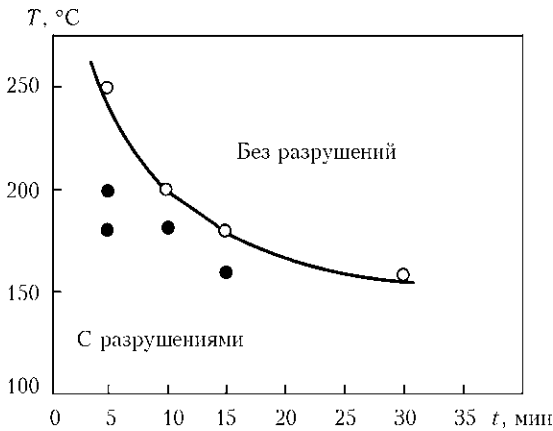


Рис. 4. Влияние температуры и продолжительности термического отдыха на склонность сварных соединений стали 12X1MF к замедленному разрушению при нагружающем напряжении $\sigma = 400$ МПа

лаксации напряжений. Исследования проводили в соответствии с методикой, предложенной НПО «ЦКТИ» им. И. И. Ползунова [16]. Образец сварного соединения из стали 12X1MF размером $12 \times 14 \times 210$ мм устанавливали на опору специального приспособления, изготовленного из жаропрочного никелевого сплава, и нагружали до заданного напряжения на участке чистого изгиба (рис. 5). Напряжение измеряли в зависимости от прогиба f с помощью индикатора, крепящегося на съемной пластине. После нагружения и измерения упругого прогиба приспособление вместе с нагруженным образцом на определенное время помещали в печь, нагретую до заданной температуры. После выдержки в печи образцы охлаждали до комнатной температуры и на них повторно измеряли прогиб f . По разнице прогибов подсчитывали пластические деформации в образцах и релаксацию напряжений в зависимости от времени пребывания в печи при заданной темпе-

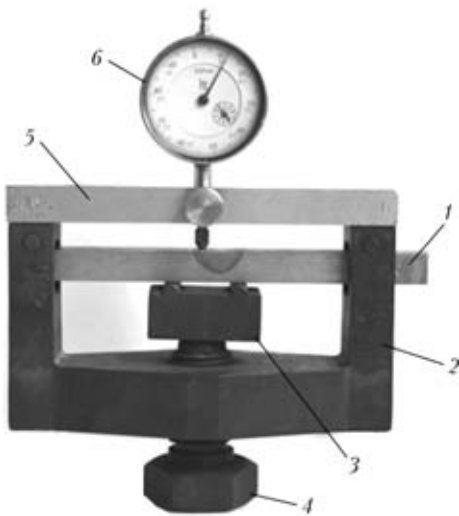


Рис. 5. Схема приспособления для нагружения образца при релаксационных испытаниях: 1 — образец; 2 — сварная станина; 3 — опора; 4 — нагружающий винт; 5 — съемная пластина для крепления индикатора; 6 — индикатор

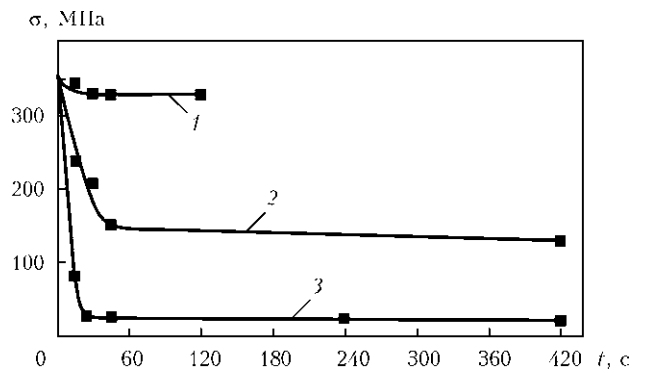


Рис. 6. Зависимость релаксации напряжений в образцах сварных соединений от температуры (1 — $T = 250$; 2 — 545 ; 3 — 750 °C) и времени выдержки

ратуре и заданной нагрузке. Результаты исследования приведены на рис. 6 и 7. Установлено, что термический отдых исследуемых образцов независимо от времени выдержки при температуре $250 \dots 350$ °C практически не оказывает влияния на релаксацию напряжений. Однако при температуре эксплуатации 545 °C в сварных соединениях падение напряжения может снижаться до уровня ниже 150 МПа. Такая склонность сварных соединений сталей системы Cr–Mo–V к релаксации при температуре эксплуатации дает реальную возможность в случае сложности проведения послесварочного высокого отпуска ($730 \dots 750$ °C) применять только термический отдых. Дальнейшая эксплуатация котлоагрегата при рабочей температуре 545 °C способствует значительному снятию остаточных сварочных напряжений. Однако релаксация остаточных напряжений при температуре эксплуатации значительно ниже, чем после высокого отпуска (рис. 6). Поэтому отремонтированные узлы котлоагрегатов без последующего высокого отпуска могут работать с ограниченным ресурсом. После проведения очередного обследования и технической диагностики принимается решение о дальнейшей эксплуатации.

Результаты выполненных исследований позволили рассмотреть вопрос о возможности выполнения ремонтной сварки без последующей термообработки при заварке повреждений на деталях котлоагрегатов по месту эксплуатации. Объектом

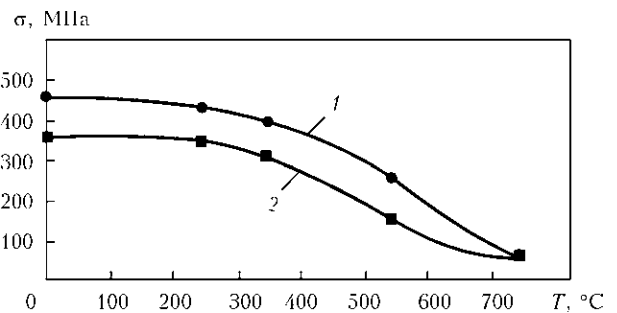


Рис. 7. Зависимость релаксации напряжений от температуры при кратковременной нагрузке ($\sigma = 0,8\sigma_T$) (1) и термическом отдыхе 60 мин при $\sigma = 0,8\sigma_T$ (2)

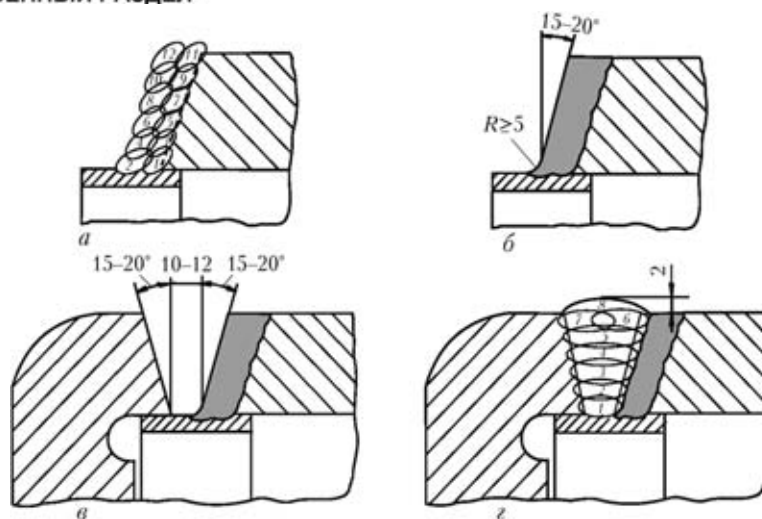


Рис. 8. Схема последовательности выполнения ремонта коллектора: *a* — предварительная многослойная наплавка торца коллектора кольцевыми валиками с последовательным их выполнением; *б* — форма разделки после механической обработки предварительной наплавки; *в* — сборка под сварку стыка доньшка с коллектором; *г* — заполнение разделки многопроходной сваркой

ремонта по предложенной технологии сварки был выбран коллектор подогревателя из стали 12Х1МФ с наружным диаметром 273 мм и толщиной стенки 36 мм. Повреждение в виде кольцевой трещины образовалось от концентратора напряжений (в углу корневого шва на подкладном кольце) и распространилось вверх по шву и зоне крупного зерна ЗТВ до выхода наружу. Для принятия технического решения о возможности проведения ремонтной сварки без последующей термообработки предварительно была выполнена аттестация предложенной технологии. Аттестационные испытания [17] проводили на модели коллектора с натурной толщиной стенки. После проведения механической обработки торца коллектора под предварительную наплавку кромки выполнен контроль методом МПД на отсутствие трещин. Подкладное кольцо было прихвачено с наружной стороны к кромке торца с подогревом 250...300 °С. Предварительную двухслойную наплавку на торец коллектора (рис. 8, *a*) выполняли с подогревом 250...300 °С многослойным способом кольцевыми валиками толщиной 4...5 мм и шириной 15...20 мм электродами типа Э-06Х1М (ТМЛ-5). Первый слой выполнен электродами диаметром 3,0 мм ($I_{св} = 90...110$ А), второй слой — электродами диаметром 4 мм ($I_{св} = 120...160$ А). После этого поверхность наплавки подвергали обработке абразивным инструментом до получения необходимого размера и формы кромки (рис. 8, *б*) с оценкой качества методами ВИК, УЗД, МПД и измерением твердости. Затем производили сборку стыка коллектора с доньшком (рис. 8, *в*) на подкладном кольце.

Подогрев при сборке и сварке коллектора с доньшком составлял 250...300 °С. Первые два корневых шва сваривали электродами ТМЛ-5 диаметром 3,0 мм ($I_{св} = 90...120$ А), которые в ре-

зультате пониженного содержания углерода и хрома, а также отсутствия ванадия позволяют получить более пластичный наплавленный металл. Это предотвращает вероятность образования надрывов в корне шва и обеспечивает высокую трещиностойкость сварных соединений. Дальнейшее заполнение разделки (рис. 8, *г*) выполняли электродами ТМЛ-3У диаметром 4,0 мм ($I_{св} = 130...180$ А). Сразу же после сварки для эвакуации диффузионно-подвижного водорода и повышения трещиностойкости производили полный термический отдых сварного соединения при 250 °С в течение 2,5 ч. После термического отдыха производили медленное охлаждение зоны ремонтной сварки до температуры 50...70 °С за счет укутывания места ремонта асбестовой тканью. Далее наружную поверхность кольцевого шва обрабатывали механическим способом до получения требуемой формы соединения (рис. 8, *г*). Заключительной операцией был неразрушающий контроль качества. Качество ремонта оценивали визуальным контролем, ультразвуковым контролем и травлением поверхности 15 % раствором азотной кислоты для выявления поверхностных дефектов. Проведенный контроль качества аттестационного стыка не выявил каких-либо дефектов в сварном соединении.

Исследования механических свойств показали, что предел прочности сварного соединения при испытаниях образцов на растяжение находится в пределах 490...560 МПа, а ударная вязкость наплавленного металла составляет 120...160 Дж/см², что соответствует требованиям к основному металлу этой стали ($\sigma_B = 440...588$ МПа и $a_n \geq 98$ Дж/см²).

Проведенные металлографические исследования макро- и микроструктуры установили отсутствие дефектов в металле шва и ЗТВ. Твердость металла шва составляет *HV* 180 при допустимых

значениях снижения для стали 12Х1МФ средней твердости до *HВ* 140 и повышении не более *HВ* 270.

Таким образом, проведенные аттестационные испытания ремонтной заварки на коллекторе из стали 12Х1МФ по разработанной технологии показали положительные результаты. Это позволило принять техническое решение и рекомендовать предложенную технологию ремонтной сварки для коллектора из стали 12Х1МФ.

Выводы

1. Исследована свариваемость и разработана технология ремонтной сварки типичной теплоустойчивой стали 12Х1МФ, широко применяемой при изготовлении котлоагрегатов ТЭС и ТЭЦ.

2. Для ремонта поврежденных узлов и деталей котлоагрегатов из теплоустойчивых сталей в случае невозможности проведения высокого отпуска на действующих ТЭЦ и ТЭС можно использовать предварительный и сопутствующий подогрев совместно с послесварочным низкотемпературным отпуском. Дальнейшая эксплуатация при рабочей температуре 545 °С способствует снижению остаточных сварочных напряжений (до уровня порядка 150 МПа), что позволяет продлить ресурс отремонтированного котлоагрегата на ограниченный срок до очередного обследования.

1. Хромченко Ф. А. Ресурс сварных соединений паропроводов. — М.: Машиностроение, 2002. — 352 с.
2. Мелехов Р. К., Похмурский В. І. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. — Киев: Наук. думка, 2003. — 373 с.
3. Анохов А. Е., Корольков П. М. Сварка и термическая обработка корпусного энергетического оборудования при ремонте. — Киев: Екологія, 2003. — 88 с.

4. Анохов А. Е., Хромченко Ф. А., Федина И. В. Новая технология ремонтной сварки литых деталей из хромомолибденовых сталей без термической обработки // Свароч. пр-во. — 1986. — № 10. — С. 15–17.
5. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 247 с.
6. Шоршоров М. Х., Чернышева Т. А., Красовский А. И. Испытания металлов на свариваемость. — М.: Металлургия, 1972. — 240 с.
7. Шоршоров М. Х., Белов В. В. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке. — М.: Наука, 1972. — 219 с.
8. Хромченко Ф. А. Сварочные технологии при ремонтных работах. — М.: Интермет Инжиниринг, 2005. — 368 с.
9. РД 108.021. 112–88. Исправление дефектов в литых корпусных деталях турбин и арматуры методами заварки без термической обработки. — М., 1988. — 15 с.
10. Анохов А. Е., Ганиев Ф. Б., Корольков П. М. Совершенствование технологии ремонтной сварки и термообработки — основа продления ресурса паровых турбин // Монтаж и спец. работы в стр-ве. — 2003. — № 7. — С. 7–11.
11. Анохов А. Е., Корольков П. М. Сварка и термическая обработка в энергетике. — Киев: Екологія, 2006. — 319 с.
12. Ремонтная сварка корпусных деталей турбин из теплоустойчивых сталей без последующей термообработки / А. К. Царюк, В. Д. Иваненко, В. В. Волков и др. // Автомат. сварка. — 2009. — № 12. — С. 41–46.
13. Касаткин Б. С., Бреднев В. И., Волков В. В. Методика исследования кинетики деформаций при замедленном разрушении // Там же. — 1981. — № 11. — С. 13.
14. Козлов Р. А. Водород при сварке корпусных сталей. — Л.: Судостроение, 1969. — 175 с.
15. Козлов Р. А. Сварка теплоустойчивых сталей. — Л.: Машиностроение, 1986. — 160 с.
16. Демянцевиц С. В., Земзин В. Н. Методика оценки склонности сварных соединений к образованию трещин при термической обработке // Тр. ЦКТИ. — 1979. — № 169. — С. 22–27.
17. РТМ-1с-89. (РД 34 15.027–89). Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте оборудования электростанций. — М.: Энергоиздат, 1989. — 208 с.

The paper considers repair welding of the damaged assemblies of boiler equipment at heat electric power stations and heat power plants, made from heat-resistant steels of the Cr–Mo and Cr–Mo–V compositions (collectors, heating surface pipes, T-joints, steam piping elements etc.), which exhausted their life under severe service conditions (at high temperature and pressure) that caused damages in metal mainly in the form of cracks. The technology recommended for repair of such damages involves manual arc welding using the 06Kh1M alloying type electrodes combined with the 09Kh1MF alloying type electrodes. It includes for the use of preliminary and concurrent heating with subsequent thermal recovery of a welded joint. Welded joints made by the suggested technology have high crack resistance and required mechanical properties. The technology successfully passed the tests in repair welding of boiler equipment assemblies.

Поступила в редакцию 13.06.2012



СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ НАПЛАВКИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ И УБОРОЧНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН (ОБЗОР)

В. С. СЕНЧИШИН, инж., Ч. В. ПУЛЬКА, д-р техн. наук (Терноп. нац. техн. ун-т им. И. Пулюя)

Показано, что для плоских деталей сельскохозяйственных машин с толщиной стенки (ОМ) 2...6 мм и толщиной наплавленного металла (НМ) 0,8...2,0 мм наиболее перспективно применение индукционной наплавки. В этом случае обеспечивается минимальное перемешивание ОМ и НМ, минимальные затраты на оборудование, возможность механизации и автоматизации.

Ключевые слова: методы наплавки, электроконтактное упрочнение, рабочие органы сельхозмашин, тонкие детали, индукционная наплавка, автоматизация

В сельском хозяйстве широко используются тонкие плоские детали в виде рабочих органов почвообрабатывающих и уборочных машин, а именно: лемеха плугов, лапы культиваторов, диски лущильников, ножи-ботворезы и другие, которые работают в условиях абразивного износа и значительных статических и динамических нагрузок. Эти детали должны иметь высокую прочность и износостойкость [1–4], однако в процессе работы происходит непрерывное взаимодействие металла с почвой и растениями, что, в свою очередь, ведет к затуплению лезвия. Для обеспечения режущих свойств в процессе эксплуатации рабочие органы должны подвергаться самозатачиванию. Наилучшим образом этим условиям соответствуют биметаллические (двухслойные) рабочие детали, прочность которых обеспечивается основным материалом, из которого изготовлен рабочий орган, а износостойкость и самозатачивание — плакирующим слоем, нанесенным на основной металл. Самозатачивание зависит от соотношения толщи-

ны и износостойкости основного и плакирующего слоев [5]:

$$\omega = \frac{\varepsilon_2 h_2}{\varepsilon_1 h_1},$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — устойчивость соответственно основного и плакирующего слоев; h_1, h_2 — толщина соответственно основного и плакирующих слоев.

Наилучшее самозатачивание обеспечивается при $\omega = 1,5$.

Для упрочнения рабочих органов применяют различные способы наплавки: электроконтактную, плазменную, электродуговую, плакирование взрывом, индукционную и другие методы упрочнения [4, 6–11].

Известен способ наплавки рабочих органов сельскохозяйственных машин с использованием электроконтактного упрочнения [4, 6, 12, 13]. При этом способе присадочным материалом могут быть порошки, проволоки и ленты. Суть технологии заключается в нанесении на поверхность детали слоя порошкообразного износостойкого твердого материала (шихты), ленты и проволоки

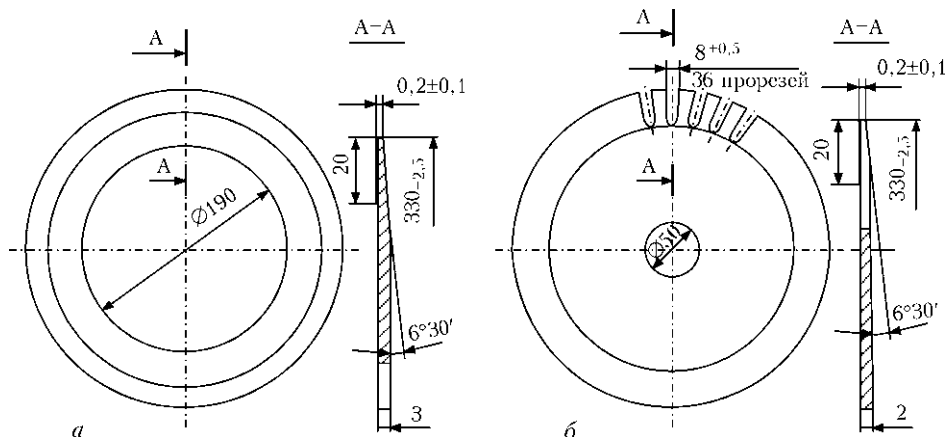


Рис. 1. Схема конструкции дисковых ножей [12]: а — неприводной; б — приводной



Рис. 2. Общий вид установки для приварки ленты к диску луцильника на базе модернизированной машины МШПР-300/1200 [1]

с последующим их нагревом до температуры, при которой происходит их спекание и образование прочной диффузионной связи с деталью. Данная технология применяется при упрочнении дисковых ножей почвообрабатывающих машин, которые должны иметь износостойкую режущую кромку и самозатачиваться в процессе эксплуатации.

На рис. 1 приведены дисковые ножи, наплавленные порошкообразным твердым сплавом электроконтактным способом, а на рис. 2 — установка для приварки ленты к диску луцильника [1, 12].

В работе [13] предложен технологический процесс электроконтактной наплавки лемеха порошковой проволокой сегментного поперечного сечения. В этом случае процесс наплавки порошковой проволокой протекает в две стадии: холодное уплотнение порошкового сердечника и, как следствие, деформация присадочных материалов в зоне контакта с деталью; сам процесс наплавки, при котором обеспечивается нагрев порошковой проволоки на вершине сегмента, в зоне интенсивного тепловыделения, распространение деформации на периферийные зоны, плавление и приварка оболочки к основанию с одновременным спеканием порошкового сердечника. На рис. 3 представлен наплавленный лемех по указанной выше технологии.

Преимуществами данного способа является отсутствие проплавления основного металла, минимальные деформации наплавленных деталей, возможность наплавки слоев малой толщины, большая скорость нагрева, которая может достигать нескольких тысяч градусов в секунду. Недостатками является низкая производительность процесса, отсутствие в серийном производстве оборудования и нестабильное качество наплавленного металла, а также сложность изготовления порошковой проволоки сегментного сечения.

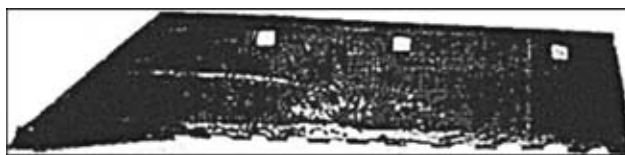


Рис. 3. Общий вид наплавленного лемеха [13]

Для получения биметаллических рабочих органов, а именно дисков луцильников, предлагается применять способ электроконтактного плакирования устойчивой к износу лентой [14]. Для обеспечения заданной прочности и упругости дисковые ножи перед плакированием подвергаются объемной закалке и отпуску. Окалина, которая образовалась в процессе прокатки и термообработки, удаляется травлением в 20%-м растворе серной кислоты с добавлением 1%-го ингибитора ОП-1, подогретого до температуры 70 °С. После травления, промывки и сушки диск считается пригодным к плакированию лентой. Основными недостатками этого способа являются большая трудоемкость подготовительных работ, сложности изготовления ленты из высокостойких к износу сплавов, невысокая прочность сварных слоев.

Для упрочнения рабочих поверхностей различных плоских деталей, в том числе рабочих органов почвообрабатывающих машин, используют методы плакирования взрывом и прокаткой [15]. К преимуществам плакирования взрывом относят высокую скорость процесса, возможность получения соединения металлов, которые другими способами получить невозможно или сложно; относительную простоту технологии (отсутствие необходимости применения сложного оборудования) [15]. В Чехии технологию наплавки взрывом использовали при производстве биметаллических ножей и других плоских деталей. По сравнению с традиционным металлургическим способом литейного плакирования применение наплавки взрывом технически и экономически обосновано.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан и опробован способ получения устойчивого к износу биметалла при прокатке пакетов с порошком ПГ-С1 [16], который базируется на принципе автовакуумной сварки давлением. В работе [17] этот способ был применен для получения инструментального биметалла с плакирующим слоем порошка ПР 10Р6М5. Основным недостатком способа является составление пакета больших размеров, связанное с необходимостью уплотнения порошка для создания минимального объема воздуха в полости пакета, что устраняется с помощью предварительного прессования порошка. В работе [18] показано, что при получении биметаллического профиля для рабочих органов почвообрабатывающих машин порошок плакирующего слоя ПГ-С1 предварительно компактировали методом горячего газостатического прессования, однако про-

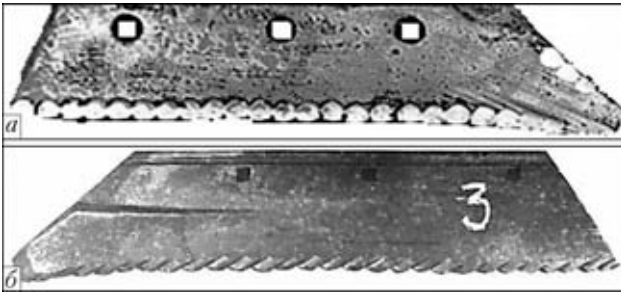


Рис. 4. Общий вид напавленного лемеха до (а) и после эксплуатации (б) [22]

мышленному использованию этой технологии препятствует сложность и высокая трудоемкость.

В работах [7, 8, 19–21] описана технология плазменной наплавки, которую применяют при изготовлении многолезвийных металлорежущих инструментов (концевых фрез и т. п.), а также режущих кромок дисковых и плоских ножей различного назначения. В качестве материалов для наплавки используют порошки быстрорежущих сталей, а также сплавов, содержащих ванадий. Этот процесс наплавки позволяет сравнительно легко регулировать энергетические, тепловые и газодинамические параметры струи плазмы в широких диапазонах, что в результате позволяет получить напавленный слой с заданными физико-химическими и механическими свойствами.

Разработана технология плазменно-порошковой наплавки ножей бумагорезательных машин. Устойчивость серийных ножей без наплавки определяется временем их изнашивания, зависящего от прочности, твердости, механических свойств и некоторыми другими характеристиками стали [7, 8, 20]. Заготовка под наплавку имеет разделку, которая позволяет практически исключить деформацию после наплавки и краевой эффект, возникающий при наплавке на кромку. Бумагорезательные ножи наплавляли плазменно-порошковым методом для нескольких типов сталей и сплавов. После наплавки заготовки подвергают двухразовому отпуску при температуре 540...560 °С, резке, правке и конечной механической обработке.

Преимуществами плазменно-порошковой наплавки является незначительное проплавление основного металла, высокое качество напавленного слоя, возможность наплавки тонких слоев

(1...5 мм) с использованием широкой гаммы присадочных материалов. К недостаткам следует отнести относительно низкую производительность и необходимость сложного и дорогостоящего оборудования, а также высокие требования к гранулометрическому составу и форме гранул порошков, что приводит к ее значительному удорожанию, а это ограничивает применение данного способа.

Для повышения эксплуатационных характеристик рабочих органов почвообрабатывающих машин (ножей-ботворезов, лап культиваторов, лемехов плугов и других деталей) Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины предложено точечное упрочнение с помощью дуговой наплавки порошковой проволокой ПП-АН170 [22]. Высота упрочняющей точки составляет 1...3 мм, а глубина проплавления основного металла 2...4 мм. Наплавка осуществляется на обратной полярности. Глубина проплавления при точечном упрочнении регулируется изменением силы тока, напряжения и времени горения дуги. На рис. 4 показан общий вид напавленного порошковой проволокой лемеха плуга до и после эксплуатации. Недостатком данного способа являются большие трудовые и материальные затраты на изготовление деталей.

В работах [10, 23–25] предложена технология упрочнения рабочих поверхностей культиваторных лап способом локального упрочнения. Суть данного метода заключается в том, что на внешнюю поверхность лапы наносят валики с помощью дуговой наплавки с шагом 40 мм под углом наклона 25° к лезвию лапы. Общий вид упрочненной лапы показан на рис. 5. Недостатком данного способа являются большие трудовые затраты и неравномерность нанесения валиков, зависящая от квалификации сварщика.

Известна также технология повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин науглероживанием поверхностного слоя угольным электродом [26]. Суть способа заключается в том, что при контакте угольного электрода с деталью в результате искрового разряда углерод электрода переходит в основной металл, образуя на его поверхности слой цементита, твердость которого значительно выше основного металла. Этот



Рис. 5. Общий вид лапы после локального упрочнения [10]

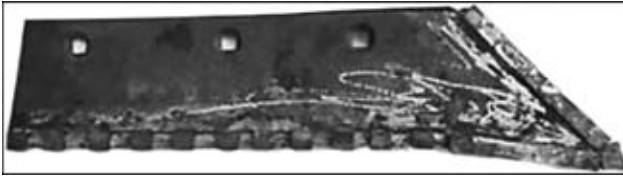


Рис. 6. Общий вид упрочненного лемеха металлокерамическими пластинами [11]

способ не нашел широкого применения в связи со сложностью технологического процесса.

В работах [11, 27] предложена технология восстановления и упрочнения лемехов плугов с помощью припайки металлокерамических пластин. Суть данного способа заключается в том, что с лицевой стороны лезвия лемеха припаивают твердосплавные пластины сплошного и прерывистого характера расположения. Для осуществления процесса фрезеруют паз глубиной 1,5...2,0 мм, затем в него закладывают припой Л63, на который позже накладывают металлокерамические пластины Т15К6 или ВК8. Нагрев припоя осуществляют газопламенным способом, после припайки лемех помещают в термоизоляционную емкость, нагретую до температуры 620 °С, вместе с которой он остывает до комнатной температуры (рис. 6).

Основным преимуществом упрочнения рабочих органов металлокерамическими пластинами является снижение тягового сопротивления, позволяющее повысить рабочую скорость машины и тем самым производительность вспашки.

Недостатком данного способа являются большие материальные и трудовые затраты, связанные с технологией изготовления деталей.

Разработаны и другие способы упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин. К ним относятся наплавка с помощью электронного ускорителя [28], лазерная наплавка [29–31] и др. Однако из-за сложности технологии и отсутствия оборудования, его несовершенства и высокой стоимости эти процессы пока не нашли промышленного применения.

Для упрочнения тонких плоских деталей, в том числе рабочих органов деталей сельскохозяйственных машин, широко используют индукционный способ наплавки. В работах [32–34] предложена технология одновременной индукционной наплавки тонких фасонных дисков по всей рабочей поверхности. Для наплавки используют специальную шихту, состоящую из смеси износостойкого порошкообразного твердого сплава и флюса. Шихту наносят на поверхность детали в виде слоя необходимой толщины (рис. 7). После этого деталь вводят в индуктор (рис. 8), источником питания которого является высокочастотный генератор. При прохождении токов высокой частоты через индуктор в поверхностных слоях детали, подлежащей наплавке, наводятся вихревые токи, которые разогревают деталь, а от ее

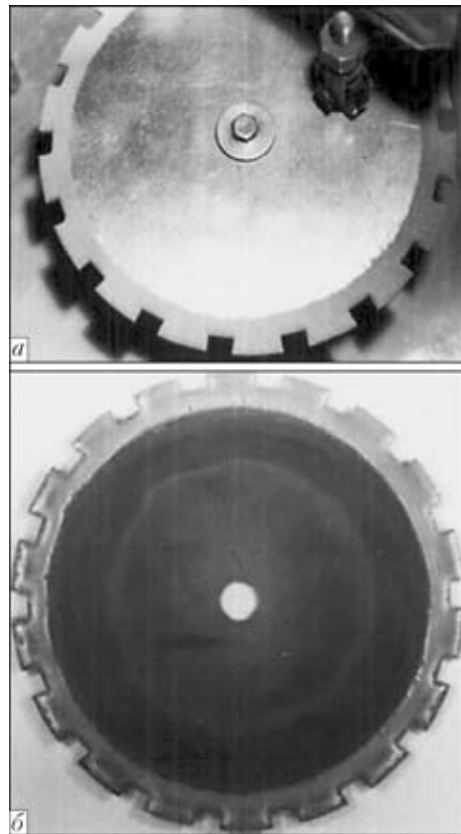


Рис. 7. Устройство для засыпки шихты (а) и наплавленный диск (б) [34]

поверхности плавится шихта [32]. К достоинствам способа относятся: возможность наплавки тонких слоев, высокая производительность, возможность механизации и автоматизации процесса. Недостатками являются высокая энергоемкость, перегрев основного металла, присадочные материалы должны быть более легкоплавкими, чем основной металл. Несмотря на отмеченное выше, на предприятиях, выпускающих сельскохозяйственную технику, плуги, лушительники, лапы культиваторов и др., этот способ является наиболее распространенным [32].

Для улучшения условий труда и повышения производительности процесса индукционной наплавки тонких плоских деталей, в том числе долот и лап культиваторов авторами разработаны полуавтоматические установки и автоматические линии [33]. Для наплавки культиваторных ножей, имеющих криволинейную режущую поверхность, применяют установки карусельного типа, на которых можно наплавлять долотообразные лемехи. Основными недостатками этих линий и установок является невысокая производительность непосредственно самого процесса наплавки, а также низкий уровень механизации на позициях загрузки заготовок, засыпки шихты и разгрузки.

С целью повышения производительности процесса индукционной наплавки тонких фасонных дисков — ножей-ботворезов свеклоуборочных машин непрерывно-последовательным и одновре-

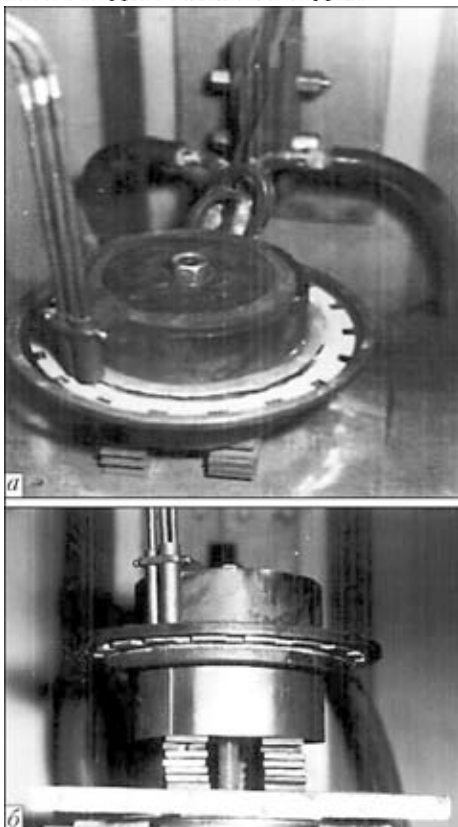


Рис. 8. Устройство для наплавки диска в двухвитковом кольцевом индукторе [34]: а — вид сверху; б — сбоку

менными способами наплавки разработаны и внедрены в производство поточные линии [32], которые позволяют механизировать и автоматизировать процесс, включая загрузку и разгрузку заготовок, перемещение их в роторном устройстве, установление их на позициях засыпки шихты, наплавки и снятие их после наплавки.

Процесс совершенствования индукционной наплавки тонких плоских деталей осуществляют в следующих направлениях: повышение износостойкости наплавленного слоя металла, оптимизация режимов нагрева с целью экономии электроэнергии, а также конструктивных параметров индукторов и нагревательных систем для наплавки дисков произвольных диаметров и размеров зоны наплавки исходя из потребностей технологии, без учета экранирования электромагнитных полей и с учетом только электромагнитного экранирования, а также комбинированного экранирования одновременно электромагнитных и тепловых полей; математическое моделирование процесса наплавки для определения остаточных напряжений, деформаций и перемещений деталей; механизация и автоматизация процессов наплавки с учетом экологичности процесса и защиты человека от воздействия электромагнитных и тепловых полей [32].

Для повышения износостойкости наплавленного металла деталей почвообрабатывающих машин в работах [35–39] предложено использовать вибрацию деталей после наплавки. Суть данного

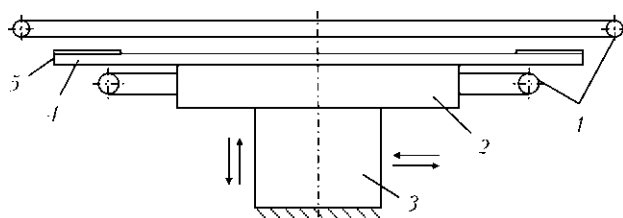


Рис. 9. Схема индукционной наплавки тонких плоских деталей с приложением вибрации в процессе наплавки: 1 — индуктор; 2 — стол; 3 — вибратор (стрелками показано направление приложения колебаний); 4 — деталь; 5 — порошкообразный твердый сплав

метода заключается в том, что на наплавленный слой последовательно наносят большое количество микроударов с соответствующей частотой и амплитудой 0,5 мм в течение 20 с, вызванных действием колебаний обрабатывающего инструмента. Основными преимуществами при использовании данной технологии является создание равномерной и более мелкозернистой структуры наплавленного слоя, за счет чего повышается твердость наплавленного металла на 25 %. К недостаткам данного способа следует отнести большие трудовые и материальные затраты, связанные с использованием дополнительных технологических операций после наплавки.

В работах [40–42] описана технология виброобработки сварных соединений нефтегазового оборудования. Эта технология позволяет снизить уровень остаточных напряжений и деформаций, возникающих после сварки. Однако она не нашла широкого распространения из-за сложности технологического процесса и оборудования.

Для дальнейшего усовершенствования технологии индукционной наплавки применяют наплавку с использованием горизонтальной и вертикальной вибрации для повышения износостойкости и уменьшения деформации тонких плоских деталей, которая заключается в том, что вибрацию с определенной частотой и амплитудой (рис. 9) вводят тогда, когда порошкообразный износостойкий твердый сплав начинает плавиться и сохраняют ее до полного его расплавления и кристаллизации [43]. Износостойкость и уменьшение деформаций достигается за счет образования мелкозернистой структуры и более благоприятного распределения карбидов в наплавленном металле по сравнению с наплавкой без вибрации. Авторами разработаны способы и устройства для наплавки тонких плоских деталей с приложением горизонтальной и вертикальной вибраций. Проведенные исследования структуры, износостойкости и твердости наплавленного металла показали ее преимущества по сравнению с существующими методами индукционной наплавки и необходимость разработки математической модели процесса, которая позволила бы оценить влияние механических колебаний на физическую сущность измельчения

структуры наплавленного металла и его эксплуатационные свойства.

Результаты совершенствования процесса индукционной наплавки рабочих органов сельскохозяйственных машин, проведенные авторами с введением горизонтальной и вертикальной вибрации, опубликованы в работах [43–46].

Таким образом, анализ современных методов наплавки показал, что для тонких плоских деталей почвообрабатывающих сельскохозяйственных машин, в том числе и дисков, толщиной основного металла и наплавленного слоя соответственно 2...6 и 0,8...2,0 мм, наиболее распространенным и перспективным является индукционная наплавка без перемешивания основного металла с наплавленным. Этот метод является наиболее технологичным в связи с использованием несложного оборудования, простотой самого процесса наплавки, не требует высокой квалификации рабочих-наплавщиков, возможностью механизации и автоматизации процесса (что важно в условиях серийного производства). Он постоянно совершенствуется в направлении повышения производительности, износостойкости, стабильности толщины слоя наплавленного металла, экономии электроэнергии, а также снижения деформации деталей.

1. *Ткачев В. Н.* Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. — М.: Машиностроение, 1971. — 264 с.
2. *Большой А. А., Лесков С. П.* Индукционная наплавка деталей в сельскохозяйственном машиностроении // Наплавка. Опыт и эффективность применения. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1985. — С. 72–75.
3. *Вишневецкий А. А., Костылев Ю. А., Остров Д. Д.* Технология изготовления наплавленных дисковых ножей // Наплавка деталей металлургического и горного оборудования: Реф. сб. — М.: НИИИнформтяжмаш, 1978. — С. 15–18.
4. *Пулька Ч. В.* Наплавка рабочих узлов почвообрабатывающей и уборочной сельскохозяйственной техники (Обзор) // Автомат. сварка. — 2003. — № 8. — С. 36–41.
5. *Рабинович А. Ш.* Самозатачивающиеся плужные лемехи и другие почворезущие детали машин. — М.: ГОСНИТИ, 1962. — 165 с.
6. *Николаенко М. Р., Рыморов Е. В.* Новые технологические процессы электродуговой и электроконтактной наплавки быстроизнашивающихся деталей строительных и дорожных машин. — М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1976. — 157 с.
7. *Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А.* Плазменная наплавка. — Киев: Екотехнологія, 2007. — 292 с.
8. *Bouaifi B., Gebert A., Heinze H.* Plasma-pulver-fuftragschweißung zum verschleißschutz abrasive beanspruchter boeteil mit kantenbelastung // Schweißen und Schneiden. — 1993. — № 9. — С. 506–509.
9. *Денисенко М. І., Войтюк В. Д.* Підвищення експлуатаційної надійності деталей робочих органів ґрунтообробних машин // Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК. — 2011. — Вип. 166, Ч. 1. — С. 274–284.
10. *Кобець А. С., Пугач А. М.* Методи і способи підвищення зносостійкості робочих органів культиваторів // Вісн. Дніпропетр. держ. аграр. ун-ту. — 2010. — № 1. — С. 61–63.
11. *Кузнецов Ю. А., Гончаренко В. В.* Восстановление и упрочнение лемехов плугов металлокерамическими пластинами // Вест. Рос. гос. аграр. заочн. ун-та. — 2007. — № 2. — С. 122–123.
12. *Электрoкoнтaктнaя нaпaвкa дискoвых нoжeй / В. П. Туркин, В. Г. Путилин, М. Р. Николаенко и др.* // Автомат. сварка. — 1978. — № 2. — С. 74–76.
13. *Волков Д. А.* Удoскoнaлeння тeхнoлoгії eкoнoмнoлeгoвaнoгo нaпaвлeння знoсoстійкoгo сплaву з викoристaнням пoрoшкoвoгo дрoту: Aвтoрeф. дис. ... кaнд. тeхн. нaук. — Крaмaтoрськ, 2012. — 21 с.
14. *Кoнтaктнoe плaкирoвaниe рaбoчих oргaнoв пoчвoбрaбaтывaющих мaшин / Г. Е. Мамулия, Г. Ф. Муров, В. П. Тюленев, Г. Д. Диборова* // Свароч. пр-во. — 1984. — № 2. — С. 37–39.
15. *Плaкирoвaниe стaли взрывoм / А. С. Гельман, Б. Д. Цемахович, А. Д. Чудовский и др.* — М.: Мaшинoстрoeниe, 1978. — 191 с.
16. *Рябцев И. А.* Биметаллический прокат с плакирующим слоем из гранулированного порошка ПГ-С1 // Современные методы наплавки и наплавочные материалы: Тез. докл. III Республ. науч.-техн. конф. — Харьков, 1981. — С. 9–10.
17. *Кальнер В. Д., Горюшина М. Н., Сичужникова А. А.* Процессы взаимодействия на границе раздела биметаллической заготовки, полученной методом прокатки неспеченного порошка // Металловедение и терм. обработка металлов. — 1984. — № 3. — С. 28–29.
18. *Перспективы применения компактных материалов в биметаллических деталях рабочих органов сельхозмашин / Б. Н. Федоров, В. А. Осадчий, М. Ю. Тиц и др.* // Тракторы и сельхозмашины. — 1975. — № 9. — С. 39–41.
19. *Рябцев И. А.* Наплавка деталей машин и механизмов. — Киев: Екотехнологія, 2004. — 160 с.
20. *Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А., Гордань Г. Н.* Высокованадиевые сплавы для плазменно-порошковой наплавки инструментов // Автомат. сварка. — 2003. — № 3. — С. 21–25.
21. *Переплетчиков Е. Ф.* Плазменная наплавка // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2005. — № 12. — С.35–40.
22. *Денисенко М., Опальчук А.* Зношування та підвищення довговічності робочих органів сільськогосподарських машин // Вісн. Терноп. нац. техн. ун-ту. — 2011. — Ч. 2. — С. 201–210.
23. *Кобець А. С., Кобець О. М., Пугач А. М.* Польові дослідження спрацювання культиваторних лап з локальним зміцненням // Вісн. Харк. нац. техн. ун-ту ім. П. Василенка. Механізація сільськогосподарського виробництва. — 2011. — № 107. — С. 208–213.
24. *Михальченко А. М., Тюрєва А. А., Михальченко М. А.* Повышение износостойкости плужных лемехов нанесением упрочняющих валиков в области наибольшего износа // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2007. — № 9. — С. 17–19.
25. *Василенко М. О.* Перспективи застосування локального зміцнення при виготовленні та відновленні робочих органів // Техніка АПК. — 2008. — № 1. — С. 29–31.
26. *Повышение долговечности плужных лемехов при восстановлении наплавкой угольным электродом / В. Е. Киргизов, Г. М. Шишкин, К. П. Балданов и др.* // Вестн. ИрГСХА. — 2010. — Вып. 38. — С. 65–70.
27. *Восстановление и упрочнение режущей кромки лемеха пайкой металлокерамических пластин / В. В. Гончаренко, А. В. Фербяков, Ю. А. Кузнецов и др.* // Механизация и электрификация сельск. хоз-ва. — 2006. — № 11. — С. 21–22.
28. *Наплавка рабочих органов сельхозмашин с помощью электронного ускорителя / Л. П. Фоминский, М. В. Левчук, А. Ф. Байсман и др.* // Свароч. пр-во. — 1987. — № 11. — С. 4–6.
29. *Упрочнение быстроизнашивающихся деталей почвообрабатывающей техники / В. С. Ивашко, В. К. Ярошевич, П. Г. Лузан, Г. Н. Мдзинарашвили* // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. — 2009. — Вип. № 39 (Міжвідом. наук.-техн. зб. Кіровоград. нац. техн. ун-ту).
30. *Коваленко В. С., Меркулов Г. В., Стрижак А. И.* Упрочнение деталей лучом лазера. — Киев: Техніка, 1981. — 131 с.



31. Солових Е. К., Аулін В. В., Бобрицький В. М. Аналіз характеру зношування лез ґрунторіжучих деталей та підвищення їх ресурсу лазерними технологіями // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. — 2005. — Вип. 35. — С. 153–159.
32. Пулька Ч. В. Технологічна та енергетична ефективність індукційного наплавлення тонких сталевих дисків: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — К., 2006. — 37 с.
33. Основні напрямки індукційного наплавлення робочих органів сільськогосподарських машин / О. М. Шаблій, Ч. В. Пулька, О. І. Король // Вісн. Терноп. держ. техн. ун-ту — 2008. — 13, № 4. — С. 100–109.
34. Розроблення енергоощадних нагрівальних систем для індукційного наплавлення деталей сільськогосподарських машин / О. М. Шаблій, Ч. В. Пулька, В. С. Сенчишин, В. Я. Гаврилюк // Те саме. — 2011. — № 4. — С. 107–120.
35. Біловод О. І., Дудников А. А. К вопросу износоустойчивости рабочих органов свеклоуборочных комбайнов // Вісн. Харк. держ.техн. ун-ту ім. П. Василенка. Механізація сільського господарства. — 2007. — Вип. 59, Т. 1. — С. 288–293.
36. Дудников І. А., Кивишк А. П., Дудников А. А. К вопросу влияния вибрационной обработки на деформирование материала обрабатываемых деталей // Зб. наук. праць. — 2009. — Вип. 39. — С. 167–169.
37. Дудник В. В. Оценка структуры упрочненного слоя лезвия лемехов // Восточно-Европ. журн. передовых технологий. — 2011. — № 4/7. — С. 4–6.
38. Дудников А. А., Горбенко О. В., Біловод О. І. Упрочняющая обработка вибрационным деформированием // Зб. наук. праць Луган. нац. аграрн. ун-ту. — 2006. — №68/91. — С. 86–88.
39. Бабичев А. П., Бабичев І. А. Основы вибрационной технологии. — Ростов-на-Дону, 2008. — 694 с.
40. Сутырин Г. В. Исследование механизма воздействия низкочастотной вибрации на кристаллизацию сварочной ванны // Автомат. сварка. — 1975. — № 5. — С. 7–10.
41. К влиянию вибрационной обработки на механические свойства разнородных сварных соединений / О. Ф. Хафизова, В. И. Болобов, А. М. Файрушин, А. Ю. Кузькин // Нефтегазовое дело. — 2011. — № 1. — http://www.ogbus.ru/authors/Khafizova/Khafizova_1.pdf.
42. Салмин А. Н., Файрушин А. М., Ибрагимов И. Г. Исследование влияния вибрационных колебаний в процессе сварки на технологическую прочность и механические свойства сварных соединений из стали 11Х11Н2В2МФ // Там же. — 2010. — http://www.ogbus.ru/authors/Salmin/Salmin_1.pdf. — 8 с.
43. Влияние вибраций детали в процессе наплавки на структуру и свойства металла / Ч. В. Пулька, О. Н. Шаблій, В. С. Сенчишин та ін. // Автомат. сварка. — 2012. — № 1. — С. 27–29.
44. Пат. 59994 UA, МПК В23К 13/00. Пристрій для наплавлення тонких фасонних дисків / Ч. В. Пулька, В. С. Сенчишин; Заявник і власник Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя. — № 201013152; Заявл. 05.11.2010; Опубл. 10.06.2011; Бюл. № 11.
45. Пат. 64371 UA, МПК В23К 13/00. Спосіб наплавлення сталевих деталей / Ч. В. Пулька, В. С. Сенчишин; Заявник і власник Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя. — № 201103195; Заявл. 18.03.2011; Опубл. 10.11.2011; Бюл. № 21.
46. Пат. 54204 UA, МПК В23К 13/00. Спосіб наплавлення тонких плоских сталевих деталей / О. М. Шаблій, Ч. В. Пулька, В. С. Сенчишин та ін.; Заявник і власник Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя. — № 201006501; Заявл. 28.05.2010; Опубл. 25.10.2010; Бюл. № 20.

The review shows that application of induction melting is most promising for flat parts of agricultural machinery with base metal (BM) thickness of 2.0 – 6.0 mm and deposited metal (DM) thickness of 0.8 - 2.0 mm (minimum mixing of BM and DM, minimum equipment cost, possibility of mechanization and automation).

Поступила в редакцию 01.06.2012

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СНЯТИЯ ОБРАБОТКОЙ ВЗРЫВОМ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТОЛСТОЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА И РАЗРАБОТКА НА ЭТОЙ ОСНОВЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ СЛУЖЕБНЫХ СВОЙСТВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Научно-исследовательская работа по указанной теме была завершена в 2011 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона (руководитель темы — д-р техн. наук Л. Д. Добрушин)

Проведен анализ эффективности применения обработки взрывом для повышения стойкости базовых конструкций к коррозионному растрескиванию под напряжением, существующих на сегодня способов измерения деформаций. Разработаны новые режимы и технологические приемы обработки взрывом конструкций с толщиной стенки до 40 мм, критериальный подход к оценке эффективности повышения стойкости металлоконструкций к коррозионному растрескиванию под напряжением при их обработке взрывом, создана аппаратура для регистрации деформаций, протекающих в металле во время взрывного нагружения, разработаны рекомендации по приварке монтажных элементов к стенкам декомпозиров.

ОПЫТ НАПЛАВКИ СУДОВЫХ ГРЕБНЫХ ВАЛОВ НА ПАО «ХСЗ»

Ж. Г. ГОЛОБОРОДЬКО, канд. техн. наук (ПАО «ХСЗ», г. Херсон)

Описан производственный опыт восстановительной дуговой наплавки судовых гребных валов. Даны сведения о модернизированной наплавочной установке, особенностях отбора валов с дефектами для восстановления их технологии наплавки.

Ключевые слова: дуговая наплавка, модернизированная установка, гребной вал, циклическое нагружение, износ, восстановление, производственный опыт

На судах морского и речного флота детали многих механизмов и устройств (гребные валы, баллеры, штыри рулей и др.) эксплуатируются в условиях циклического нагружения и действия коррозионной среды. Под действием агрессивной среды и других факторов поверхности деталей подвергаются коррозии, интенсивно изнашиваются, что приводит к выходу детали из строя. Развитие поверхностных трещин может приводить к непрогнозируемым разрушениям при циклическом нагружении.

Судовые гребные валы, баллеры, штыри рулей относятся к категории ответственных судовых деталей, которые испытывают в процессе эксплуатации значительные знакопеременные нагрузки. Они поднадзорны Российскому морскому регистру судоходства (РМРС) и к их восстановлению предъявляются высокие требова-

ния. По этой причине ВО «Мортехсудоремпром» утвержден РД 31.52.82–88 «Судовые гребные валы. Восстановление электродуговой наплавкой перлитными и хромоникелевыми сталями».

На ПАО «ХСЗ» для наплавки гребных валов диаметром до 400 мм под флюсом применяют установку, смонтированную на базе машины RM 461E для газовой резки труб с плавным регулированием скорости вращения вала и зависимым перемещением электрода вдоль образующей вала (рис. 1). Установка оснащена наплавочной головкой из подающего механизма полуавтомата ПДГ 508М и бункера для флюса (рис. 2, а). В качестве источника питания используется выпрямитель ВС 630. Наплавку первых (опытных) гребных валов проводили по программе, одобренной РМРС.

Восстановлению наплавкой подлежат гребные валы, имеющие износ, коррозионные разрушения, трещины и смятия по конусу, под облицовками и в остальной части вала, а также коррозионные каверны и другие поверхностные дефекты, которые могут явиться очагами зарождения усталостных трещин. К восстановлению допускаются валы, имеющие подобные дефекты глубиной не более 5 % в пределах расчетного (по Правилам РМРС) диаметра вала. При износе, превышающим 15 мм на сторону, восстановление валов с помощью наплавки не допускается. Поверхность вала, подвергаемая наплавке, должна быть проточена до полного удаления дефектов и не должна иметь следов выработок, коррозионных разрушений, трещин, расслоений, неметаллических включений.

Подготовленный к наплавке вал устанавливают на колесные тележки, вводят в патрон (см. рис. 2, а) и слегка зажимают, затем устанавливают вал по уровню. После проверки вал зажимают окончательно.

Биение наплавляемых поверхностей не должно превышать 0,1 мм. Патрон служит только для вращения вала. Вал должен восприниматься колесными тележками. Запрещается вводить



Рис. 1. Наплавочная установка на базе машины RM 461E

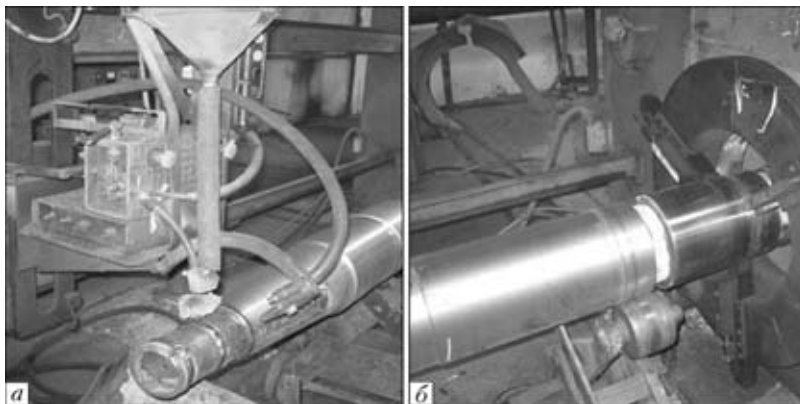


Рис. 2. Наплавочная головка установки (а) и установленный в патроне установки

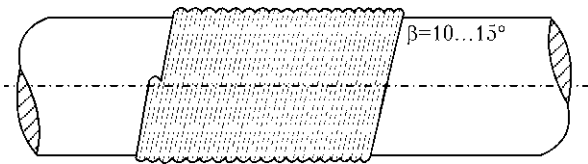


Рис. 3. Схема однозаходной наплавки по винтовой линии

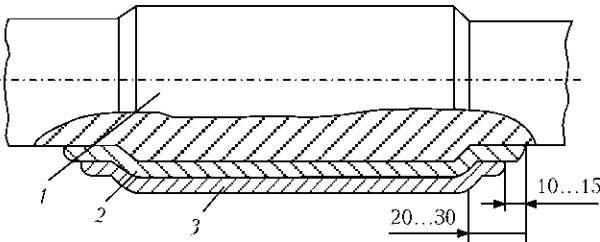


Рис. 4. Схема выполнения антикоррозионной наплавки вала: 1 — основной металл; 2 — низкоуглеродистый металл наплавленного подслоя; 3 — высоколегированный аустенитный наплавленный металл

вал в патрон с помощью крана для исключения ударов вала о патрон.

Восстановление изношенных поверхностей выполняют по винтовой линии с перекрытием соседних валиков по схеме, приведенной на рис. 3.

Для защиты гребных валов, баллеров, изготовленных из обычных сталей, от воздействия агрессивной среды, на их поверхность наплавляют облицовку из высоколегированного наплавленного металла, стойкого против коррозии в морской воде. Наплавка нержавеющей, коррозионностойкого слоя аустенитной стали на гребные валы, баллеры и другие детали должна выполняться только по подслою из низкоуглеродистой стали (рис. 4). Подслою из низкоуглеродистой стали наплавляют проволокой марок Св-08А, Св-08АА под флюсом АН-348А либо ОСЦ-45. Толщина подслоя должна быть не менее 3...4 мм.

Для получения коррозионностойкого слоя применяют наплавку под флюсами марок АН-20 или АН-26 проволокой марки Св-08Х20Н9Г7Т, имеющей высокие технологические свойства и обеспечивающей высокое качество наплавленного металла, а при ее отсутствии сварочными проволоками марок Св-06Х19Н9Т и Св-04Х19Н11М3. Толщина коррозионностойкого наплавленного слоя должна быть не менее 5,0...6,5 мм.

Для уменьшения перемешивания коррозионностойкого металла с низкоуглеродистым металлом подслоя первый слой аустенитной стали наплавляют на умеренных режимах с малой погонной энергией при возможно меньшей глубине проплавления подслоя.



Рис. 5. Гребной вал в сборе с винтом

Химический состав проволоки Св-04Х19Н11М3 и наплавленного металла, мас. %

Материал	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
Проволока Св-04Х19Н11М3	0,04	1,03	0,25	18,4	11,4	2,9
Наплавленный металл	0,07	—	—	16,07	10,0	2,9

Один из наплавленных гребных валов в сборе с винтом перед установкой на судно показан на рис. 5.

Было проведено исследование нержавеющей коррозионностойкого слоя, наплавленного проволокой Св-04Х19Н11М3 под слоем флюса АН-26С для защиты гребного вала диаметром 200 мм против коррозии в морской воде. Наплавку выполняли под надзором РМРС по подслою из низкоуглеродистой стали. С целью уменьшения перемешивания коррозионностойкого металла с низкоуглеродистым металлом подслоя первый слой наплавляли проволокой Св-04Х19Н11М3 на умеренных режимах с малой погонной энергией при возможно меньшей глубине проплавления подслоя: $I_{св} = 190$ А; $U_{д} = 27$ В; $v_{н} = 24$ м/ч; вылет электрода 20 мм. Смещение электрода от зенита 14 мм; диаметр электрода 2 мм.

При исследовании микроструктуры зоны сплавления коррозионностойкого наплавленного слоя и подслоя из низкоуглеродистой стали не выявлено никаких дефектов. Результаты химического анализа проволоки Св-04Х19Н11М3 и наплавленного ею металла приведены в таблице.

Исследования показали, что принятая технология позволяет проводить наплавку гребных валов с высоким качеством и в соответствии с требованиями РД 31.52.82–88 «Судовые гребные валы. Восстановление электродуговой наплавкой перлитными и хромоникелевыми сталями».

За последние годы на ПАО «ХСЗ» выполнена наплавка более 80 гребных валов различных диаметров судов, находящихся на ремонте.

Industrial experience in repair arc cladding of marine propeller shafts is described. Data on the upgraded cladding machine and on the peculiarities of selection of shafts with defects to repair them by the cladding technology are given.

Поступила в редакцию 24.04.2012

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ФЛЮСА НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКЕ ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ

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

Проведена оценка влияния фторидных бескремнистых флюсов АНФ-6, АНФ-25, АНФ-1П и низкремнистых АН-15, АН-15М на теплофизические и физико-химические процессы при электрошлаковой наплавке жидким металлом (ЭШН ЖМ) штампов. По результатам экспериментов можно сделать вывод о том, что для ЭШН ЖМ штампового инструмента предпочтительно использовать флюс АН-15М. Это позволяет быстро и равномерно подплавлять поверхность штампа, а также сохранить состав наплавленного металла практически неизменным в сравнении с исходным металлом стружки стали 5ХНМ при степени десульфурации до 50%.

Ключевые слова: электрошлаковая наплавка, штампы, жидкий металл, теплофизические процессы, науглероживание, десульфурация

Возможность образования качественного соединения при электрошлаковой наплавке жидким металлом (ЭШН ЖМ) во многом определяется теплофизическими свойствами используемого флюса, от которых зависит устойчивость электрошлакового процесса, характер токораспределения в шлаковой ванне, интенсивность тепловыделения в ней и теплопередачи к металлической ванне, продолжительность и равномерность нагрева наплавляемой поверхности основного металла, степень очистки ее от оксидов [1].

Кроме того, в период ЭШН ЖМ шлак, наплавляемый металл и графит неплавящихся электродов, которыми поддерживается электрошлаковый процесс, длительное время взаимодействуют между собой при высоких температурах (до 1900 °С). Это может привести к значительному изменению состава и свойств как шлака, так и наплавленного металла, что недопустимо.

Известно, что использование основных флюсов позволяет рафинировать жидкий металл [2], однако

при этом возможно его науглероживание [3]. Степень науглероживания возрастает с увеличением содержания оксида кальция и уменьшается с повышением концентрации кремнезема в шлаке [4, 5]. По данным [4] при введении 15...20 % SiO₂ в шлак системы CaF₂-Al₂O₃-CaO науглероживание металла не происходит, а рафинирующие свойства шлака остаются хорошими. Отмечается также, что равновесное содержание углерода в жидком металле зависит от его состава [6].

Поэтому в данной работе была поставлена задача провести оценку влияния различных флюсов на теплофизические и физико-химические процессы при ЭШН, обуславливающие изменение состава металла и шлака, и определить наиболее пригодный флюс для процесса ЭШН ЖМ.

Для исследований были выбраны фторидные бескремнистые флюсы АНФ-6, АНФ-25, АНФ-1П и низкремнистые АН-15 и АН-15М (табл. 1). Температурные зависимости вязкости и электропроводности этих флюсов приведены на рис. 1, 2 [7-9].

Эксперименты проводили в ИЭС им. Е. О. Патона на установке А-550 и на Токмакском кузнечно-штамповочном заводе на установке ОБ-2213 при

Таблица 1. Стандартный химический состав исследуемых флюсов, мас. %

№ п/п	Марка флюса	CaF ₂	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	MnO	Fe ₂ O ₃	S	C
1	АН-15	20...23	14...18	22...25	24...29	8...11	1,5...2,5	≤ 0,85	≤ 0,05	—
2	АН-15М	16...20	29...33	36...40	6...10	≤ 2	≤ 0,9	≤ 0,8	≤ 0,07	—
3	АНФ-1П	≥ 90	≤ 5	≤ 3	≤ 2,5	—	—	≤ 0,5	≤ 0,05	≤ 0,1
4	АНФ-6	Основа	≤ 8	25...31	≤ 2,5	—	—	≤ 0,5	≤ 0,05	≤ 0,1
5	АНФ-25	50...60	10...15	12...20	2...7	10...15	—	≤ 0,5	≤ 0,07	≤ 0,1

Примечание. В состав флюса АН-15М входит 2,0...5,5 % NaF.

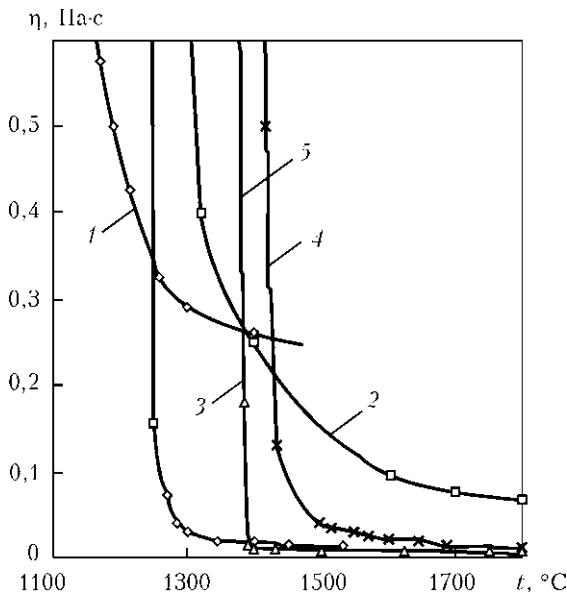


Рис. 1. Зависимость вязкости флюсов от температуры: 1-4 — здесь и далее марки флюсов по табл. 1

наплавке жидкой сталью 5ХНМ заготовок различных типоразмеров из стали той же марки. На поверхности твердой заготовки (поковка, изношенный штамп), установленной в медный водоохлаждаемый кристаллизатор, заливали предварительно расплавленный флюс—шлак и с помощью графитированных электродов производили электрошлаковый нагрев заготовки до подплавления. Затем на подготовленную таким образом поверхность через слой расплавленного шлака заливали выплавленный в индукционной печи жидкий металл. После заливки необходимого количества металла его кристаллизовали под слоем шлака, постепенно снижая мощность электрошлакового процесса.

При ЭШН температуру шлака поддерживали в пределах 1550...1800 °С при глубине шлаковой ванны 50...60 мм. Температуру шлака измеряли с помощью вольфрам-рениевой термопары с наконечником из карбонитрида бора. Температуру наплавляемой заготовки измеряли в центре и по

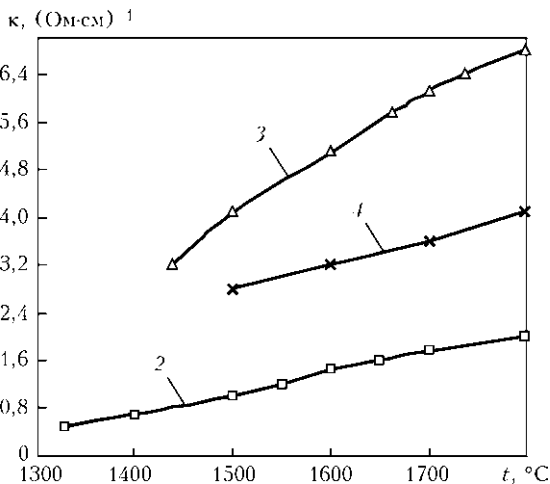


Рис. 2. Зависимость электропроводности флюсов от температуры

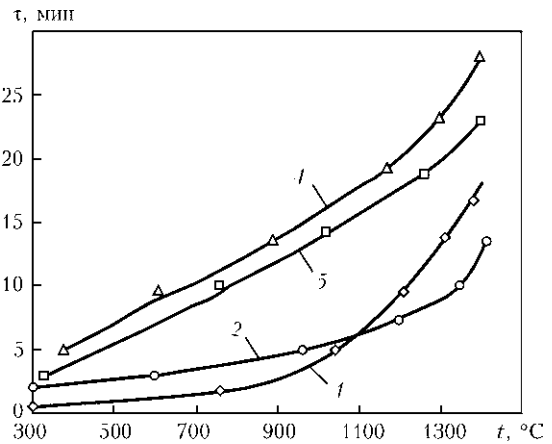


Рис. 3. Интенсивность электрошлакового нагрева поверхности штампов размерами 210×210×50 мм. Удельная мощность — $150 \cdot 10^4$ Вт/м², напряжение — 35 В

краям такими же термопарами, зачеканенными под ее поверхностью на глубине 5 мм. Пробы для химического анализа металла и шлака отбирали до и после эксперимента.

Как показали эксперименты, в случае применения более электропроводных фторидных флюсов АНФ-1П, АНФ-6, АНФ-25 электрошлаковый процесс на тех же режимах, что и при использовании низкокремнистых флюсов — неустойчив и часто переходит в дуговой. Это явление усиливается при повышении напряжения и особенно проявляется при использовании флюса АНФ-1П, имеющего наибольшую электропроводность. Кроме того, вследствие резкого изменения тока при заглублении электродов в шлаковую ванну его плавное регулирование затруднено. Поэтому при использовании фторидных флюсов для обеспечения плавного регулирования тока, повышения стабильности процесса его необходимо вести при более глубокой шлаковой ванне, чем при использовании низкокремнистых флюсов.

В сравнении с более электропроводными фторидными флюсами при использовании низкокремнистых флюсов процесс нагрева поверхности штампов идет быстрее и с меньшим расходом электроэнергии (рис. 3). Это различие наблюдается при нагреве в широком диапазоне удельных мощностей (см. рис. 4). Меньшая электропроводность низкокремнистых флюсов обуславливает

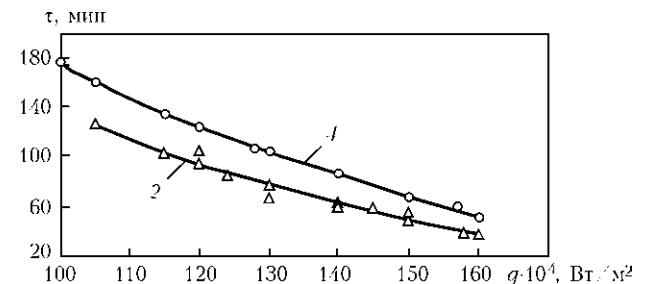


Рис. 4. Влияние удельной мощности q на продолжительность электрошлакового нагрева заготовок штампов размерами 400×200×180 мм до подплавления

Таблица 2. Изменение химического состава наплавленного металла за время процесса ЭШН ЖМ в зависимости от марки флюса

Тип наплавленного металла	Марка флюса	Массовая доля элементов и ее относительное изменение η , %							
		C	η_C	Si	η_{Si}	Mn	η_{Mn}	S	η_S
5XHM	АН-15	$\frac{0,58}{0,59}$	+1,7	$\frac{0,41}{0,53}$	+29,3	$\frac{0,48}{0,65}$	+35,4	$\frac{0,025}{0,020}$	-20
	АН-15М	$\frac{0,55}{0,56}$	+1,8	$\frac{0,40}{0,39}$	-2,5	$\frac{0,52}{0,53}$	+1,9	$\frac{0,023}{0,013}$	-43,5
	АНФ-1П	$\frac{0,55}{0,63}$	+14,5	$\frac{0,21}{0,01}$	-95,2	$\frac{0,55}{0,19}$	-65,5	$\frac{0,019}{0,009}$	-52,6
	АНФ-6	$\frac{0,52}{0,58}$	+11,5	$\frac{0,37}{0,16}$	-56,8	$\frac{0,58}{0,29}$	-50	$\frac{0,025}{0,015}$	-40,0
	АНФ-25	$\frac{0,52}{0,55}$	+5,8	$\frac{0,33}{0,18}$	-45,5	$\frac{0,61}{0,29}$	-52,5	$\frac{0,021}{0,009}$	-57,1
Сталь 5XHM (ДСТУ 3953-2000)	—	0,5...0,6	—	0,1...0,4	—	0,5...0,8	—	≤0,03	—

Примечания. 1. $\eta_s = \frac{[Э_k] - [Э_n]}{[Э_n]} \cdot 100\%$, где $[Э_n]$, $[Э_k]$ — содержание элемента соответственно до начала и после окончания процесса. 2. В числителе приведены значения для $[Э_n]$, в знаменателе — для $[Э_k]$. 3. η_C , η_S — степень науглероживания и десульфурации соответственно. 4. Знак «+» означает увеличение содержания элемента, а знак «-» — уменьшение. 5. Поскольку существенного изменения содержания хрома, никеля, молибдена не произошло, то в таблице они не указаны.

необходимость большего погружения электродов в шлаковую ванну для прохождения заданного тока и, следовательно, возможность приближать зоны активного тепловыделения к поверхности нагреваемого основного металла.

По равномерности нагрева наплавленной поверхности исследуемые флюсы можно разместить в следующей последовательности: АН-15М, АН-15, АНФ-6, АНФ-25, АНФ-1П. Так, разница температур по поверхности штампа (размером в плане 550×380 мм) при нагреве до начала подплавления под шлаком АН-15М составляет 240 °С, а под шлаком АНФ-6 — 400 °С. Это связано с тем, что при использовании менее электропроводных низкокремнистых флюсов достигается более высокая температура шлаковой ванны и происходит более интенсивное перемешивание последней, что и обеспечивает повышение равномерности нагрева.

Возможность быстрого и одновременного установления электрошлакового процесса на всех электродах, чем в значительной мере определяется равномерность нагрева наплавленной заготовки, также зависит от теплофизических свойств и состава применяемого флюса. При использовании тугоплавких флюсов после их расплавления и заливки в кристаллизатор поверхность шлаковой ванны быстро покрывается коркой, что затрудняет заглубление электродов и задерживает установление электрошлакового процесса.

При использовании более легкоплавких флюсов выполнение этих операций облегчается. Для исследуемых флюсов возможность быстрого установления электрошлакового процесса возрастает в следующем порядке: АНФ-1, АНФ-6, АН-15М, АН-15.

Анализ наплавленного металла показывает, что в результате взаимодействия с фторидными

Таблица 3. Изменение химического состава шлака за время процесса ЭШН ЖМ в зависимости от марки флюса

Марка флюса	CaF ₂	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	MnO	Fe ₂ O ₃	S	C
АН-15	$\frac{21,0}{18,9}$	$\frac{17,3}{18,7}$	$\frac{22,7}{22,4}$	$\frac{26,9}{24,9}$	$\frac{9,5}{9,3}$	$\frac{2,4}{2,3}$	$\frac{0,51}{0,44}$	$\frac{0,007}{0,006}$	$\frac{0,030}{0,025}$
	$\frac{20,8}{19,8}$	$\frac{29,2}{29,7}$	$\frac{39,3}{37,5}$	$\frac{9,3}{9,9}$	$\frac{0,6}{0,4}$	$\frac{0,20}{0,16}$	$\frac{0,28}{0,37}$	$\frac{0,008}{0,019}$	$\frac{0,040}{0,035}$
АНФ-1П	$\frac{90,1}{82,8}$	$\frac{5,0}{6,7}$	$\frac{1,8}{1,6}$	$\frac{2,6}{4,6}$	—	$\frac{0,25}{0,83}$	$\frac{0,11}{0,36}$	$\frac{0,007}{0,014}$	$\frac{0,040}{0,035}$
	$\frac{65,5}{62,6}$	$\frac{6,8}{8,6}$	$\frac{28,3}{26,1}$	$\frac{2,6}{5,2}$	—	$\frac{0,16}{0,30}$	$\frac{0,16}{0,29}$	$\frac{0,008}{0,018}$	$\frac{0,035}{0,030}$
АНФ-25	$\frac{55,8}{52,6}$	$\frac{13,8}{19,9}$	$\frac{14,2}{11,3}$	$\frac{2,2}{5,2}$	$\frac{12,6}{11,7}$	$\frac{0,29}{0,72}$	$\frac{0,27}{0,45}$	$\frac{0,008}{0,020}$	$\frac{0,040}{0,035}$

Примечание. В числителе приведены данные до начала, а в знаменателе — после окончания процесса.



Таблица 4. Влияние температуры и состава шлака на процесс науглероживания и десульфурации металла при ЭШН ЖМ

Марка флюса	Температура шлака, °С	Массовая доля углерода и степень науглероживания $\eta_C, \%^*$				Массовая доля серы и степень десульфурации $\eta_S, \%^{**}$			
		Расстояние от поверхности, мм				Расстояние от поверхности, мм			
		исходное	3	10	90	исходное	3	10	90
АНФ-6	1550	0,52	0,58 (11,5)	0,53 (1,9)	0,52	0,025	0,015 (40,0)	0,018 (28,0)	0,025
	1750	0,59	0,72 (22,0)	0,61 (3,4)	0,59	0,021	0,011 (47,6)	0,013 (38,1)	0,023
АН-15М	1550	0,55	0,56 (1,8)	0,55	0,55	0,023	0,013 (43,5)	0,016 (30,4)	0,023
	1800	0,58	0,6 (3,4)	0,59 (1,7)	0,58	0,020	0,010 (50,0)	0,012 (40,0)	0,020

* В скобках приведены значения степени науглероживания. ** В скобках указаны значения степени десульфурации.

шлаками АНФ-1П, АНФ-6 и АНФ-25 за время процесса произошли существенные изменения химического состава наплавленного металла (см. табл. 2). Так, содержание серы, кремния, марганца уменьшилось, а углерода — возросло. Наибольшие изменения состава металла по углероду, кремнию и марганцу отмечены при использовании флюса АНФ-1П, содержащего 95 % CaF_2 . При использовании флюса АН-15 происходит восстановление кремния, марганца и их содержание в металле возрастает на 30...35 %. Степень десульфурации и науглероживания металла не высока, что хорошо согласуется с известными данными [4].

При использовании флюса АН-15М содержание углерода, кремния и марганца в наплавленном металле практически остается неизменным. Одновременно примерно на 44 % снижается содержание серы. Описанные изменения химического состава металла согласуются с соответствующими изменениями состава шлака за время процесса наплавки (см. табл. 3).

Так, если при использовании фторидных флюсов содержание кремния и марганца в металле уменьшилось, то в шлаке содержание их оксидов возросло. Аналогично изменилось содержание серы — в металле оно уменьшилось, а в шлаке — возросло. Исключение составляет углерод, содержание которого в шлаках всегда уменьшается по сравнению с исходным, что связано с окислением его кислородом воздуха или компонентами шлака [5].

При повышении температуры шлака АНФ-6 до 1800 °С происходит интенсификация процессов науглероживания и десульфурации металла (табл. 4). Десульфурация металла усиливается также при повышении температуры шлака АН-

15М, но при этом появляется тенденция к повышению степени науглероживания металла.

Таким образом, при ЭШН ЖМ штампового инструмента предпочтительно использовать флюс АН-15М, который позволяет быстро и равномерно подплавлять поверхность штампа, а также сохранять состав наплавленного металла практически неизменным по сравнению с исходным металлом стружки стали 5ХНМ при степени десульфурации до 50 %.

1. *Электрошлаковая наплавка* / Ю. М. Кусков, В. Н. Скороходов, И. А. Рябцев, И. С. Сарычев. — М.: ООО «Наука и технологии», 2001. — 180 с.
2. *Рафинирование* стали синтетическими шлаками / С. Г. Воинов, А. Г. Шалимов, Л. Ф. Косой, Е. С. Калинин. — М.: Металлургия, 1970. — 464 с.
3. *Пономарев А. Г., Козлов Ю. Е.* О растворимости углерода в шлаках // Изв. АН СССР. Сер. Металлы. — 1974. — № 5. — С. 10–14.
4. *Исследование* науглероживания металла при электрошлаковом процессе с графитированным электродом / А. Е. Воронин, Ю. В. Латаш, В. А. Николаев и др. // Спец. электрометаллургия. — 1976. — № 32. — С. 22–27.
5. Особенности процесса науглероживания чугуна при электрошлаковой обработке / Н. Н. Волкотруб, И. Ю. Лютый, А. Е. Воронин и др. // Там же. — 1978. — № 37. — С. 24–30.
6. *Биктаиров Ф. К.* Поведение углерода при электрошлаковой обработке металлов // Пробл. сварки, металлургии и родственных технологий: Сб. тр. VIII Междунар. конф., окт. 2003 г., Тбилиси. — Тбилиси: Ассоциация сварщиков Грузии, 2003. — С. 255–265.
7. *Металлургия* электрошлакового процесса / Б. И. Медовар, А. К. Цыгуленко, В. Л. Шевцов и др. — Киев: Наук. думка, 1986. — 248 с.
8. *Макара А. М., Мосендз Н. А.* Сварка высокопрочных сталей. — Киев: Техніка, 1971. — 140 с.
9. *Латаш Ю. В., Фетисова Т. Я., Воронин А. Е.* Исследование электропроводности и вязкости шлаков (флюсов) системы $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, применяемой в электрошлаковой технологии. Сообщение 3 // Спец. электрометаллургия. — 1985. — № 58. — С. 11–17.

Assessment of the influence of fluoride no-silicon fluxes ANF-6, ANF-25, ANF-1P and low-silicon fluxes AN-15, AN-15M on thermophysical and physico-chemical processes at electroslag surfacing with liquid metal (ESS LM) of stamping dies was performed. Experimental results lead to the conclusion that application of AN-15M flux is preferable for ESS LM of stamping dies. Its application allows quickly and uniformly melting the die surface, as well as preserving practically unchanged composition of the deposited metal compared to the initial metal of 5KhNM steel chips with the degree of desulphurization of up to 50%.

Поступила в редакцию 20.05.2012



МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНКУРС СВАРЩИКОВ В КИТАЕ

4-6 июня 2012 г. состоялся международный конкурс сварщиков «2012 ARC Cup International Welding Competition», который был проведен в Пекине во время 17-й Международной выставки «Beijing Essen Welding and Cutting». Организаторами конкурса выступила компания «Beijing ARC Xinxing Science & Technology Co., Ltd.» при поддержке государственной комиссии КНР «State-owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council (SASAC)».

Номинации конкурса:

- роботизированная (робот Panasonic TA1400-1+350GL3/350GS4) сварка;
- ручная дуговая сварка (111/SMAW);
- дуговая сварка плавящимся электродом в углекислом газе (135/GMAW);
- дуговая сварка неплавящимся электродом в инертном газе (141/GTAW);
- газокислородная сварка (311/OFW).

Конкурсные задания по каждому методу определяли жеребьевкой в присутствии руководителей делегаций. В результате для дуговых способов сварки (111, 141, 135) были определены три конкурсных задания – стыковое соединение в горизонтальном положении (PC) и угловое соединение в вертикальном положении (PF) стальных пластин толщиной 10 мм (для способа 111 и 135) и 5 мм (для способа 141) и сварка стыкового соединения трубных заготовок диаметрами 133×10 (способ 111 и 135) и 60×4 мм (способ 141) в поворотном положении (PA). Для роботизированной сварки – образцы трехмерных изделий из углеродистой и нержавеющей стали, для газокислородной сварки – соединение стальной трубной (60×4 мм) заготовки с пластиной толщиной 5 мм.

Время на подготовку и сборку образцов к сварке – 60 мин (для роботизированной сварки – 30 мин), время на сварку образцов методами 111 и 311 – 120 мин, методами 135 и 141 – 100 мин, роботом – 40 мин. Судейская коллегия оценивала пооперационно действия конкурсантов согласно регламенту конкурса, а качество сварных соединений – по стандартам визуального и рентгеновского контроля.

В конкурсе приняли участие сварщики из семи стран: КНР (11 корпораций), Южной Кореи, ФРГ (компания ESS, работающая в КНР), Украины, Республики Беларусь, Словацкой Республики и Болгарии – всего около 70 человек. Возраст конкурсантов составлял 19 – 35 лет. Конкурсанты отбирались национальными сварочными обществами, которые получили приглашение от организатора конкурса.

Делегация Украины, сформированная Советом Общества сварщиков Украины и Одесским областным отделением ОСУ, состояла из семи человек: сопровождающие лица – А. Н. Воробьев, председатель Одесского отделения ОСУ, руководитель делегации, В. А. Дорошенко, главный инженер проекта, ООО «НПФ «Техвагонмаш», г. Кременчуг, Е. В. Заика, переводчик; конкурсанты – С. А. Тихонов электрогазосварщик 5-го разряда, Одесский припортовый завод (метод 111), А. В. Волочай, сварщик 5-го разряда, ПАО «Крюковский вагоностроительный завод» (метод 135), О. М. Луцкич, электрогазосварщик 6-го разряда, Одесский припортовый завод (метод 141), Ю. А. Эртман, ведущий инженер-технолог, ООО «НПФ «Техвагонмаш», г. Кременчуг (роботизированная сварка).



Открытие международного конкурса сварщиков в Пекине



Делегация Общества сварщиков Украины

Итоги суммарного общекомандного первенства

Место	Страна	Количество баллов
1	Китай	545,45
2	Украина	501
3	Беларусь	496
4	Словакия	397
	Болгария	397
5	Германия (ESS)	262,5
6	Южная Корея	255

Финансовую поддержку нашей делегации, кроме предприятий, где работают члены делегации, оказали также спонсоры: «Восток Сервис Украина», г. Киев, председатель правления М. М. Котенев, «Бинцель Украина ГмбХ», г. Киев, директор Ю. А. Дидус, «Эйр Ликвид Велдинг Украина», г. Харьков, директор И. Л. Либман, «Интерхим-БТВ», г. Киев, директор В. И. Чернецкий, магазин «Все для сварки», г. Одесса, директор В. А. Юранов.

Конкурс проводили на фабрике сварки компании «Beijing ARC Xinxing Science & Technology Co., Ltd.», где были созданы все условия для беспрепятственной работы конкурсантов и судей.

По итогам конкурса судьи констатировали, что 65% сварных соединений (их общее количество было 198) было отличного качества по визуальному и 44% по рентгеновскому контролю. В общем все конкурсанты (особенно в способах сварки 135 и 141) выполнили задания хорошо, что свидетельствует о высоком уровне конкурса.

Более 200 гостей присутствовало на церемонии закрытия международного конкурса сварщиков. Итоги конкурса были подведены в общекомандном первенстве по всем номинациям суммарно и отдельно, а также в личном первенстве по каждой номинации. Результаты конкурса огласил директор по связям с общественностью государственной комиссии KHP SASAC господин Xie Jun.

Итоги командного первенства по отдельным номинациям

Место	Страна	Количество баллов
Роботизированная сварка		
1	Китай	60,13
2	Беларусь	50
3	Украина	43
Сварка методом 111		
1	Китай	116,67
2	Беларусь	94
3	Германия (ESS)	53
4	Украина	46
5	Словакия	40
6	Болгария	34
7	Южная Корея	4
Сварка методом 135		
1	Беларусь	190
2	Китай	187,6
3	Украина	184
4	Словакия	174
5	Болгария	147
6	Германия (ESS)	133,5
7	Южная Корея	39
Сварка методом 141		
1	Украина	228
2	Болгария	216
3	Китай	200,78
4	Словакия	183
5	Беларусь	162
6	Южная Корея	72
7	Германия (ESS)	43
Сварка методом 311		
1	Китай	131
2	Германия (ESS)	109

В личном первенстве в номинациях были объявлены только первые шесть мест. Наилучший результат из иностранных участников показал конкурсант из Украины – Олег Лущик (пятое место в номинации «сварка методом 141»).

Специальные дипломы за высокую квалификацию в сварке отдельных образцов получили только два конкурсанта из Украины: Ю.А. Эррман в номинации «роботизированная сварка» и О.М. Лущик в номинации «сварка методом 141».

Выступивший на закрытии конкурса сварщиков генеральный менеджер Немецкого сварочного общества господин К. Middeldorf предложил сварщикам Китая принять участие в конкурсе Китай — Европа.

Следующий международный конкурс сварщиков «ARC Cup International Welding Competition» состоится в Пекине в 2014 г.

А. А. Кайдалов д-р техн. наук,
А. Н. Воробьев, инж.



УДК 621.79:061.21.4

IV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «НОВЕЙШИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛА. ПОВЫШЕНИЕ ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ»

19–21 июня 2012 г. четвертый раз подряд в Одессе на ОДО «ЗОНТ» прошла международная конференция «Новейшие технологии и оборудование для термической резки металла. Повышение его эффективности и безопасности». Она собрала потребителей, поставщиков и производителей оборудования для термической резки из Украины, России, Беларуси, а также дальнего зарубежья — США, Германии, Голландии. В этом году конференция привлекла внимание более 45 специалистов, что говорит о неуклонном росте к ней интереса профессионалов в области термической резки. Программа мероприятия была насыщенной и интересной. В этом году особое внимание было уделено вопросам экологии и эффективного использования оборудования в условиях действующих заготовительных производств. Были заслушаны доклады и сообщения специалистов различных направлений: программистов, конструкторов, технологов. Обсуждались насущные проблемы производства и использования машин для лазерной, плазменной и газокислородной резки, а также новые направления развития машин термической резки с автоматизированными системами управления.

Работа конференции началась с выступления технического директора ОДО «ЗОНТ» В. Н. Копытько, который рассказал о текущих и перспективных разработках предприятия.

Основными дискуссионными темами первого дня форума стали сообщения представителя германской фирмы «KJELLBERG», хорошо известной специалистам как производителя высокотех-

нологичных источников для плазменной резки. Господин Торстен Юниор рассказал о линейке хорошо зарекомендовавших себя и совершенно новых плазменных источников, предназначенных для комплектования машин плазменной резки с ЧПУ, а также о новых разработках фирмы «KJELLBERG» в области лазерной резки. В первый день форума были также заслушаны доклады специалистов ОДО «ЗОНТ» (г. Одесса) и ООО «Автогенмаш» (г. Тверь).

Инженер-программист, канд. физ.-мат. наук Ю. Н. Крапивный проинформировал о перспективной разработке по созданию системы ЧПУ CNC 4000 WinCAN для управления машинами термической резки с робототехническим модулем при подготовке деталей под сварку.

Инженеры В. М. Литвинов (ООО «НИИП-Тмаш», г. Краматорск) и А. Лавров («Автогенмаш», г. Тверь) поделились опытом резки скрапа с применением специализированной машины «Терминатор». Их выступление сопровождалось обилием фото-, видеоматериалов и вызвало повышенный интерес у слушателей.

О путях повышения производительности и эффективности использования современных машин термической резки рассказал инженер-программист А. Кульпанов («Автогенмаш», г. Тверь). Он сообщил о новых разработках систем ЧПУ с применением встроенных баз данных по технологии резки различных материалов. Применение таких систем в комплекте с новыми блоками управления газами позволит эффективно использовать накопленную



Резка заготовки диаметром 650 мм на машине «Терминатор»



Участники конференции знакомятся с новой фотокопировальной машиной производства ОДО «ЗОНТ»



Новая система ЧПУ с сенсорным экраном

технологическую информацию и достигать высокого качества резки, не зависящего от квалификации оператора машины.

Хорошим подтверждением высокого технического уровня и качества машин с торговой маркой «Комета» и «Метеор» от ОДО «ЗОНТ» стало сообщение специалистов ПАО «Крюковский вагоностроительный завод» (г. Кременчуг) и ОДО «ЗОНТ». Инженеры Л. А. Коваленко, В. С. Сысолятин, Е. Крыжановский рассказали об опыте применения машин для термической резки в условиях заготовительного производства КВСЗ. Следует отметить, что на этом предприятии в настоящее время находятся семь машин, произведенных на заводе «ЗОНТ». Особо востребованными являются машины с поворотным блоком, предназначенные для снятия кромок под сварку на фигурных деталях. Докладчики отмечали, что применение таких машин позволило снизить трудоемкость обработки до 10 раз по сравнению с применяемым ранее фрезерованием кромок.

После чтения докладов участники конференции имели возможность ознакомиться с машинами, выпускаемыми на ОДО «ЗОНТ». Помимо ставших уже классическими порталными машинами, была продемонстрирована многорезаковая газокислородная машина с фотокопировальной системой управления.

Большой интерес вызвала машина с поворотным блоком новой компоновки и ее система ЧПУ с сенсорным экраном.

Второй день конференции открыл представитель фирмы «ИРЭ Полюс» (г. Фрязино) К. М. Жилин, доклад которого был посвящен твердотельным лазерным системам фирмы IPG. Докладчик подробно рассказал о работе выпускаемых лазерных систем и особенностях их применения в промышленности для резки и сварки, особо подчеркнув эффективность твердотельных лазерных систем для скоростной резки тонколистовых материалов.



Демонстрация участникам конференции технологии плазменной резки TrueHole

Большой интерес специалистов предприятий стран СНГ вызвали доклады представителей фирмы «HYPERTHERM» (США), известного мирового лидера по производству источников плазменной резки. О технологии TrueHole и ее применении на машинах завода «ЗОНТ» с использованием системы оптимизации раскроя ProNest 2012 рассказали Я. Сланы и Henrik Steensen, сотрудники европейского отделения фирмы «HYPERTHERM».

Завершил программу конференции интересный доклад о комплексе для плазменной резки труб инженер А. Карауш (ОДО «ЗОНТ», г. Одесса). В представленных фото- и видеоматериалах была продемонстрирована работа комплекса, внедренного на одном из предприятий в Беларуси, благодаря которому полностью автоматизирована резка трубных заготовок. По результатам внедрения руководство предприятия-заказчика направило в адрес ОДО «ЗОНТ» благодарственное письмо, в котором сообщается о высоких показателях эффективности и производительности, достигнутых при внедрении комплекса.

Участники конференции имели возможность получить каталоги продукции зарубежных и отечественных производителей, участвующих в конференции. Состоялся обмен мнениями по усовершенствованию конструкции современных машин термической резки. В ходе конференции были обсуждены и подписаны контракты на закупку машин ОДО «ЗОНТ». Несмотря на ограниченное время конференция была полезной для всех ее участников. Она способствовала дальнейшему обмену информацией и налаживанию профессиональных связей в области термической резки металлов.

В следующем году планируется очередная тематическая конференция, информация о которой будет размещена на сайте ОДО «ЗОНТ».

А. М. Семернев, инж.

65-я ЕЖЕГОДНАЯ АССАМБЛЕЯ МЕЖДУНАРОДНОГО ИНСТИТУТА СВАРКИ

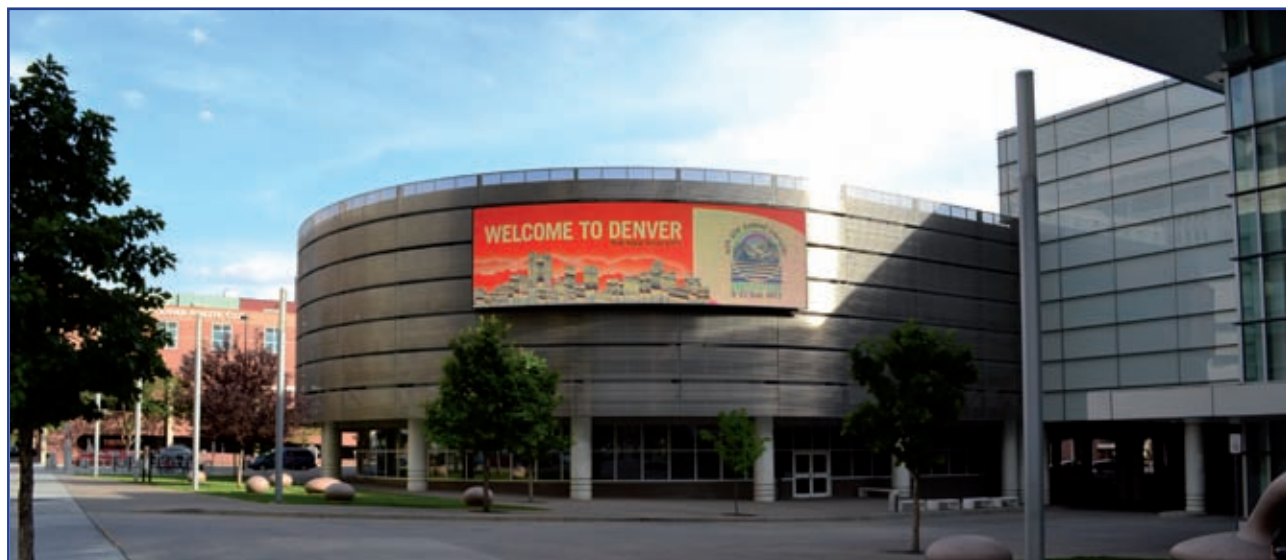
С 8 по 14 июля 2012 г. в Денвере (США) состоялась 65-я Ежегодная ассамблея Международного института сварки (МИС). Организационно-управляющей ассамблеи выступил Американский совет МИСа, который включает Американское сварочное общество (American Welding Society - AWS), Институт сварки Эдисона (Edison Welding Institute - EWI) и Исследовательский совет по сварке (Welding Research Council - WRC). В работе ассамблеи приняло участие около 600 делегатов из 46 стран. Из 57 стран-членов МИСа на ассамблеи отсутствовали делегации 12 стран: Болгарии, Греции, Израиля, Ливана, Ливии, Литвы, Малайзии, Марокко, Мексики, Пакистана, Перу и Туниса. В то же время в ассамблеи принял участие на правах наблюдателя Камерун, который подал заявку на присоединение к МИСу. Наибольшие делегации прислали Германия (83 человека), Япония (71 человек) и Китай (46 человек), что для первых двух стран является обычным явлением на протяжении последних 15 – 20 лет. Однако китайская делегация до последнего времени не превышала 5 – 7 человек (например, в 2007 – 6, а в 2011 – 7 представителей). Достаточно представительные делегации прибыли от Франции (21 делегат), Англии (20), Швеции (17), Финляндии (17), Словакии (15), Италии (13), Австралии (12), Канады (12), Индии (11). Тяжелым экономическим положением Испании можно объяснить сокращение ее делегации до 2 участников (с обычных 7 – 9 делегатов). От страны-организатора (США) в ассамблеи приняло участие 118 человек.

В МИСе функционирует более 20 комиссий и других структурных подразделений: С-I — вы-

соко- и низкотемпературная пайка, термическая резка и процессы газопламенной обработки; С-II — дуговая сварка и сварочные материалы; С-III — сварка сопротивлением и холодная сварка, а также родственные процессы соединения материалов; С-IV — лучевые способы сварки; С-V — контроль и обеспечение качества сварных конструкций; С-VI — терминология; С-VIII — охрана труда; С-IX — поведение металлов при сварке; С-X — сварные конструкции. Предотвращение разрушения; С-XI — сосуды, работающие под давлением, котлы и трубы; С-XII — дуговые сварочные процессы и технологии; С-XIII — усталостная прочность сварных узлов и конструкций; С-XIV —

Страны-члены МИСа
(по состоянию на июль 2012 года)

Европа Австрия Англия Болгария Бельгия Венгрия Германия Голландия Греция Дания Испания Италия Литва Македония Норвегия Польша Португалия Россия Румыния Сербия Словакия Словения Украина	Хорватия, Чехия Финляндия Франция Швейцария Швеция Азия Вьетнам Израиль Индия Индонезия Иран Казахстан КНР Ливан Малайзия Пакистан Сингапур Таиланд Турция Южная Корея Япония	Америка Бразилия Канада Мексика Перу США Африка Алжир Камерун Египет Ливия Нигерия Марокко Тунис Южная Африка Австралия/ Океания Австралия Новая Зеландия
---	--	---





обучение и подготовка; C-XV — конструирование, анализ и производство сварных конструкций; C-XVI — сварка полимеров и технологии клейки; IAB — обучение, подготовка и аттестация персонала сварочного производства и сертификация сварочного производства и персонала; SC-AIR — неразъемные соединения для новых материалов и покрытий для авиастроения; SC-AUTO — автомобильный транспорт; SC-ENV — окружающая среда; SC-QUAL — управление качеством при сварке и родственными технологиям; SC-STAND — стандартизация; SC-UW — подводная сварка; SG-212 — физика сварки; SG-RES — стратегия исследований в сварке и сотрудничество. Таким образом, деятельность МИСа довольно полно охватывает область сварки во всей ее многогранности: исследования, обучение, практическое применение, стандарты, сотрудничество и т.п. Поэтому участие национальных делегаций в работе ассамблей МИСа является очень полезным, так как на таком форуме имеется возможность ознакомиться с со-



временным состоянием дел в той или иной области сварки, особенно по направлениям, по которым у себя на родине работы не проводятся в силу тех или иных причин. При этом наблюдается интересная зависимость: страны с развитым сварочным производством и наукой присылают на ассамблеи МИСа самые многочисленные делегации (Япония, Германия, США, а теперь и Китай). Это можно объяснить тем, что участие в работе ассамблей МИСа позволяет поддерживать и далее повышать достигнутый уровень развития сварочного производства и науки у себя в стране.

Во время торжественного открытия ассамблей происходит вручение различных международных премий за наиболее выдающиеся работы в области сварки и смежных технологий, а также за вклад в деятельность МИСа. В этом году были вручены Премия Генри Гранжон (Henry Granjon, Франция), Премия Андре Лероа (Andre Lerooy, Франция), Премия Ёшиаки Арата (Yoshiaki Arata, Япония), Медаль Томаса (Thomas Medal, США), Премия Артура Смита (Arthur Smith, Англия), Премия Евгения Патона (Украина) и Премия за лучшую работу, опубликованную в журнале «Welding in the World Award». В 2012 г. Международной Премией Евгения Патона был удостоен инженер Микаэл Щесны (Michael Szczesny, Германия) за выдающиеся заслуги в создании электронных источников питания для различных способов дуговой сварки. От имени МИСа и Национального комитета по сварке Украины премию вручил академик НАН Украины К.А. Ющенко.

Первые три дня работы 65-й ассамблеи МИСа были посвящены заседаниям комиссий, рабочих групп и других подразделений. Представители Украины приняли участие в работе комиссий I — VI, IX — XV, STAND (стандартизация), а также в работе Исследовательской группы SG-212.

После окончания работы 65-й ассамблеи МИСа состоялась международная конференция «Сварка в ремонте и продлении срока службы заводских конструкций (Welding for Repair and Life Extension of Plants and Infrastructures)» (12 – 13 июля 2012 г.), на которой было представлено около 40 докладов.

Очередная 66-я ассамблея МИСа состоится 11–17 сентября 2013 г. в Эссене (Германия). Указанные даты выбраны не случайно, так как с 15 сентября 2013 г. в этом городе начинает работу международная выставка-ярмарка «Сварка и Резка», которая проводится раз в 4 года, что предоставляет делегатам ассамблеи МИСа прекрасную возможность познакомиться с последними достижениями в этой области. Выставка продлится до 23 сентября 2013 г.

В.Е. Пономарев, канд. техн. наук

СЕМИНАР ПО СВАРКЕ И НАПЛАВКЕ ДЛЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА УКРАИНЫ.

26 июля 2012 г. состоялся семинар по сварке и наплавке для специалистов железнодорожного транспорта Украины, организованный Институтом электросварки им. Е.О. Патона и Опытным заводом сварочного оборудования института. Основная задача семинара – ознакомление сотрудников «Укрзалізниці» с последними разработками института в этой области.

В заседании семинара приняли участие ведущие специалисты различных управлений железнодорожного транспорта Украины, ученые и специалисты ИЭС и ОЗСО.

Открыл семинар зам. директора ИЭС им. Е.О. Патона академик НАН Украины К. А. Ющенко. Он приветствовал присутствующих и выразил уверенность, что семинар принесет несомненную пользу для его участников. Он отметил, что институт накопил богатый опыт в области сварки и смежных процессов и его сотрудники в состоянии решить любую из проблем, которые возникают на железнодорожном транспорте.

Затем с докладом выступил председатель правления ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона В. И. Степахно. В частности, он сказал, что опытный завод более пятидесяти лет совместно с научными отделами и ОКТБ ИЭС им. Е.О. Патона активно занимается разработкой и изготовлением различного сварочного и наплавочного оборудования, в том числе и для железнодорожного транспорта. В настоящее время завод освоил производство новых инверторных источников питания для ручной, полуавтоматической и автоматической сварки, наплавки и плазменной резки, полуавтоматов для сварки и наплавки сплошными и порошковыми проволоками, новых тракторов для автоматической сварки и др.

Директор ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона В. С. Романюк ознакомил присутствующих с основными направлениями деятельности конструкторско-технологического бюро института в области разра-

ботки технологических процессов сварки, сварочного оборудования и конструкторско-технической документации. ОКТБ практикует комплексный подход при решении конкретных, нестандартных производственных задач с использованием новейших сварочных технологий и оборудования. В последние годы для восстановления железнодорожных колес был разработан комплекс оборудования, который успешно используется на Восточно-Сибирской железной дороге РФ.

Заместитель руководителя отдела сварки давлением П. Н. Чвертко представил на семинаре доклад «Технологии и новое поколение оборудования для сварки давлением высокопрочных рельсов современного производства». Отдел давно и успешно занимается разработкой технологий и оборудования для контактной сварки рельсов. Это оборудование успешно эксплуатируется во многих странах. В последние годы в связи с увеличением скоростей и нагрузок на железнодорожном транспорте растет применение высокопрочных рельсов. В отделе для их сварки разработано оборудование нового поколения, которое успешно прошло производственную проверку.

Руководитель отдела сварочных материалов В. И. Галинич поделился опытом сварки рельсов закладным электродом. Технология может успешно применяться при сварке рельсов на криволинейных участках, при замене поврежденных участков рельсов без остановки движения поездов. Технология и оборудование для сварки закладным электродом использовались, в частности, при укладке рельсов для скоростного трамвая в Киеве.

Руководитель отдела наплавки И. А. Рябцев рассказал об опыте наплавки железнодорожных крестовин из стали 110Г13Л порошковой проволокой ПП-АН105. Разработанная порошковая проволока и технология наплавки позволяют восстанавливать детали, максимальный износ которых достигает 40 мм. Производственный опыт показал, что при такой толщине наплавленного слоя обеспечивается его высокое качество.

На семинаре были представлены и другие доклады специалистов ИЭС им. Е. О. Патона.

В демонстрационном зале ИЭС им. Е.О. Патона специалисты железнодорожного транспорта Украины имели возможность ознакомиться с последними разработками института. На опытном заводе сварочного оборудования им были представлены образцы оборудования, выпускаемого заводом.

И.А. Рябцев, д-р техн.наук



Ю. В. ДЕМЧЕНКО — 60



В августе исполнилось 60 лет старшему научному сотруднику Института электросварки им. Е. О. Патона Юрию Владимировичу Демченко. После окончания Киевского политехнического института в 1976 г. он начал трудовую деятельность на кафедре материаловедения и технологии

конструкционных материалов Киевского политехнического института. В 1979 г. перешел в ИЭС им. Е. О. Патона, учился в аспирантуре и здесь же защитил кандидатскую диссертацию.

Научная деятельность Ю. В. Демченко неразрывно связана с решением заданий металлургии, а именно разработкой принципов создания экономолегированных хорошо свариваемых сталей массового назначения и использования термической обработки толстолистового проката углеродистых сталей применительно к производству металлоконструкций ответственного назначения для современной грузоподъемной, горнодобывающей, дорожной и другой техники, а также строительства. Им были выполнены исследования по определению механизма действия кремния в металле на структуру и хладостойкость ЗТВ сварных соединений, научно обоснованы нормы химического состава низко- и малокремнистых углеродистых и низколегированных спокойных сталей повышенной прочности и перспективный марочный сортамент фасонного и сортового проката арматуры массового назначения с улучшенным комплексом свойств, в том числе свариваемости. Решены практические задачи сварки сталей с пониженным содержанием кремния. Всесторонне исследованы качество, однородность и служебные свойства новой металлопродукции.

При его активном участии совместно с Институтом черной металлургии НАН Украины организовано промышленное производство высококачест-

венной полосы и ленты из стали 08ЮТсп нк для изготовления сепараторов подшипников повышенной надежности. На МК «Азовсталь» и Алчевском МК внедрены полуспокойные стали 15Г2АФДпс и 20Г2АФДпс повышенной прочности для конструктивных ответственного назначения и облегченных шахтных крепей. На МК «Криворожсталь» осуществлен переход на новые полуспокойные стали марок 25Г2пс и 35Гпс для хорошо свариваемой арматуры.

При непосредственном участии Ю. В. Демченко изучены особенности одного из перспективных путей устранения дефицита сталей повышенной прочности при одновременной экономии легирующих элементов — термического упрочнения путем прерывистой закалки с последующим отпуском в проходных нормализационных печах. Результаты научных разработок и экспериментальных исследований положены в основу технических мероприятий по организации производства термочувствительного проката на МК «Азовсталь». За комплекс работ по этой теме Ю. В. Демченко в составе творческого коллектива молодых ученых был удостоен Республиканской премии имени Николая Островского в области науки и техники.

На нынешнем этапе деятельности приобретенные качества ученого, большой практический опыт, знание конструкционных материалов, умение применить прогрессивные разработки и новые организационные формы позволяют ему сегодня успешно организовывать и выполнять ремонтные работы на уникальных по массогабаритным характеристикам конструкциях на предприятиях ПАО «Интерпайп», ПАО «СКФ-Украина», ПАО «Полтавский ГОК», Киевский метрополитен (Украина), ОАО «Карельский окатыш», Московский метрополитен (Россия) и др.

Ю. В. Демченко является автором и соавтором более 60 научных трудов, из которых три монографии.

Юрий Владимирович пользуется заслуженным авторитетом в коллективе, среди коллег, благодаря высокому уровню компетентности и человеческим качествам.

Институт электросварки им. Е. О. Патона



ПАМЯТИ Я. М. ЮЗЬКИВА



23 июня 2012 г. после тяжелой болезни ушел из жизни бывший сотрудник ИЭС им. Е.О. Патона видный ученый в области сварки и стандартизации, кандидат технических наук Ярослав Михайлович Юзькив.

Родился Я. М. Юзькив 31 августа 1941 г. в Болехове Станиславской (ныне Ивано-Франковской)

области. В 1963 г. закончил механико-машиностроительный факультет Львовского политехнического института по специальности «Технология и оборудование сварочного производства». Работал инженером-технологом на заводах Ивано-Франковщины. Как офицер запаса призывался на службу в Советскую Армию. В 1972 г. поступил в очную аспирантуру при ИЭС им. Е. О. Патона (научный руководитель — д-р техн. наук, профессор А. Е. Аснис). Изучал вопросы свариваемости сталей повышенной прочности с нитридным упрочнением, разрабатывал и внедрял на многих предприятиях технологию их сварки. В 1977 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию.

В 1991 г. Я. М. Юзькив создал и возглавил в институте научно-исследовательскую лабораторию стандартизации в сварочном производстве. Под его руководством был разработан прогноз развития стандартизации и метрологии в сварочном производстве страны. Одновременно работал и в комиссии по стандартизации стран-членов СЭВ. При непосредственном участии Ярослава Михайловича был создан межгосударственный комитет стандартизации МТК 72 «Сварка и родственные процессы», ответственным секретарем которого он также являлся.

С 1992 г. и до последнего дня жизни Я. М. Юзькив работал в Украинском научно-исследовательском институте стандартизации, сертификации и информатики заместителем директора по научной

работе. С его непосредственным участием разработаны концепция государственной системы стандартизации, подготовлен Декрет Кабинета Министров Украины «О стандартизации и сертификации». Он принимал активное участие и в разработке основополагающего Закона Украины «О стандартизации».

Ярослав Михайлович являлся разработчиком методологических основ гармонизации национальных стандартов с международными, включая и европейские стандарты. Весом его вклад и в становление научно-технической терминологии, разработку основ формирования систем стандартизованных терминов. Он является автором свыше 60 научных работ.

Я. М. Юзькив успешно сочетал научную деятельность с большой организационной работой как заместитель директора института. Он являлся членом научно-технического совета и научно-технической комиссии по вопросам терминологии Государственного комитета стандартизации, метрологии и сертификации Украины, председателем Национальной комиссии стандартизации Международного института сварки, членом редколлегий журналов «Сварщик» и «Информационный вестник по охране труда». Свои знания он передавал другим сотрудникам, читая лекции по стандартизации. Ярослав Михайлович награжден почетным значком «За заслуги в стандартизации, метрологии и сертификации», а также рядом юбилейных медалей.

Ярославу Михайловичу были присущи ответственное отношение к своей работе, глубокое понимание государственной важности решаемых задач, научный анализ, широкий научно-технический кругозор, инициатива, организованность, требовательность, которая сочеталась с чуткостью, доброжелательностью в отношении своих подчиненных.

Светлая, добрая память о Ярославе Михайловиче как о Человеке, Ученом, Организаторе навсегда сохранится в сердцах всех, знавших его.

Институт электросварки им. Е. О. Патона
Общество сварщиков Украины

НОВЫЕ КНИГИ



МЕТАЛЛУРГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ И СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.

— Киев: Академперіодика, 2012. — 526 с. Твердый переплет, 200×290 мм.

Сборник включает 120 статей сотрудников отдела исследований физико-химических процессов в сварочной дуге Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, опубликованных ранее, преимущественно в журнале «Автоматическая сварка», которые обобщают полувековой опыт научно-исследовательской деятельности отдела. Представленные статьи охватывают широкий круг вопросов металлургии дуговой сварки плавлением и разработки сварочных материалов.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов, занимающихся изучением металлургии дуговой сварки, разработкой сварочных материалов и технологий их производства.



О.В. БІЛОЦЬКИЙ. ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНА РЕНТГЕНОГРАФІЯ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ У МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛАХ.

— Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2012. — 224 с. Твердый переплет, 165×235 мм (укр. яз.).

В монографии на основе системных исследований изложены впервые разработанные методические основы и результаты исследования особенностей кинетики фазовых превращений в лучах высокотемпературной рентгенографии металлических материалов. Кинематографические съемки осуществлены на оригинальных конструкциях рентгеновского оборудования. Это обеспечило возможность регистрации полиморфных превращений, диффузионных процессов и изучения температурно-временных условий последовательности образования и распада твердых растворов и химических соединений. Показана доминирующая роль и значение изменений химического состава и физического состояния фазовых составляющих сплавов во время термической и химико-термической обработки как средства управления их структурой и свойствами.

Для научно-технических работников, разрабатывающих новые материалы и изучающих их строение и свойства, а также преподавателей, аспирантов и студентов вузов соответствующих специальностей.



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И РЕНОВАЦИИ.

— Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2012. — 172 с. Мягкий переплет, 200×290 мм.

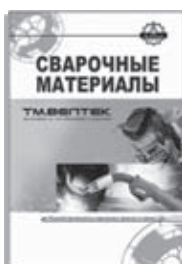
Сборник включает 38 статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» за период 2009–2011 гг., по проблемам ремонта, восстановления и реновации изделий ответственного назначения. Авторами статей являются известные в Украине ученые и специалисты в области сварки, наплавки, упрочнения, металлизации и других технологий ревитализации. Сборник предназначен для научных сотрудников, инженеров, технологов, конструкторов и аспирантов, занимающихся проблемами сварки и других родственных технологий обработки материалов.



ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО.

— Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2011. — 324 с. Мягкий переплет, 200×290 мм.

Сборник включает 70 статей, опубликованных в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за период 2005–2010 гг., по электрометаллургии, сварке титана и его сплавов. Авторами статей являются известные в Украине и за рубежом ученые и специалисты. Тематика статей посвящена созданию новых технологических процессов и оборудования для производства и сварки титана. Сборник предназначен для широкого круга инженеров, технологов, конструкторов, занятых в машиностроении, энергетике, строительстве, судостроении, металлургии и других отраслях промышленного производства, связанных с обработкой и потреблением титана; полезен также преподавателям и студентам высших учебных заведений.



СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.

— Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2011. — 216 с. Мягкий переплет, 200×290 мм.

Сборник включает 42 статьи, опубликованные в журнале «Автоматическая сварка» за период 2006–2010 гг., по проблемам разработки, изготовления и применения сварочных материалов, включая покрытые электроды, порошковые проволоки и ленты, сварочные флюсы, а также материалы для наплавки. Представлены обзоры состояния рынка сварочных материалов в Украине, России и Китае. Сборник предназначен для научных сотрудников, инженеров, технологов и аспирантов, занимающихся сварочными технологиями и их применением.



СТЫКОВАЯ СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ.

— Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2011. — 132 с. Мягкий переплет, 200×290 мм.

Сборник включает 24 статьи, опубликованные в журнале «Автоматическая сварка» за период 2005–2010 гг., по проблемам контактной стыковой сварки оплавлением и другим способам сварки давлением. Разделы сборника посвящены разработке технологии и оборудования для контактной сварки рельсов, стальных труб, арматуры и проката из высокопрочного алюминия. Рассматриваются также технологии прессовой сварки магнитоуправляемой дугой и сварки трением. Авторами статей являются известные в Украине и за рубежом ученые и специалисты в области сварки давлением. Сборник предназначен для научных сотрудников, инженеров, технологов, конструкторов и аспирантов, занимающихся проблемами сварки давлением сталей, алюминиевых и титановых сплавов, интерметаллидов и других материалов.



Б.Е. Патон, Л.М. Лобанов, А.Я. Недосека, С.А. Недосека, М.А. Яременко

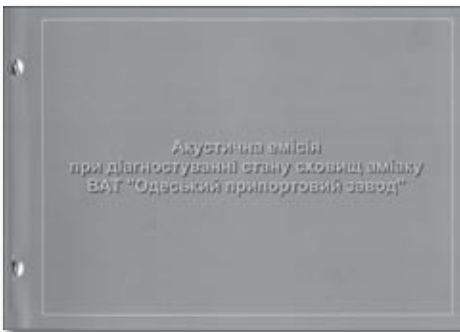
Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: Теория, методы, технологии, средства, применение.
— Киев: ИНДПРОМ, 2012. — 312 с.

Альбом наглядно описывает акустические явления в материалах, связанных с дискретным характером их разрушения при приложении нагрузки различных видов. Дискретный характер разрушения приводит к появлению импульсов упругих волн (квантов излучения), распространяющихся в материале от места разрушения и строго соответствующих характеру и виду разрушения или изменениям его структуры. Это явление получило название акустической эмиссии (АЭ). Показаны основные факторы, снижающие предельные усилия, при которых появляется АЭ. В альбоме также показано практическое применение АЭ при оценке состояния материалов конструкций, приведены разработанные на основе АЭ технологии контроля, необходимое оборудование и приборы. Показано, что в процессе непрерывного мониторинга контроль конструкций с оценкой их остаточного ресурса может осуществляться как на месте, так и дистанционно.



Альбом предназначен для специалистов, занимающихся технической диагностикой конструкций или проходящих переподготовку на курсах повышения квалификации, преподавателей соответствующих специальностей при чтении лекций и проведении практических занятий, а также студентов и аспирантов, изучающих явление акустической эмиссии и применяющих эти знания при практическом контроле работоспособности конструкций.

Альбом представляет интерес для широкого круга инженеров и научных работников технических специальностей.



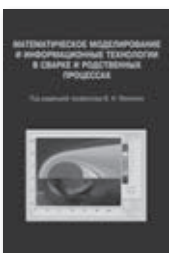
Акустична емісія при діагностуванні стану сховищ аміаку ВАТ «Одеський припортовий завод» / Під ред. проф. А.Я. Недосеки. — К.: ИНДПРОМ, 2012.— 96 с.

Альбом може бути корисним для широкого загалу інженерів та наукових співробітників технічних спеціальностей, а також студентів, аспірантів які вивчають явища акустичної емісії.

ТРУДЫ МЕЖДУНАРОДНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ,

проводимых ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины в ДГУ «Кацивели», Большая Ялта, Крым, Украина

«Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»,
2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012 гг. (в печати).



«Лазерные технологии в сварке и обработке материалов», 2003, 2005, 2007, 2009, 2011 гг.



Заказы на книги просьба направлять в редакцию журнала «Автоматическая сварка».
Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-54-84; E-mail: journal@paton.kiev.ua

ПОДПИСКА — 2012 на журнал «Автоматическая сварка»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
480 грн.	960 грн.	2700 руб.	5400 руб.	90 дол. США	180 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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



Подписка на электронную версию журнала «Автоматическая сварка» на сайте:
<http://www.rucont.ru>.

По подписке доступны выпуски журнала, начиная с 2009 г. в формате *.pdf.

Подписка возможна на отдельные выпуски и на весь архив, включающий все выпуски за 2009–2011 гг. и текущие выпуски 2012 г.

Подписка доступна физическим и юридическим лицам.

РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190×190 мм) 700\$
 - Вторая (550\$), третья (500\$) и четвертая (600\$) страницы обложки (200×290 мм)
 - Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм) 400\$
 - Вклейка А4 (200×290 мм) 340\$
 - Разворот А3 (400×290 мм) 500\$
 - 0,5 А4 (185×130 мм) 170\$
- Технические требования к рекламным материалам**
- Размер журнала после обрезки 200×290 мм

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

Все файлы в формате IBM PC

- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

Стоимость рекламы и оплата

- Цена договорная
- По вопросам стоимости размещения рекламы, свободной площади и сроков публикации просьба обращаться в редакцию

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
- Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок
- Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади
- Публикуется только профильная реклама (сварка и родственные технологии)
- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Контакты:

тел./факс: (38044) 200-82-77; 200-54-84
E-mail: journal@paton.kiev.ua

Подписано к печати 10.07.2012. Формат 60×84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 9,09. Усл.-отт. 10,09. Уч.-изд. л. 10,22 + 10 цв. вклеек. Печать ООО «Фирма «Эссе».

03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.