Международный научно-технический и производственный журнал

Автоматическая сварка

№ 9 (701)
Сентябрь 2011

Издается с 1948 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

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

ИЗДАТЕЛЬ:
Международная ассоциация «Сварка»

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

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

Свидетельство о государственной регистрации КВ 4788 от 09.01.2001

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

За содержание рекламных материалов редакция журнала ответственности не несет

Цена договорная

СОДЕРЖАНИЕ

НОВОСТИ 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Махненко В. И., Олейник О. И., Пальцевич А. П. Поведение водорода при ремонтной сварке магистральных трубопроводов под давлением 5

Туричин Г. А., Цыбульский И. А., Земляков Е. В., Валдайцева Е. А., Кузнецов М. В. Разработка технологии и оборудования для лазерной и лазерно-дуговой сварки алюминиевых сплавов 13

Ках П., Хильтунен Е., Мартикаинен Дж. Экспериментальное исследование склонности к горячему растрескиванию деформируемых алюминиевых сплавов 20

Тарасенко Ю. П., Бердник О. Б., Царева И. Н. Оптимизация режимов восстановительной термической обработки лопаток из сплава ХН65ВМТЮ после длительной эксплуатации 26

Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Свойства сплавов на основе железа для плазменно-порошковой наплавки уплотнительных поверхностей арматуры 31

Походня И. К., Карманов В. И., Явдощин И. Р., Губеня И. П., Хижун О. Ю., Хобта И. В. Дисперность частиц и валентность марганца в сварочным аэрозоле 36

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Патон Б. Е., Лакомский В. И., Брагинец В. И. Сварные электрические контакты разнородных проводников 40

Нестеренков В. М., Бондарев А. А., Архангельский Ю. А., Загорников В. И. Электронно-лучевая сварка корпусов буровых долот с модифицированием металла шва цирконием 47

Похмурский В. И., Студент М. М., Гвоздецкий В. М., Похмурская А. В. Порошковые проволоки серии ФМИ для электродугового напыления покрытий (Обзор) 52

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Рыжков С. С., Блинцов В. С., Егоров Г. В., Жуков Ю. Д., Квасницкий В. Ф., Кошкин К. В., Кривцун И. В., Некрасов В. А., Севрюков В. В., Солониченко Ю. В. Создание универсальных транспортных судов и средств океанотехники 58

ХРОНИКА

Всеукраинский семинар-совещание по профессиональной подготовке сварщиков 60
Создание Китайско-украинского института сварки им. Е. О. Патона 62
Международная конференция по сварочным материалам стран СНГ 63
12-я Всемирная конференция по титану «Ti–2011» 64
Международная научно-техническая конференция в Нижнем Тагиле 65
Ежегодная ассамблея МИС 67
VIII Международный конкурс сварщиков в Украине 68
В. Н. Липодаеву — 70 69
В. М. Нестеренкову — 60 70
Наши поздравления! 71
Ученый, изобретатель, инженер-конструктор (к 100-летию со дня рождения Г. З. Волошкевича) 71
ИНФОРМАЦИЯ 74

© НАН Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, МА «Сварка», 2011

International Scientific-Technical and Production Journal

Avtomaticheskaya Svarka

№ 9 (701)
September 2011
Published since 1948

EDITORIAL BOARD:
Editor-in-Chief
B. E. PATON

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

THE INTERNATIONAL
EDITORIAL COUNCIL:

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

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

PUBLISHER:
International Association «Welding»

Address of Editorial Board:
11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (38044) 200 63 02, 200 82 77
Fax: (38044) 200 54 84, 200 82 77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:
E. N. Kazarova, T. V. Yushtina
Electron galley:
I. R. Naumova,
I. V. Petushkov, A. I.Sulima

State Registration Certificate
KV 4788 of 09.01.2001

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

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

CONTENTS

NEWS 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Makhnenko V. I., Oleinik O. I., Paltsevich A. P. Behaviour of hydrogen in repair welding of pressure main pipelines 5
Turichin G. A., Tsybulsky I. A., Zemlyakov E. V., Valdaitseva E. A., Kuznetsov M. V. Development of the technology and equipment for laser and laser-arc welding of aluminium alloys 13
Kah P., Hiltunen E., Martikainen J. Experimental investigation of hot cracking susceptibility of wrought aluminium alloys 20
Tarasenko Yu. P., Berdnik O. B., Tsaryova I. N. Optimisation of parameters of reduction heat treatment of blades of alloy KhN65VMTYu after long-time operation 26
Pereplyotchikov E. F., Ryabtsev I. A. Properties of iron-base alloys for plasma-powder cladding of sealing surfaces of different-application fittings 31
Pokhodnya I. K., Karmanov V. I., Yavdoshchin I. R., Gubenya I. P., Khizhun O. Yu., Khobta I. V. Dispersion of particles and valence of manganese in welding fumes 36

INDUSTRIAL

Paton B. E., Lakomsky V. I., Braginets V. I. Welded electric contacts in dissimilar conductors 40
Nesterenkov V. M., Bondarev A. A., Arkhangelsky Yu. A., Zagornikov V. I. Electron beam welding of bodies of drill bits with zirconium modification of the weld metal 47
Pokhmursky V. I., Student M. M., Gvozdetsky V. M., Pokhmurskaya A. V. Flux-cored wires of the FMI series for electric arc spraying of coatings (Review) 52

BRIEF INFORMATION

Ryzhkov S.S., Blintsov V.S., Egorov G.V., Zhukov Yu.D., Kvastnitsky V.F., Koshkin K.V., Krivtsun I.V., Nekrasov V.A., Sevryukov V.V., Solonichenko Yu.V. Development of versatile transport ships and ocean engineering facilities 58

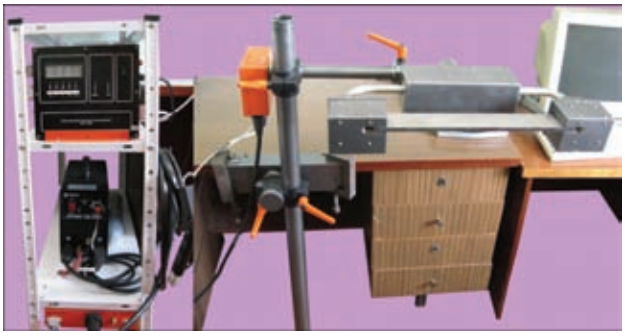
NEWS

All-Ukrainian seminar-meeting on professional training of welders 60
Establishment of the E.O.Paton Chinese-Ukrainian Institute of welding 62
International Conference on welding consumables of CIS countries 63
12th World Conference on titanium «Ti-2011» 64
International Scientific-Technical Conference in Nizhniy Tagil 65
Annual Congress of IIW 67
VIII International competition of welders in Ukraine 68
V. N. Lipodaev is 70 69
V. M. Nesterenkov is 60 70
Our congratulation 71
Scientist, inventor, engineer-designer (towards the 100-anniversary of G. Z.Voloshkevich) 71
INFORMATION 74

Journal «Avtomaticheskaya Svarka» is published in English under the title ***«The Paton Welding Journal»***
Concerning publication of articles, subscription and advertising, please, contact the editorial board.

© NAS of Ukraine, PWI, International Association «Welding», 2011

ТРЕНАЖЕР СВАРЩИКА



В Институте электросварки им. Е. О. Патона разработан тренажер, с помощью которого осуществляется обучение на реальных процессах ручной дуговой сварки покрытыми электродами (ММА) и ручной сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов (ТИГ) с подачей присадочной проволоки и без нее, а также контроль и документирование основных параметров режимов сварки на оптическом, магнитном и бумажном носителях.

Тренажер сварщика ТСДС-06М предназначен для применения в качестве технического средства обучения, тренировки, повышения квалификации, тестирования, допускного контроля и аттестации сварщиков дуговой сварки.

Тренажер ТСДС-06М состоит из:

– манипулятора-позиционера, который предназначен для крепления свариваемого образца и его позиционирования в различных пространственных положениях — нижнем, вертикальном, потолочном, наклонном, горизонтальном на вертикальной плоскости;

– блока технологического интерфейса, обеспечивающего оперативный контроль, регистрацию и обработку данных измеряемых основных параметров процесса дуговой сварки;

– источника питания сварочной дуги постоянного тока инверторного типа;

– сварочного инструмента: держателя для ручной дуговой сварки и горелки для газоэлектрической сварки неплавящимся электродом в аргоне;

– адаптера, обеспечивающего подключение инструмента к блоку технологического интерфейса и к источнику питания;

– головных телефонов (наушники) для обеспечения речевой подсказки при сварке;

– персонального компьютера;

– специализированного программного обеспечения.

ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯТОР ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ СВАРОЧНЫЙ

В Институте электросварки им. Е. О. Патона разработан аппарат нового поколения ПАТОНМЕД™ ЕКВЗ-300, предназначенный для выполнения разного рода хирургических вмешательств в медицине и ветеринарии. Он на современном уровне решает задачи, которые стоят перед хирургией, и позволяет реализовать на практике технологию высокочастотной сварки мягких живых тканей.

Благодаря новейшим инженерным решениям при осуществлении операций с применением аппарата ПАТОНМЕД™ ЕКВЗ-300 обеспечивается:

- надежность соединения тканей без применения шовных материалов, скобок, клеев и др.;
- отсутствие некроза тканей и инородных тел в ране;
- герметичность соединений;
- снижение потерь крови, а также уменьшение длительности операций (скорость выполнения операции повышается на 30–40 %);
- отсутствие нагноений;
- аккуратность и точность рассечения тканей;
- надежный гемостаз;
- сокращение периода реабилитации в послеоперационный период;
- быстрое, удобное и надежное проведение хирургических вмешательств;
- упрощение проведения операций;

• отсутствие дыма во время проведения операций, а также других факторов, вредно влияющих на здоровье хирурга.

Аппарат ПАТОНМЕД™ ЕКВЗ-300 может быть применен для проведения операций во многих областях хирургии, которые включают: общую абдоминальную хирургию, травмотологию, пульмонологию, проктологию, урологию, маммологию, отоларингологию, гинекологию, васкулярную хирургию, операции на паренхиматозных органах, офтальмологию и другие области.

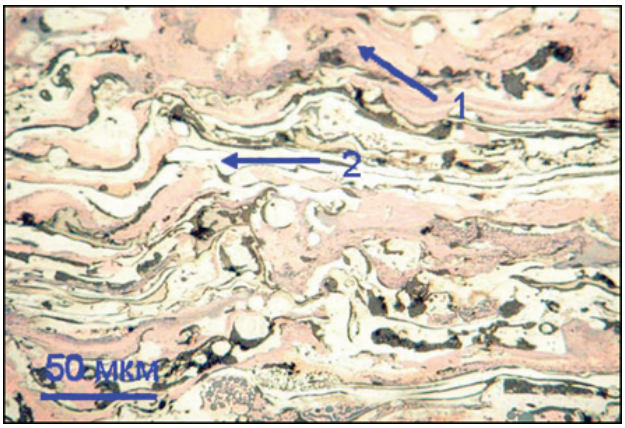
ПАТОНМЕД™ ЕКВЗ-300 имеет четыре основных режима работы: резание, коагуляция, сварка ручная и автоматическая. В каждом из режимов предусмотрена широкая возможность выбора алгоритмов работы и рабочих парметров процесса в зависимости от конкретных задач.

Управление источником осуществляется микроконтроллером по специальным программам, которые могут изменяться по желанию пользователя, предусмотрена также возможность введения дополнительных программ по требованиям хирургов.

Аппарат комплектуется базовым набором электрохирургических инструментов (пинцеты и зажимы). Может быть укомплектован дополнительными инструментами для открытой и лапароскопической хирургии, которые изготавливаются в соответствии с потребностями Заказчика.

ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ МНЛЗ

Отделом защитных покрытий ИЭС им. Е. О. Патона ведутся работы в области газотермического напыления покрытий с псевдосплавной структурой, которые обладают высокими износостойкими и антифрикционными свойствами. С целью защиты от абразивного износа поверхности медных изделий разработана серия покрытий, наносимых методом электродуговой металлизации, структура которых состоит из смеси частиц меди со вторым компонентом, обеспечивающим стойкость покрытия к абразивному износу (например, NiCr, Mo, Ti и др.). Одним из объектов применения этих покрытий служат плиты кристаллизаторов МНЛЗ. Наличие меди в структуре покрытий (~ 50 мас. %) обеспечивает сохранение достаточно высокой теплопроводности покрытия (до 200…300 Вт/(м·град)), что является важным фактором в условиях работы МНЛЗ. Толщина покрытий, наносимых для этой цели, составляет до 2 мм. Горячая твердость покрытия, например, Cu–Nicr при 20…400 °С превышает твердость меди в 3 раза, прочность его на разрыв составляет 240 МПа. Стойкость псевдосплавных покрытий к абразивному изнашиванию при 300…350 °С превышает износостойкость чистой меди от 5 до 100 раз в зависимости от состава покрытия. Ведутся работы по испытанию разработанных покрытий в реальных условиях эксплуатации МНЛЗ.



Покрытие 57 мас. % Cu — 43 мас. % NiCr: 1 — Cu; 2 — NiCr

ЕВРОПЕЙСКОЕ КАЧЕСТВО ООО «ФРОНИУС УКРАИНА»

По результатам аудита 11–13 июля 2011 г. компанией ООО «Фрониус Украина» был получен Сертификат соответствия международным стандартам качества 180 9001:2008, подтвержденный международным органом по сертификации Систем менеджмента качества Quality Austria (Австрия), которая является партнером и ассоциированным членом всемирно известной организации IQNet (Швейцария).

Этот сертификат означает не только то, что производимое ООО «Фрониус Украина» сварочное оборудование соответствует международным стандартам качества, но и свидетельствуют о наличии высококвалифицированных сотрудников, передовых технологий и высокой культуры производства.

УДК 621.791:621.643.1/.2

ПОВЕДЕНИЕ ВОДОРОДА ПРИ РЕМОНТНОЙ СВАРКЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **О. И. ОЛЕЙНИК**, инж., **А. П. ПАЛЬЦЕВИЧ**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализирована возможность поступления диффузионного водорода из транспортируемого по газопроводу углеводородного газа при проведении ремонтной сварки на действующем трубопроводе. Показано, что при парциальном давлении диффузионного водорода вблизи внутренней поверхности стальной трубы в пределах 0,10…0,75 МПа при остаточной толщине стенки в зоне дефекта выше 5 мм повышение параметра риска образования водородных (холодных) трещин не превышает 5…11 %. Приведены значения экспериментальных измерений потока диффузионного водорода через стенку трубы на действующих трубопроводах.

Ключевые слова: дуговая ремонтная сварка, действующие газопроводы, диффузионный водород, стенка газопровода, водородные трещины, риск образования

При ремонтной сварке магистральных газопроводов на жестких режимах (низкой погонной энергии) характерной проблемой является риск появления холодных (водородных) трещин, на образование которых существенное влияние оказывает диффузионный водород в металле сварного соединения. Использование присадочного материала с низким содержанием потенциального водорода в сочетании с надежной защитой сварочной ванны от окружающей среды позволяет существенно снизить содержание диффузионного водорода в зоне термического влияния (ЗТВ). Однако остается еще один источник диффузионного водорода — транспортируемый в трубопроводе природный газ, в котором водород содержится в виде химических соединений (метан, пропан, этан, бутан) либо в молекулярном виде H_2 и не диффундирует в металл стенки трубопровода. Однако в зависимости от давления и температуры природный газ может находиться в двухфазном состоянии, т. е. наряду с газовой фазой существует еще жидкая. На рис. 1 приведена диаграмма двухфазного состояния природного газа, из которой следует, что при рабочих давлениях около 7,5 МПа и температурах 40…50 °С жидкая фаза составляет примерно 20 % объема смеси. В жидкой фазе свободный водород может растворяться в атомарном виде. Учитывая высокую степень турбулизации газа в магистральном газопроводе, более высокую плотность жидкой фазы и более низкую температуру по сечению трубы у ее стенок, можно считать, что жидкая фаза концентрируется у стенок трубы и соответственно из жидкой фазы растворенный атомарный водород диффундирует в металл стенки трубы. В стационарных условиях транспорта природного газа поток водорода J через стенку можно представить в виде [1]

$$J = -D\frac{\partial C}{\partial r} \quad (\text{мл/(см}^2\cdot\text{с)}), \tag{1}$$

где D — средний коэффициент диффузии водорода через металл стенки трубы; $C(r)$ — концентрация диффузионного водорода по толщине стенки трубы (координата r).

При стационарном потоке и малых толщинах стенки

$$J \approx \frac{C(R_н) - C(R_в)}{\delta}D, \tag{2}$$

где $C(R_н)$ — концентрация водорода на наружной поверхности $r = R_н$; $C(R_в)$ — то же на внутренней поверхности трубы $r = R_в$.

Полагая, что $C(R_н) \approx 0$, а $C(R_в) \approx \sqrt{P_{H_2}}K(T)$ по закону Сивертса, где P_{H_2} — парциальное давление водорода на поверхности $r = R_в$, ата; $K(T)$

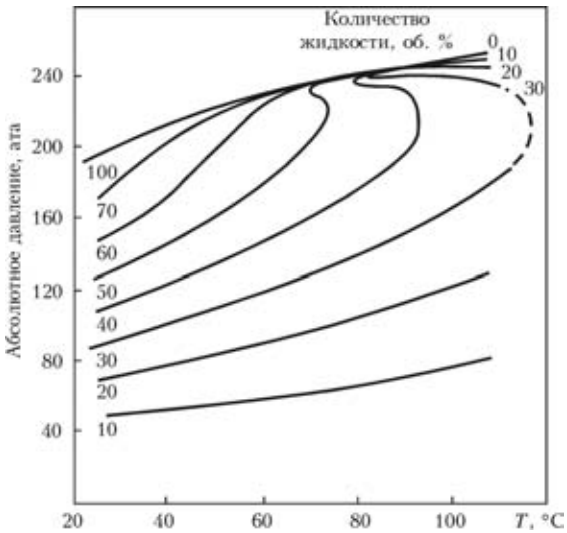


Рис. 1. Диаграмма фазового состояния, характерная для природной углеводородной смеси

© В. И. Махненко, О. И. Олейник, А. П. Пальцевич, 2011

Таблица 1. Расчетные значения $J\delta$ в зависимости от T и $P_н$

T, °C	$D\cdot10^6$, см^2/с	K, мл/(100 г·ата$^{1/2}$)	$J\delta\cdot10^3$, мл/(см^2·ч), при $P_н$, ата				
			1	4	6	8	10
20	0,20	1,9	0,1069	0,214	0,262	0,302	0,338
40	0,46	1,8	0,2320	0,464	0,570	0,659	0,736
60	0,98	1,7	0,4680	0,938	1,147	1,325	1,482

— растворимость водорода в металле стенки трубы при температуре T (рис. 2), см^3/(100 г·ата$^{1/2}$), получаем

$$C(R_в) = J\frac{\delta}{D(T)} \text{ (мл/100 г)} \quad (3)$$

или в более часто употребляемой размерности

$$\bar{C}\ (R_в) = J\frac{\delta}{D(T)}\frac{100\text{ г}}{\gamma} \text{ (мл/100 г)},$$

где γ — удельный вес стали стенки трубы (7,8 г/см^3).

Из данных на рис. 2 (закон Сивертса) следует, что при одном и том же парциальном давлении водорода $P_н$ за счет увеличения температуры металла при ремонтной сварке концентрация водорода $C(R_в)$ может значительно возрастать на внутренней поверхности трубы и, следовательно, по толщине стенки. Естественно, это справедливо при условии, что $P_н$ остается неизменным, т. е. конвективный подвод водорода в пристеночной области достаточно быстро компенсирует его диффузионный отвод в стенку трубы.

Использовав данные из [2, 3] относительно величины D при температуре T стенки трубы в виде

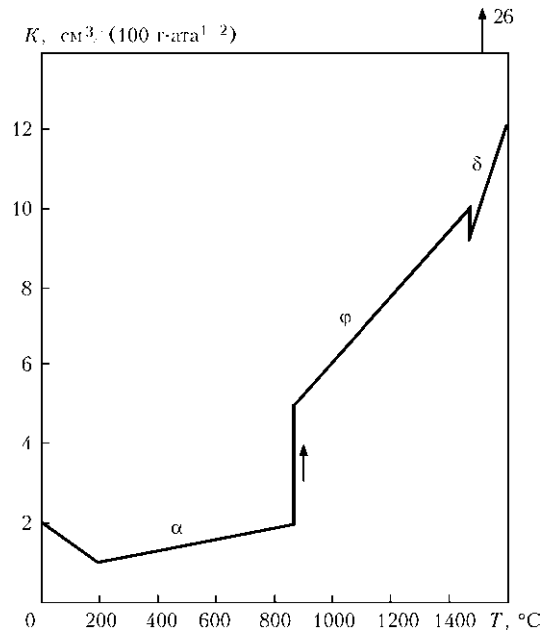


Рис. 2. Влияние температуры на растворимость водорода K в железе

$$D(T) = 0{,}12\exp\left(-\frac{3900}{T+273}\right),\ T < 200\ °\text{C},$$

получим из (1)–(3) с учетом данных рис. 2 при $20 \le T \le 80$ °C зависимость от $P_н$ величины $J\delta\cdot3600$, мл/(см·ч) (табл. 1), где

$$J\delta = K\sqrt{P_н}D\frac{\gamma}{100}\cdot3600\ \text{(мл/(см}^2\text{·ч))}. \quad (4)$$

Из данных табл. 1 видно, что при δ = 1 см величина потока водорода J с площади 1 см^2/ч существенно зависит от температуры стенки, и при T = 40 °C и $P_н$ =1,0 ата не превышает $0{,}232\cdot10^{-3}$ мл/(см^2·ч), а при $P_н$ =10 ата она не превышает $0{,}736\cdot10^{-3}$ мл/(см^2·ч), т. е. нужна достаточно чувствительная аппаратура для регистрации таких потоков и соответственно определения величин $P_н$ и $C(R_в)$, особенно в пределах $P_н$ < 5 ата и T < 40 °C.

В общем объеме перекачиваемого газа эти потери через стенку трубы 1420×20 мм при давлении P = 75 ата, $P_н$ = 8 ата и скорости транспортировки v = 10 м/с = 36000 м/ч составляют (T = 80 °C) всего лишь $0{,}25\cdot10^{-10}$ %, т. е. поставщиков газа мало интересуют.

В этой связи задачей данной работы является привлечение внимания исследователей к проблеме наводораживания стенки трубопровода за счет потока диффузионного водорода из транспортируемых углеводородов. Отметим, что в зарубежной литературе этот вопрос также обсуждается достаточно активно [4 и др.]. Поэтому в данной работе рассмотрено влияние $P_н$ на распределение диффузионного водорода при сварочном нагреве в зоне утонения стенки трубы в зависимости от ее толщины в районе сварочного нагрева при выполнении первого прохода дуговой сваркой на режиме I = 90 А, U = 24 В, $v_{св}$ = 0,2 см/с. Материал трубы — сталь типа 17Г1С.

Распределение водорода следует рассматривать с учетом распределения микроструктуры металла и его напряженного состояния в зоне соединения при сварочном нагреве. Высокий уровень напряжений при рассматриваемой ремонтной сварке под давлением в металле ЗТВ достаточно очевиден, а что касается микроструктурных изменений, то их распределение имеет достаточно локальный характер и требует соответствующей увязки с распределением диффузионного водорода.

При расчетах использовали разработанную в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины компьютерную систему «ArcWeldSys» [1, 3], с помощью которой для среднего сечения вдоль наплавленного прохода z = const в плоскости x, y путем последовательного прослеживания во времени t (начиная с момента t = 0) прохождения дугой данного сечения определяли температурное поле $T(x, y,$

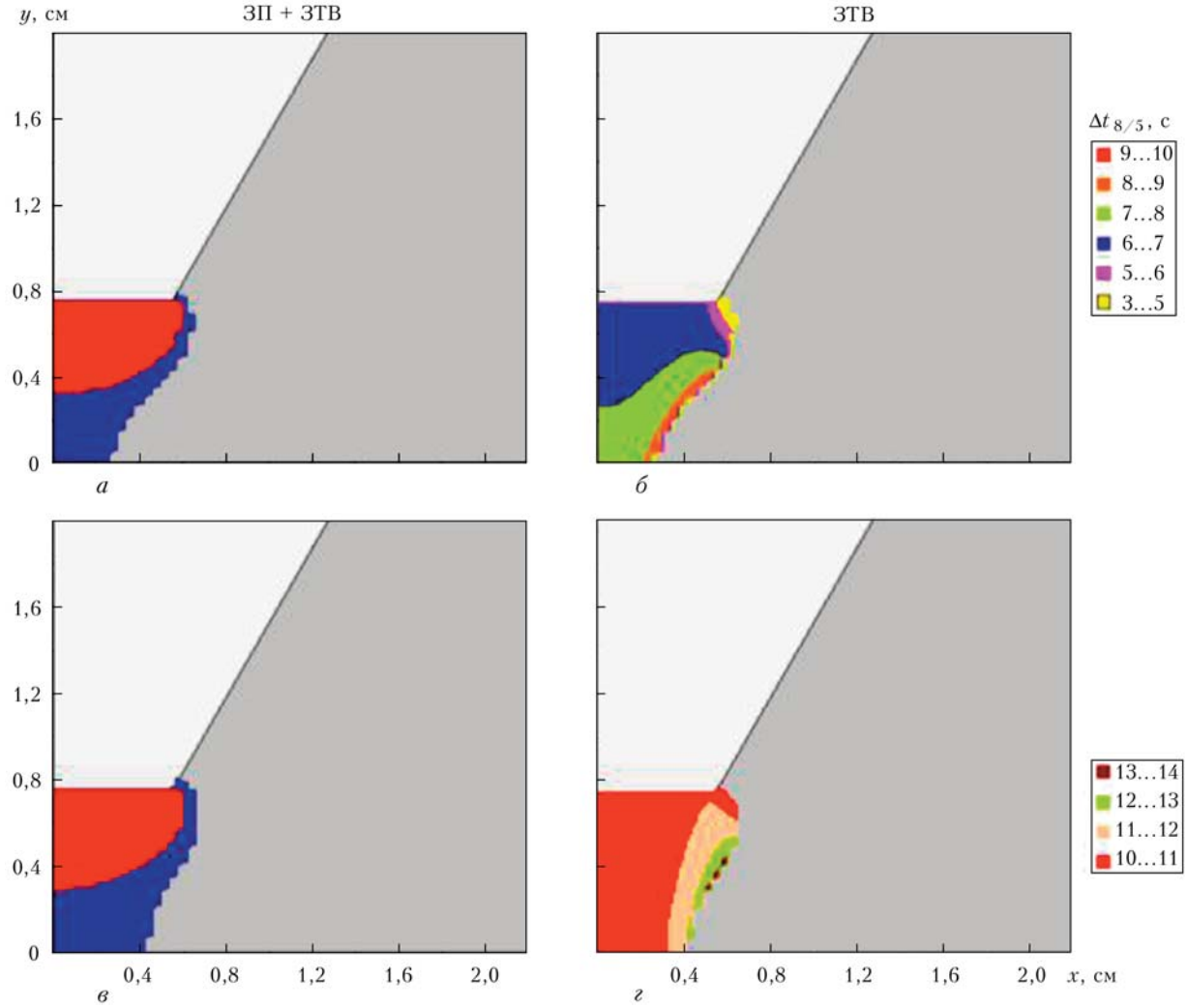


Рис. 3. Результаты расчета размеров ЗП и ЗТВ (*а*), $\Delta t_{8/5}$ (*б*) для первого прохода дуговой заварки канавочного дефекта вдоль окружности трубы при δ_{min} = 5 мм, $P_н$ = 7,5 ата и скорости газа в трубе 6 м/с (без подогрева) и то же, но при подогреве 150 °С (*в*, *г*)

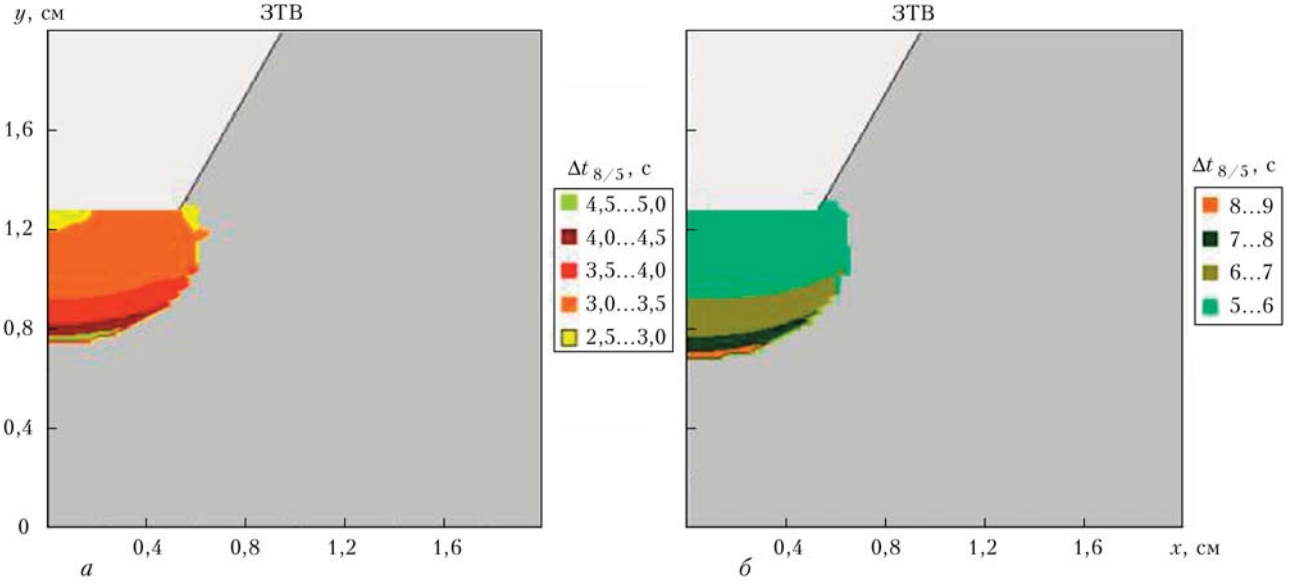


Рис. 4. Время пребывания металла ЗТВ при охлаждении $\Delta t_{8/5}$ для зоны толщиной δ_{min} = 10 мм, T_0 = 20 (*а*), 150 °С (*б*)

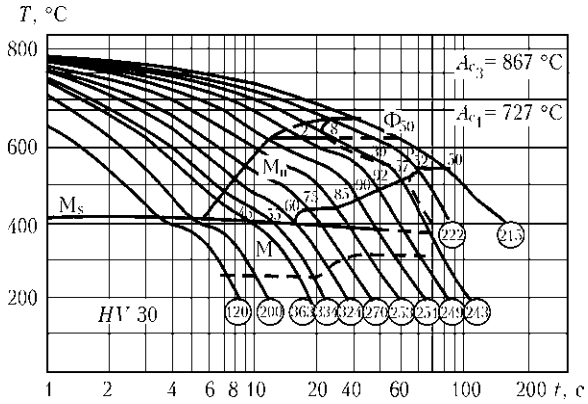


Рис. 5. Диаграмма АРА для стали типа 17Г1С

Таблица 2. Величины $\Delta t_{8/5}$ и объемная доля составляющих микроструктуры в металле ЗТВ для четырех вариантов

Параметр	Вариант			
	1 (рис. 3, *а*, *б*)	2 (рис. 3, *в*, *г*)	3 (рис. 4, *а*)	4 (рис. 4, *б*)
$\Delta t_{8/5}$, с	7...8	11...12	4...5	6...8
$V_М$, об. %	35...40	25...30	55...60	50...40
$V_Б$, об. %	65...60	75...70	45...40	50...60

z); зону плавления (ЗП) основного металла, характеризуемую изотермами максимальных температур $T_{max}(x, y) = T_L$, $T_{max}(x, y) = T_S$, где T_L, T_S — соответственно температуры ликвидуса (около 1490 °С) и солидуса (около 1420 °С); зону микроструктурных изменений, характеризуемую изотермой $T_{max}(x, y) = 800$ °С. В зоне ЗТВ вычисляли $\Delta t_{8/5}$ — время пребывания металла ЗП и ЗТВ в интервале температур 800…500 °С при охлаждении. На рис. 3 приведены расчетные данные, связанные с нагревом в зоне с минимальной толщиной металла δ_{min} = 5 мм без предварительного подогрева, т. е. T_0 = 20 °С и с подогревом до T_0 = 150 °С. Учитывали скорость движения газа в трубе на уровне 6 м/с и соответственно коэффициент теплообмена на внутренней поверхности [5], равный 0,05 Дж/(см^2·с·°С). На рис. 4 приведены расчетные данные $\Delta t_{8/5}$ для зоны с минимальной толщиной δ_{min} = 10 мм без предварительного подогрева и с подогревом до T_0 = 150 °С.

В табл. 2 приведены расчетные данные $\Delta t_{8/5}$ для четырех вариантов, которые в сочетании с диаграммой АРА [6] для стали 17Г1С на рис. 5 позволяют судить о количестве мартенсита $V_М$ и бейнита $V_Б$ в микроструктуре металла ЗТВ при охлаждении. Эти данные показывают, что микроструктурное состояние в зоне сварочного наг-

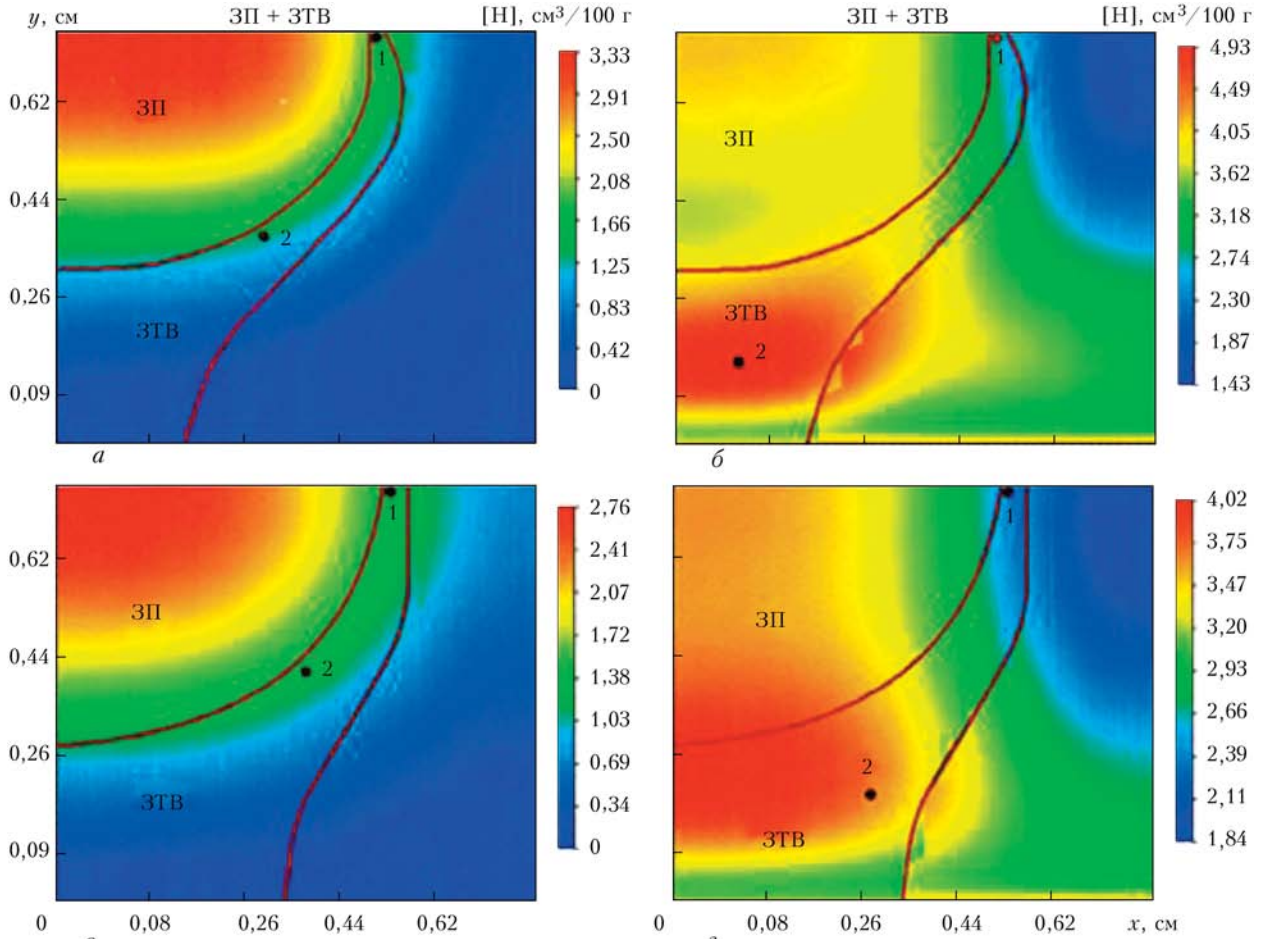


Рис. 6. Распределение диффузионного водорода в поперечном сечении первого прохода при δ_{min} = 5 мм в момент времени *t* = 98 с при P_{H_2} = 0 (*а*, *в*) и P_{H_2} = 7,5 ата (*б*, *г*) при T_0 = 20 (*а*, *б*) и 150 °С (*в*, *г*) в ЗП и ЗТВ

рева рассматриваемой стали при ремонтной сварке является достаточно благоприятным с позиций образования холодных трещин при наличии соответствующего содержания диффузионного водорода в металле ЗТВ (условие высоких растягивающих напряжений при рассматриваемой ремонтной сварке под давлением всегда соблюдается). Расчетные данные приведены ниже.

На рис. 6–9 приведена кинетика изменения во времени t концентрации водорода в поперечном сечении шва для двух толщин стенки трубы в зоне дефектов (сварки) при P_{H_2} = 0 и P_{H_2} = 7,5 ата при содержании его в наплавленном металле 10 см^3/100 г. Видно, что при рассматриваемом сварочном нагреве в зоне малых толщин стенки трубы (см. рис. 6, *а*, *б*) и интенсивном восстановлении парциального давле-

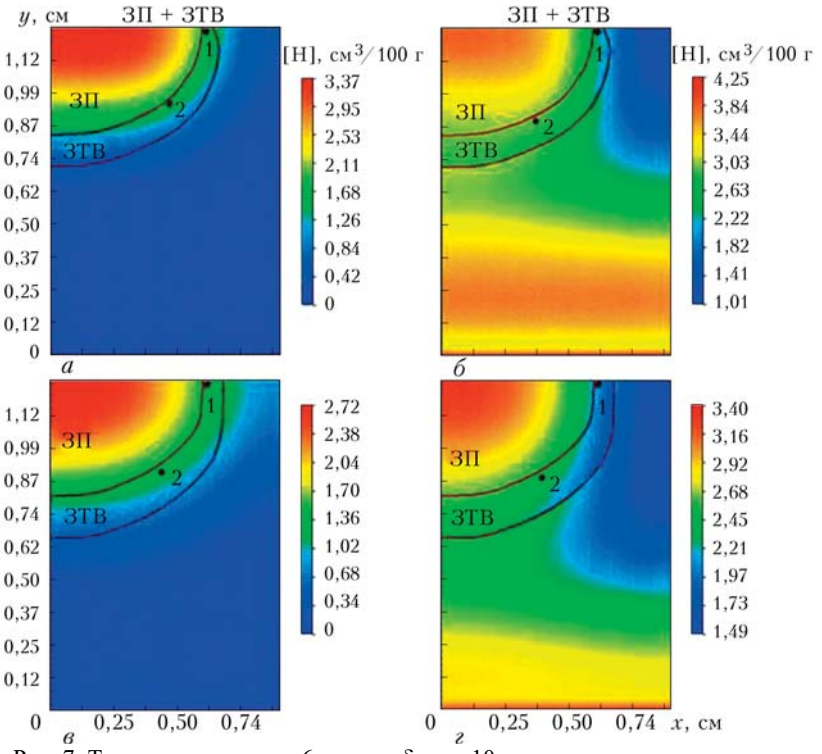


Рис. 7. То же, что и на рис. 6, но при δ_{min} = 10 мм

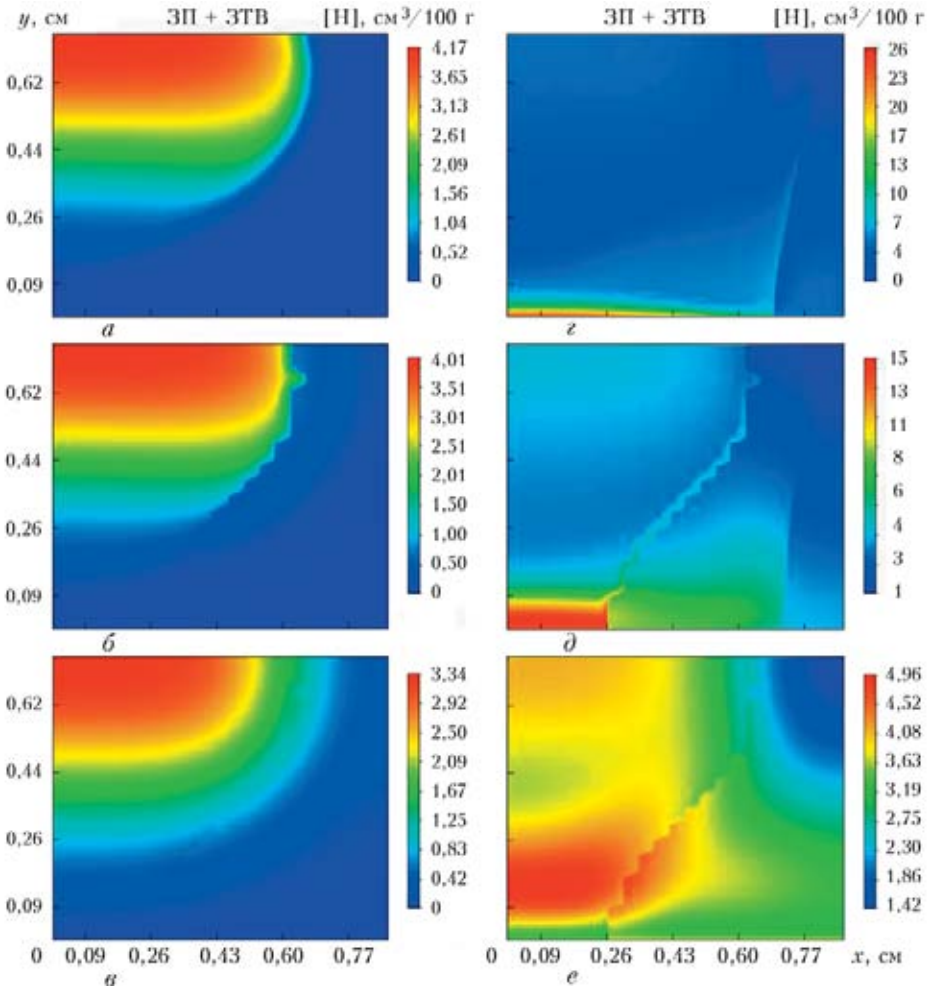


Рис. 8. Концентрация диффузионного водорода при δ_{min} = 5 мм и T_0 = 20 °С в различные моменты времени t = 2 (*а*, *г*), 10 (*б*, *д*) и 58 с (*в*, *е*) с момента прохождения данного сечения источником сварочного нагрева при P_{H_2} = 0 (*а–в*) и 7,5 ата (*г–е*) в ЗП и ЗТВ

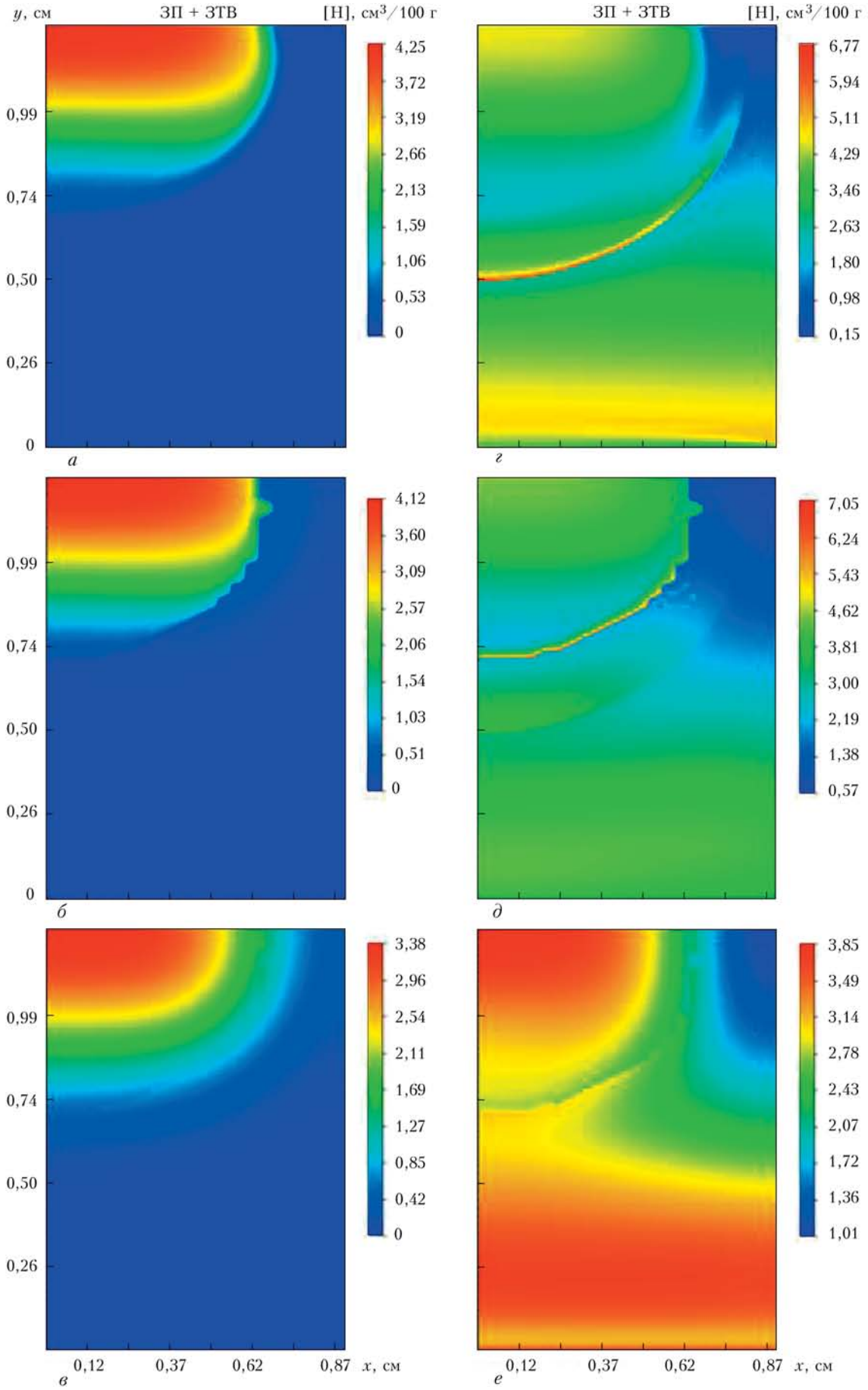


Рис. 9. То же, что на рис. 8, но при δ_{min} = 10 мм

ния водорода P_{H_2} = 7,5 ата внутри трубы в зоне локального нагрева стенки происходит значительное насыщение металла диффузионным водородом (концентрация достигает значений около 26 см^3/100 г) по сравнению с вариантом, когда P_{H_2} = 0 и соответствующая концентрация водорода достигает значений примерно 4 см^3/100 г. Однако при охлаждении металла эта высокая концентрация водорода резко снижается и уже при t = 58 с она для обоих случаев отличается не столь существенно.

Увеличение δ_{min} до 10 мм (см. рис. 9, *а*, *б*) заметно снижает влияние потока водорода из трубы при P_{H_2} = 7,5 ата на распределение последнего в металле ЗТВ, поскольку эта зона расположена заметно дальше от внутренней поверхности трубы. В итоге максимальная концентрация достигает не больше 7 см^3/100 г (рис. 9, *б*) по сравнению с 26 см^3/100 г на рис. 8, *б*.

Что касается условий образования холодных трещин, то анализ данных на рис. 6, 7 и табл. 2 позволяет сделать следующие выводы.

Для варианта 1 (см. рис. 3, *а*, *б*) в металле ЗТВ при $\Delta t_{8/5}$ = 3…5 с в точке 1 при 100 % V_M содержание диффузионного водорода [H] ≈ 2,0 см^3/100 г, а при $\Delta t_{8/5}$ = 7…8 с и 35 % V_M [H] ≈ 1,5 см^3/100 г (см. рис. 6, *а*, точка 2), т. е. наиболее острые условия по водороду наблюдаются в металле ЗТВ в углу соединения поверхности металла сварного шва с основным металлом (точка 1).

Согласно [7] показатель чувствительности

$$\wp = 12P_{см} + \log H, \qquad (5)$$

где

$$P_{см} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5\,B; \qquad (6)$$

H — содержание диффузионного водорода в наплавленном металле.

Для рассматриваемой стали (см. рис. 5) при P_{H_2} = 0 $P_{см}$ = 0,272; соответственно для точки 1 на рис. 6, *а* P_1 = 4,264. В случае P_{H_2} = 7,5 ата (рис. 6, *б*) при той же микроструктуре локальная концентрация диффузионного водорода $[H]_{лок}$ заметно изменяется: в точке 1 $[H]_{лок}$ = 3,0 см^3/100 г, в точке 2 [H] = 4,9 см^3/100 г. Соответственно эквивалентную величину $H_{экв}$ для формулы (5) с учетом линейной зависимости результатов на рис. 6, 7 от содержания водорода в наплавленном металле (10 см^3/100 г) можно определить по зависимости

$$H_{экв} = 10\ см^3/100\ г\ \frac{[H]_{лок}(7{,}5)}{[H]_{лок}(0)}, \qquad (7)$$

где $[H]_{лок}(7{,}5)$, $[H]_{лок}(0)$ — соответственно локальные концентрации в точках 1, 2 при P_{H_2} = 7,5 и P_{H_2} = 0 ата.

В табл. 3 для рассматриваемых на рис. 6, 7 вариантов 1–4 приведены соответствующие исходные данные по микроструктуре и локальным значениям концентрации водорода $[H]_{лок}(P_н)$ в точках 1, 2 и результаты расчетов по (5)–(7), демонстрирующие степень возможного влияния поступления диффузионного водорода в металл ЗТВ на риск образования холодных (водородных) трещин.

Из приведенных данных можно сделать вывод, что дополнительный источник диффузионного водорода, связанный с транспортируемым по трубопроводу природным газом, при ремонтной сварке под давлением может приводить при малых δ_{min} к существенному насыщению зоны сварочного нагрева диффузионным водородом в интервале высоких температур. Однако в процессе охлаждения стенок трубы происходит выравнивание концентрации диффузионного водорода как по металлу стенки, так и между стенкой и водородсодержащим слоем в пристеночной области с парциальным давлением P_{H_2}. В результате при температурах ниже 150 °С и P_{H_2} < 7,5 ата (≈ 0,75 МПа) влияние дополнительного источника диффузионного водорода на образование холодных трещин невелико и вполне может быть компенсировано низким содержанием водорода в присадочном металле. Однако при более высоких парциальных давлениях диффузионного водорода P_{H_2} > 7,5 ата риск образования холодных трещин существенно возрастает.

Определение реального значения P_{H_2} или ее уровня на действующих магистральных газопроводах представляется достаточно актуальной задачей. С этой целью авторами статьи были организованы экспериментальные измерения на действующих газопроводах:

в районе КС «Боярка» ($P_{раб}$ = 4,8 МПа, $D\times\delta$ = = 700×16 мм, T = 8 °С);

КС «Кременчуг» ($P_{раб}$ = 7,5 МПа, $D\times\delta$ = = 700×16 мм, T = 48 °С);

в районе ГРС ТЭЦ 5 ($P_{раб}$ = 4,5 МПа, $D\times\delta$ = = 350×11 мм, T = 13 °С).

Суть измерений заключалась в нанесении на участок наружной поверхности трубопровода слоя глицерина толщиной 3…5 мм, предвари-

Таблица 3. Результаты расчетов параметра риска образования холодных трещин для вариантов 1–4

Вариант	T_0, °С	Точки	$V_М$, %	P_{H_2}, ата	$[H]_{лок}$, см^3/100 г	$\wp$	$\frac{\wp}{4,264}$
1 (рис. 6, *а*, *б*)	20	1	95	0	2,0	4,264	1,0
				7,5	3,0	4,440	1,03
		2	50	0	1,5	4,264	1,00
				7,5	4,9	4,750	1,11
2 (рис. 6, *в*, *г*)	150	1	30	0	1,5	4,264	1,0
				7,5	2,5	4,490	1,05
		2	20	0	1,7	4,264	1,0
				7,5	3,0	4,510	1,06
3 (рис. 7, *а*, *б*)	20	1	100	0	1,5	4,264	1,0
				7,5	2,5	4,490	1,05
		2	55	0	1,5	4,264	1,0
				7,5	2,5	4,490	1,05
4 (рис. 7, *в*, *г*)	150	1	50	0	1,5	4,264	1,0
				7,5	2,0	4,39	1,03
		2	45	0	1,5	4,264	1,00
				7,5	2,5	4,490	1,05

тельно очистив его от краски и ржавчины до металлического блеска.

При этом предполагалось, что пузырьки диффузионного водорода, выходящего через стенку трубы, будут фиксироваться в слое глицерина (стандартная процедура глицериновой пробы [8]). Наблюдения на указанных объектах проводили в течение 7…10 сут, в результате не выявлено ни одного пузырька в глицериновой пробе, на основании чего сделано заключение, что значение потока водорода через стенку трубопровода ниже разрешающей способности использованного метода.

Таким образом, в результате проведенных достаточно обширных экспериментальных измерений с помощью глицериновой пробы реального потока водорода через стенку магистральных трубопроводов в Украине, с учетом разрешающей способности около 1 мм^3/(см^2·ч), установлено, что реальный искомый поток ниже разрешающей способности используемого метода, т. е. согласно табл. 1 парциальное давление диффузионного водорода в магистральных трубопроводах значительно ниже 1 ата (0,1 МПа), что дает основание считать роль диффузионного водорода из транспортируемого по трубопроводу углеводородного газа на образование водородных трещин при ремонтной сварке на стенке трубопровода весьма незначительной.

1. *Makhnenko V. I., Korolova T. V., Lavrynets I. G.* Numerical study on the effect of microstructural transformation on hydrogen redistribution in fusion welding of structurial steels // Mathematical modelling of weld phenomena 6 / Ed prof. H. Cerjak. Material Modelling Series. — Maney Publishing for the Institute of Materials, Minerals and Mining, 2002. — P. 903–923.
2. *Катц Д. Л.* Руководство по добыче, транспорту и переработке природного газа. — М.: Недра, 1965. — 84 с.
3. *Махненко В. И., Королева Т. В., Лавринец И. Г.* Влияние микроструктурных изменений на перераспределение водорода при сварке плавлением конструкционных сталей // Автомат. сварка. — 2002. — № 2. — С. 7–13.
4. *Нечаев Ю. С.* Физические комплексные проблемы старения, охрупчивания и разрушения металлических материалов водородной энергетики и магистральных газопроводов // Усп. физ. наук. — 2008. — **178**, № 7. — С. 709–726.
5. *Махненко В. И.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. — Киев: Наук. думка, 2006. — 618 с.
6. *Seyffarth P., Meyer B., Scharff A.* Groβer atlas schweiβ-ZTU-Schaubilaer. — Dusseldorf: Deutscher Verlagfur Schweisstechnik, DVS-Verlag, 1992. — 176 S.
7. *Welding* Handbook. Vol. 4: Materials and Application. Pt 2. — 8th ed. — Miami: AWS, 1998. — 621 p.
8. *Петров Г. Л., Миллион А.* Процессы распределения водорода в сварных соединениях углеродистых и низколегированных сталей // Свароч. пр-во. — 1964. — № 10. — С. 1–6.

Possibility of diffusion hydrogen penetration from hydrocarbon gas transported through the gas pipeline during repair welding performance on an operating pipeline has been analyzed. It is shown that at partial pressure of diffusive hydrogen on the inner surface of the steel pipe in the range of 0.10...0.75 MPa at residual wall thickness in the defect zone of more than 5 mm the increase of the parameter of hydrogen (cold) cracking risk is not higher than 5...11 %. Values of experimental measurements of diffusive hydrogen flow through the pipe wall in operating pipelines are given.

Поступила в редакцию 16.05.2011

УДК 621.791:669.725

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ И ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ*

Г. А. ТУРИЧИН, д-р техн. наук, **И. А. ЦЫБУЛЬСКИЙ**, **Е. В. ЗЕМЛЯКОВ**, **Е. А. ВАЛДАЙЦЕВА**, **М. В. КУЗНЕЦОВ**, инженеры (С.-Петербург. гос. политехн. ун-т, РФ)

Рассмотрены результаты компьютерного моделирования процесса гибридной сварки алюминиевых сплавов системы Al–Mg толщиной до 10 мм с помощью динамической модели. Показаны примеры расчета параметров технологического процесса сварки и их экспериментальное подтверждение. Описан разработанный лазерно-дуговой технологический комплекс для реализации гибридного процесса сварки.

Ключевые слова: лазерная и лазерно-дуговая сварка, алюминиево-магниевые сплавы, моделирование процессов, расчеты, геометрические характеристики шва, термические циклы, распределение легирующих элементов, комплекс оборудования, мониторинг процесса сварки

Высокая концентрация энергии лазерного излучения предопределяет значительную интенсификацию процессов обработки материалов. Концентрированный ввод энергии позволяет обрабатывать материалы с более высокими скоростями, меньшими остаточными тепловыми деформациями. Достижения последних лет в области физики и техники позволили создать новые источники лазерного излучения с существенно более высокой энергетической эффективностью.

При сварке сплавов, особенно легких на основе алюминия, проблема расчета параметров сварного соединения, прогнозирования его химического состава и механических свойств достаточно сложна из-за необходимости учета удаления легколетучих добавок, таких, как магний, литий или цинк, являющихся определяющими для всего комплекса механических свойств. При сварке часть этих добавок испаряется, в результате химический состав и механические свойства металла шва могут отличаться от состава и свойств основного материала.

Система Al–Mg является одной из самых перспективных при разработке свариваемых сплавов. Механические свойства сварных соединений, как и у основного материала, в основном зависят от содержания магния в сплаве, с увеличением содержания которого возрастает прочность сплава. Значительное влияние на свойства алюминиевых сплавов оказывает литий, изменение концентрации которого влияет как на механические свойства сплавов, так и на их склонность к трещинообразованию.

Для повышения эффективности разработки технологии и оборудования лазерно-дуговой сварки (ЛДС) применили компьютерную модель данного процесса, построенную на основе технологически применимых математических описаний процессов, протекающих при ЛДС [1].

Одним из результатов многолетней работы является разработанная в ИЛиСТ СПбГПУ компьютерная программа LaserCad для моделирования лазерной, дуговой и гибридной сварки, позволяющая рассчитывать геометрические характеристики сварного шва, термические циклы в металле шва и ЗТВ, количество легирующих элементов в металле шва.

Для анализа причин возникновения хампинг-эффекта при гибридной сварке и выбора путей его устранения наиболее целесообразным является математическое моделирование процесса на основе физически адекватной модели, позволяющее анализировать связь различных физических явлений, ответственных за развитие неустойчивостей сварочной ванны. Процессы гибридной ЛДС с глубоким проплавлением, как и родственные процессы лазерной сварки, часто сопровождаются появлением пористости и формированием корневых пиков в сварных швах [2]. В соответствии с современными представлениями о физической природе процессов лазерной сварки, причиной этого является развитие автоколебаний парогазового канала и сварочной ванны при сварке с глубоким проплавлением [3].

Многочисленные экспериментальные результаты подтверждают, что процесс сварки с глубоким проплавлением не является стационарным даже при стабилизации всех внешних факторов, влияющих на сварочную ванну [4]. В частности, высокоскоростная киносъемка лазерной сварки

* По материалам доклада, представленного на Пятой международной конференции «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов», 24–27 мая 2011 г.

© Г. А. Туричин, И. А. Цыбульский, Е. В. Земляков, Е. А. Валдайцева, М. В. Кузнецов, 2011

Рис. 1. Оптический блок системы «Регистратор» (*а*), цифровая высокоскоростная камера CENTURIO C100 (*б*) и линзовый спектрограф SL100M (*в*)

составных образцов из металла и оптически прозрачного материала [5] показала непрерывное изменение формы канала, квазипериодическое движение зоны с максимальной яркостью по глубине канала, а также наличие таких зон на задней стенке канала. Съемка плазменного факела также показывает наличие его квазипериодических флуктуаций [6].

Сравнительные исследования движения жидкого металла на поверхности сварочной ванны и процесса образования корневых пиков подтверждают соответствие между пикообразованием и выплескиванием расплавленного металла из сварочной ванны. Такие же результаты были получены позднее при рентгеновской съемке [7].

В экспериментах использовали гибридную лазерно-дуговую сварочную установку, разработанную и собранную в ИЛиСТ СПбГПУ. В качестве источника лазерного излучения использовали иттербиевый волоконный лазер ЛС-15 с максимальной выходной мощностью 15 кВт. Излучение транспортировалось по волоконному кабелю к оптической сварочной головке лазерно-дугового модуля. Для фокусировки излучения использовали сварочную головку YW50 ZK фирмы «Precitec» с фокусным расстоянием 400 мм и фокальным диаметром 0,4 мм, оснащенную однокоординатным сканатором DC-Scanner с максимальной частотой 600 Гц и амплитудой до 10 мм. Экспериментальная установка также укомплектована источниками питания дуги ВДУ-1500ДС и EWM Phoenix 520 RC PULS. Для подачи присадочного материала использовали механизмы подачи проволоки ПДГО-511 и PHOENIX DRIVE 4 ROB 2.

В ходе экспериментов проплавляли и сваривали встык плоские образцы размерами 100×50 мм из сплавов АМг6 толщиной 10 мм и 1424 (Al–4,5 % Mg–1,7 % Li + 0,6 % Zn) толщиной 4 мм. Сварку осуществляли прямолинейными стыковыми швами в нижнем положении. Для защиты сварочной ванны и металла шва использовали аргон и смесь аргона с гелием, а в качестве присадочного материала — проволоку марки AlMg6Zr.

Качество всех сварных швов оценивали визуально по их внешнему виду и на основании металлографических исследований поперечных шлифов. Определяли глубину проплавления и другие параметры геометрии шва.

Для определения временных характеристик динамических процессов в зоне гибридного разряда над поверхностью изделия применяли систему регистрации плазменного факела (рис. 1), включающую блок оптической регистрации с объективом, кассету для светофильтров и CCD матрицей для регистрации сигнала и модуль цифровой обработки сигнала, а также высокоскоростную видеокамеру CENTURIO C100, позволяющую проводить съемку со скоростью до 100 000 кадров/с. Для исследования спектра оптической эмиссии плазменного факела использовали линзовый спектрограф с компенсацией астигматизма SL100M.

Результаты компьютерного моделирования, полученные с помощью динамической модели (рис. 2), показывают, что, несмотря на стабилизацию всех параметров технологического режима процесс высокоскоростной сварки металлов больших толщин следует считать нестационарным. При этом наиболее нестабильна прикорневая часть парогазового канала и канала проплавления. На рис. 2, *а*, где представлены поперечные сечения сварного шва, выполненного лазерной сваркой на одних и тех же параметрах режима с интервалом 1 мс, видно характерное сужение шва, которое может привести к образованию дефекта. Получить более стабильную сварочную ванну можно путем введения кругового сканирования лазерного луча с небольшими (до 0,5 мм) радиусами и высокой (свыше 300 Гц) частотой сканирования (рис. 2, *б*). При отсутствии такой стабилизации в результате коллапса парогазового канала возможно формирование пор большого диаметра и корневых пиков.

Эксперименты показали, что динамическое поведение яркости излучения расплава характеризуется наличием низкочастотных колебаний. Данные частоты определяли с помощью компьютерного моделирования с использованием динамической модели, а также экспериментально с помощью фотодиодов, направленных на сварочную ванну. Характерный частотный спектр сигнала с фотодиодов представлен на рис. 3.

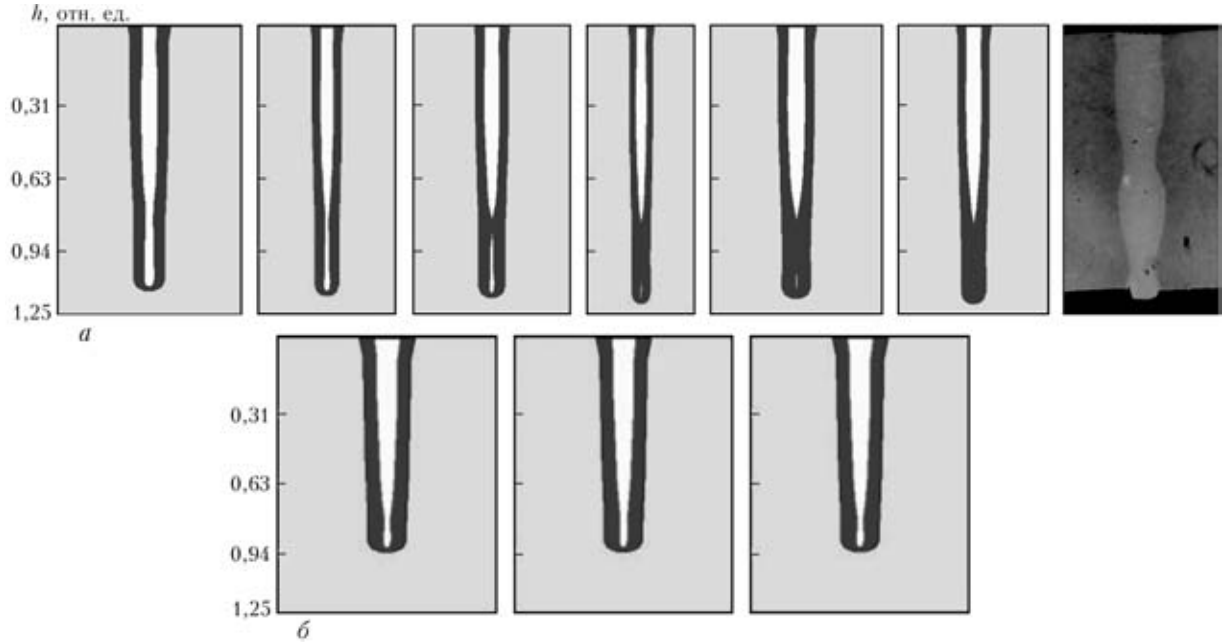


Рис. 2. Расчетные формы проплавления при $v_{св}$ = 10 см/с: *а* — через каждую 1 мс, *N* = 15 кВт; *б* — через каждые 3 мс, *N* = = 12 кВт

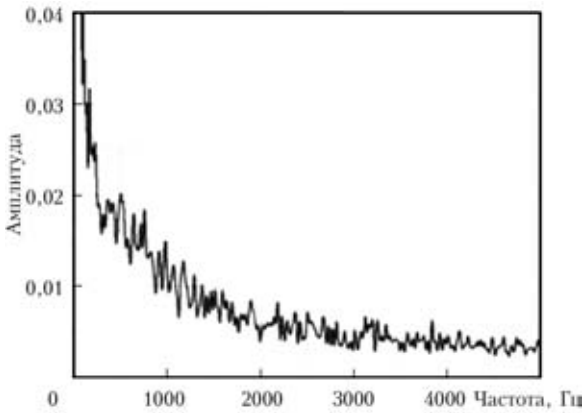


Рис. 3. Частотный спектр колебаний расплава

Скорость видеосъемки определяется частотой колебаний расплава. Анализ динамического поведения ванны расплава показал, что в расплаве отсутствуют колебания с частотами более 500 Гц. Таким образом, для наблюдения за поверхностью сварочной ванны необходимо проводить съемку со скоростью не менее 1000 кадров/с (рис. 4).

Анализ кадров скоростной видеосъемки позволил определить положение электрода относительно лазерного луча.

Результаты расчета количества легирующих элементов, проведенного в программе LaserCAD, для различных толщин и параметров режима для сплава 1424 приведены на рис. 5. Уменьшение скорости сварки приводит к увеличению потерь легколетучих легирующих элементов, которые обеспечивают высокие эксплуатационные характеристики сплавов, что и приводит к разупрочнению сварного шва.

Содержание примесей в металле шва при сварке на пониженных скоростях за счет испарения существенно отличается от их содержания в основном материале, особенно в верхней части расплавленной зоны, где радиус канала максимален. Поскольку верхняя часть парогазового канала является определяющей для процесса многократных переотражений в канале, испарение примесей значительно изменяет форму и размеры зоны проплавления. Пример такого уширения представлен на рис. 6. Увеличение погонной энергии привело

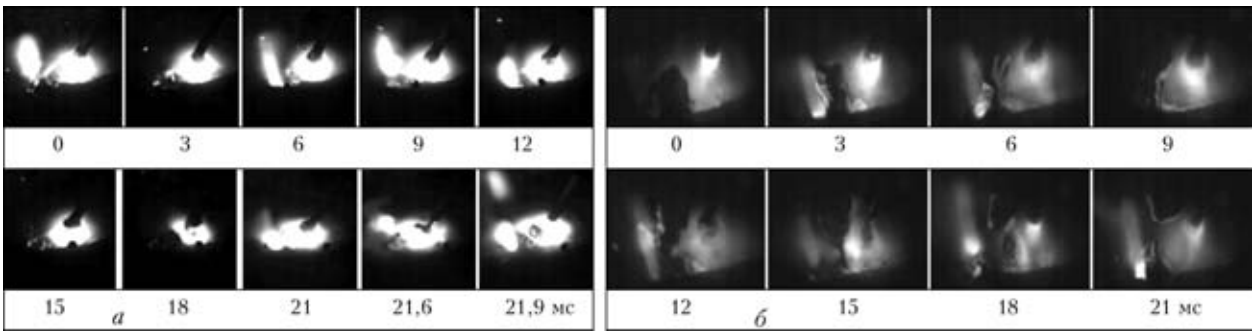


Рис. 4. Кадры видеосъемки процесса формирования и отрыва капли при гибридной сварке от источников питания дуги EWM Phoenix 520 RC PULS (*а*) и ВДУ-1500ДС (*б*) при *N* = 15 кВт, $v_{св}$ = 6 м/мин, $I_{св}$ = 120 А

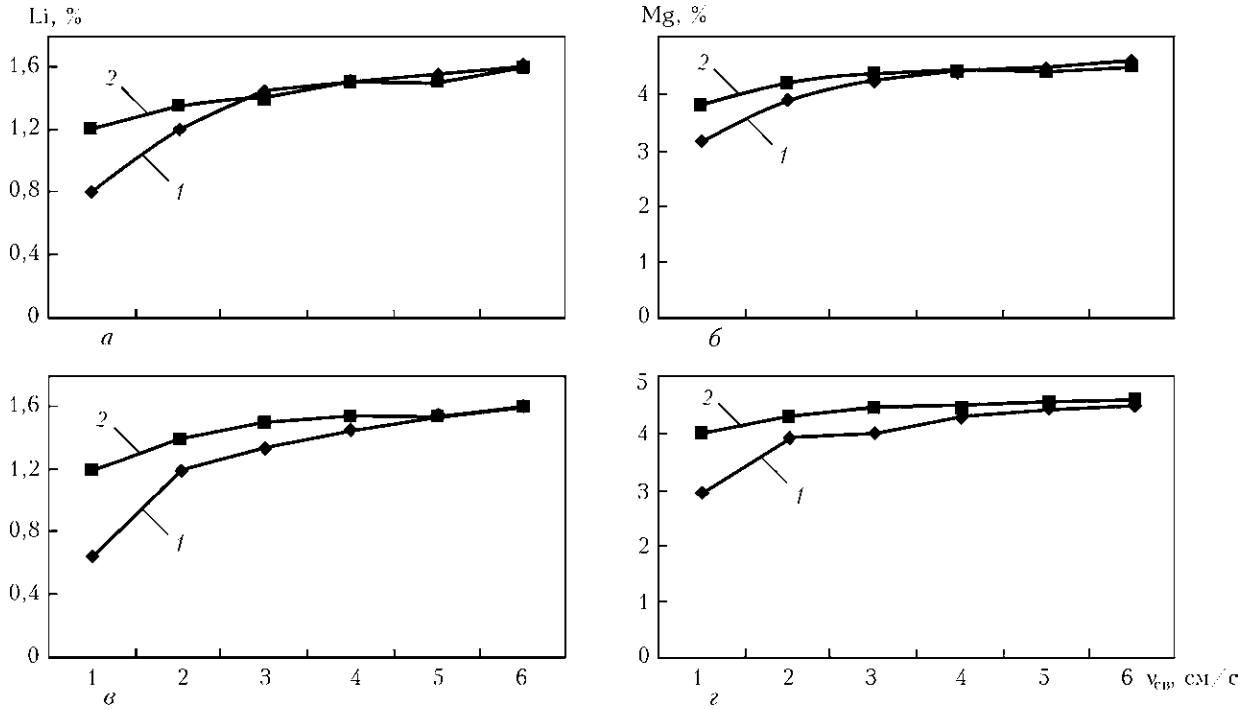


Рис. 5. Расчетное содержание лития (*а*, *в*) и магния (*б*, *г*) в металле шва на поверхности образца при лазерной сварке сплава Al – 4,5 % Mg – 1,7 % Li – 0,6 % Zn при N = 3500 (*а*, *б*, *г*), 3000 (*в*) Вт, d = 0,3 мм и толщинах 4 (*1*) и 10 (*2*) мм

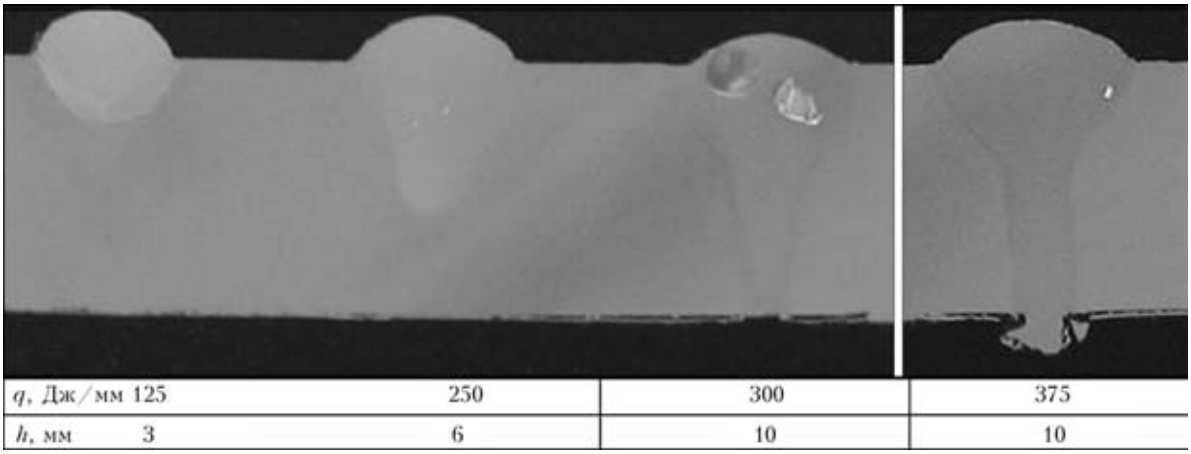


Рис. 6. Результаты лазерного проплавления с присадочной проволокой пластины из АМг6 ($v_{п.п}$ = 19 м/мин)

к существенному росту ширины зоны проплавления при лазерной сварке с присадочным материалом.

Для определения положения электрода относительно лазерного луча, кроме высокоскоростной видеосъемки, проводили расчеты термических циклов и измерения микротвердости в зоне лазерного воздействия (рис. 7).

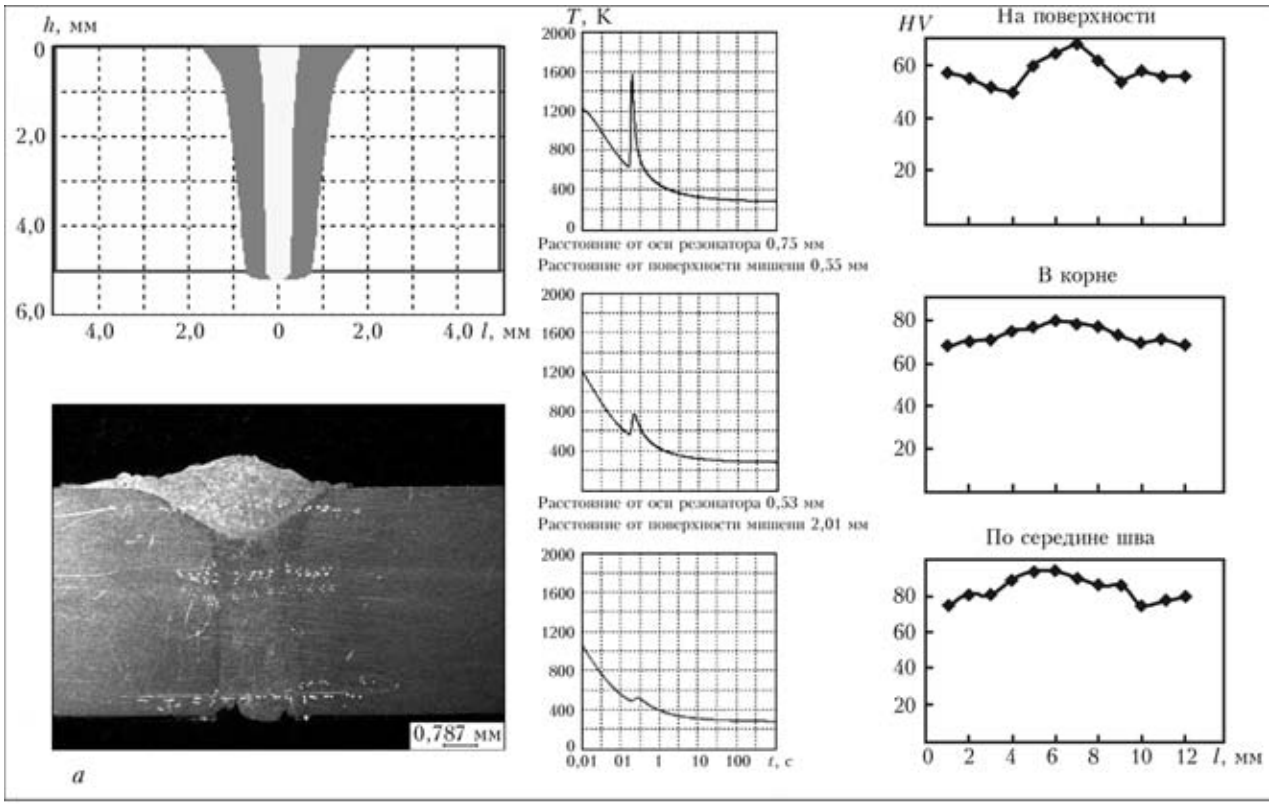
При гибридной сварке наблюдается однородная по всему сечению металла шва структура, состоящая из мелких дендритов. В случае увеличенного расстояния между тепловыми источниками наблюдается более продолжительное пребывание металла шва при повышенных температурах и, как следствие, увеличение размеров дендритов в верхней части шва. При гибридном процессе микротвердость металла шва приближается к микротвердости основного материала, что обусловлено как его мелкодендритной структурой, так и более высоким содержанием магния.

Дальнейшие эксперименты проводили при максимальных скоростях сварки и расстоянии между лазерным лучом и электродом 2 мм.

Пример моделирования гибридной сварки сплава АМг6 приведен на рис. 8.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа, представленные на рис. 9, подтвердили рассчетные значения. Из представленных на рисунке результатов видно, что использование присадочного материала позволяет компенсировать потери легирующих элементов.

На рис. 10 представлено поперечное сечение и микроструктура металла стыкового сварного шва со сквозным проплавлением пластин толщиной



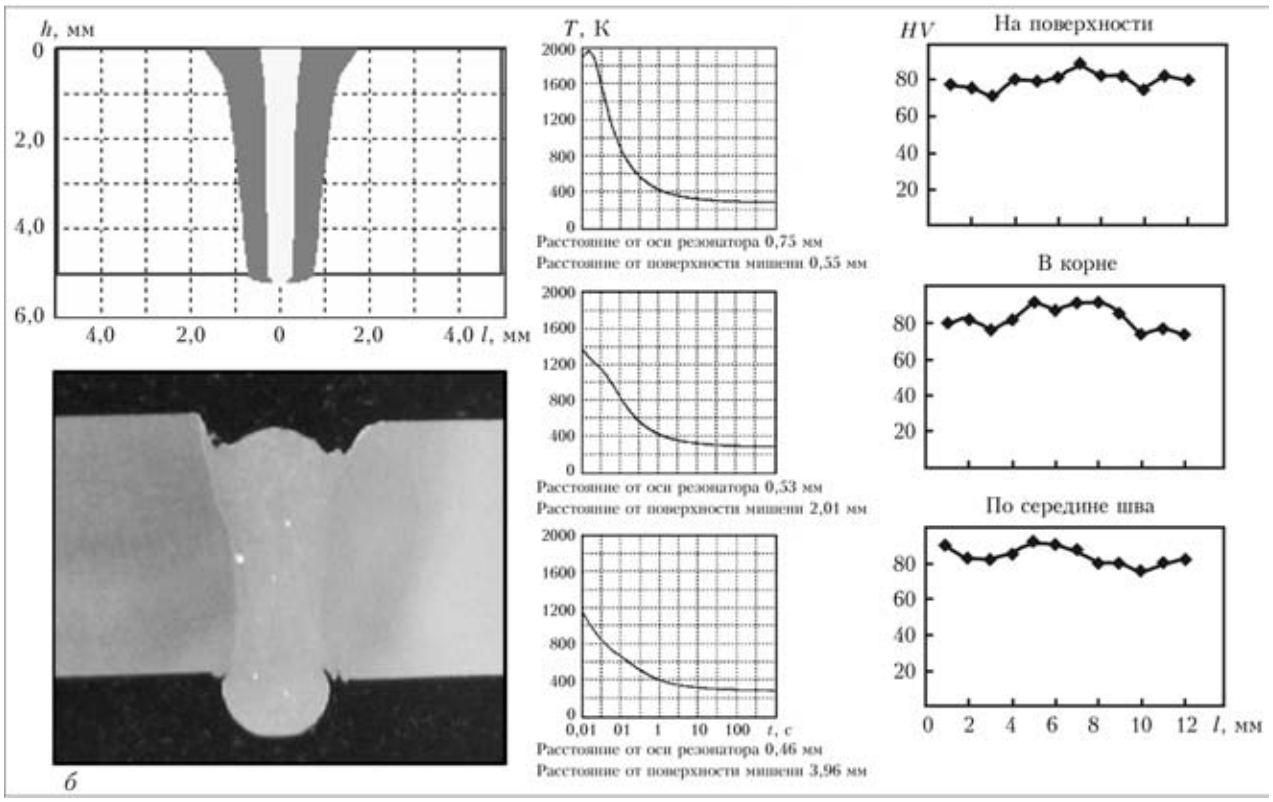


Рис. 7. Расчетные данные формы поперечного сечения, термических циклов сварного шва и измерение микротвердости после ЛДС алюминиевого сплава (q = 100 Дж/мм): *а*, *б* — расстояние между лазерным лучом и электродом соответственно 15 и 2 мм

10 мм из сплава АМг6 (q = 175 Дж/мм), а также в качестве примеров сварки других сплавов представлены поперечные сечения сварных швов пластин из сплавов Al – 4,5 % Mg – 1,7 % Li – 0,6 % Zn и Al–Mg_3 толщиной 5 мм (q = 100 Дж/мм).

В ходе работы был разработан и изготовлен лазерно-дуговой технологический комплекс (ЛДТК). В его состав (рис. 11) входят лазерная установка (волоконный лазер), комплекс дугового оборудования, модуль лазерно-дуговой (рабочий

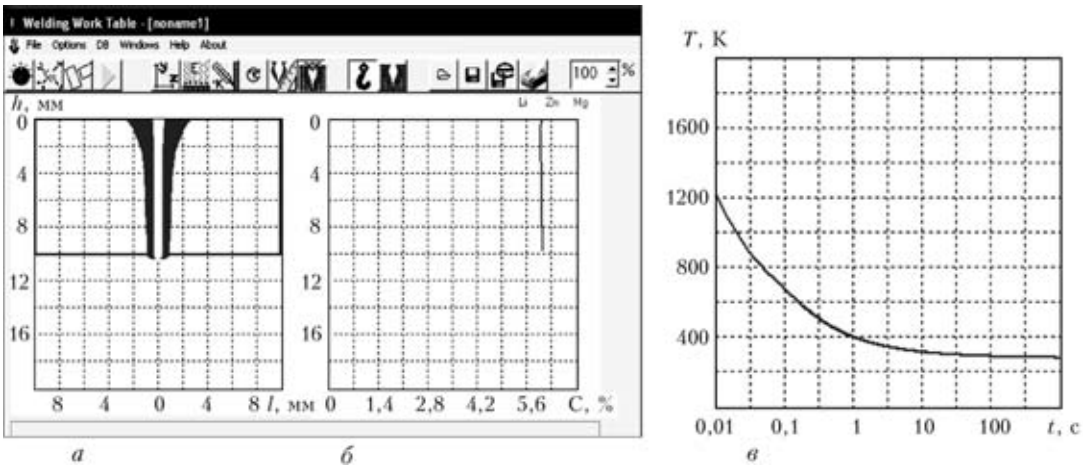


Рис. 8. Расчетное поперечное сечение зоны проплавления (*а*), распределение магния по глубине шва (*б*) и термический цикл гибридной сварки сплава АМг6 (*в*)

	ЛС	ЛДС+МИГ	ЛС+МИГ
Объект исследования			
На поверхности	5,298	6,485	3,135
В корне	4,624	5,871	3,274
По середине	5,710	5,510	3,279
Основной металл	6,442		2,648
Сварочная проволока		6,25	

Рис. 9. Распределение количества магния по глубине сварного шва при различных процессах сварки алюминиевого сплава

инструмент), манипулятор, блок подготовки и распределения газов, подсистема мониторинга свариваемого стыка (наведение на стык), подсистема мониторинга технологического процесса, система автоматического управления. ЛДТК оснащен системой наведения лазерно-дугового модуля на свариваемый стык на основе триангуляционного лазерного датчика, которая осуществляет контроль геометрических характеристик стыка, слежение за координатами стыка при скорости сварки до 6 м/мин с параметрами: ±0,5 мм в поперечном направлении к стыку и ±0,2 мм в вертикальном направлении.

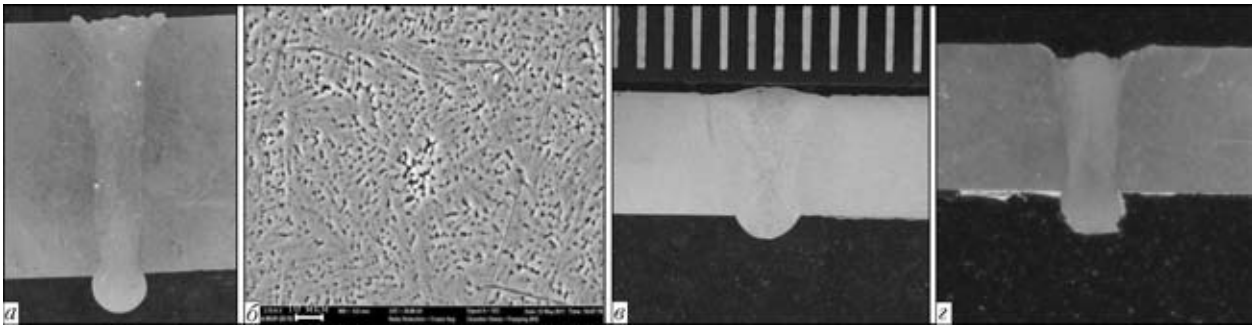


Рис. 10. Поперечное сечение сварных швов при ЛДС сплавов АМг6 (*а*), Al –4,5 % Mg–1,7 % Li–0,6 % Zn (*в*), Al–Mg_3 (*г*) и микроструктура металла шва сплава АМг6 (*б*)

Рис. 11. Общий вид ЛДТК

Результаты исследований динамики поведения сварочной ванны и пароплазменного факела позволили разработать оборудование для контроля технологического процесса, интегрированное в систему мониторинга параметров процесса сварки.

Выводы

1. Показана возможность повышения качества сварных швов с помощью сканирования.

2. Установлены требуемые частоты сканирования, соответствующие флуктуациям сварочной ванны.

3. Показана зависимость характера проплавления и свойств металла шва от расстояния лазерный луч – дуга.

4. Показано, что количество легирующих элементов в металле шва убывает с уменьшением скорости сварки.

5. Подтверждено, что присадочный материал компенсирует потери легирующих элементов при ЛДС.

6. Получены сварные соединения сплавов на основе алюминия с большим отношением глубины к ширине, характеризующиеся высоким качеством металла шва и малыми деформациями.

1. *Turichin G.* Model of laser welding for technology application // Proc. of the Academy of Sci., Phys. Ser. — 1997. — **61**, № 8. — P. 1613–1618.
2. *Porosity* formation mechanism and its prevention in laser welding / A. Matsunawa, M. Mizutani, S. Katayama, N. Seto // Welding Intern. — 2003. — **17**, № 6. — P. 431–437.
3. *Theoretical* description of the dynamic phenomena in laser welding with deep penetration / V. Lopota, G. Turichin, I. Tzibulsky et al. — Bellingham/Wash.: SPIE, 1999 (SPIE Proceedings Series 3688). — P. 98–107.
4. *Forsman T., Powell J., Magnusson C.* Process instability in laser welding of aluminum alloys at the boundary of complete penetration // J. of Laser Applications. — 2001. — **13**, № 10. — P. 193–198.
5. *Bashenko V. V., Mitkevich E. A., Lopota V. A.* Peculiarities of heat and mass transfer in welding using high energy density power sources: 3d Intern. Coll. on EBW. — Lion, 1983. — P. 61–70.
6. *Лопота В. А., Смирнов В. С.* Структура материала и его параметры в зоне действия луча при лазерной сварке с глубоким проплавлением // Физ. и химия обработки материалов. — 1989. — № 2. — С. 104–115.
7. *Dynamics* of keyhole and molten pool in laser welding / A. Matsunawa, J.-D. Kim, N. Seto et al. // J. of Laser Applications. — 1998. — **10**, № 12. — P. 247–254.

Results of computer modelling of the process of hybrid welding of aluminium alloys of the Al–Mg system up to 10 mm thick by using a dynamic model are considered. Examples of computation of the welding process parameters and their experimental confirmation are given. The developed technological laser-arc system for implementation of the hybrid welding process is described.

Поступила в редакцию 06.07.2011

7-я Международная конференция

«ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ»

18–21 сентября 2012 г. **Санкт-Петербург**

Институт лазерных и сварочных технологий СПбГПУ и Российско-германский центр лазерных технологий приглашают принять участие в 7-й Международной конференции «Лучевые технологии и применение лазеров».

Тематика конференции:

- Физические основы лучевых технологий
- Нанофотоника
- Математическое моделирование лучевых технологий
- Технологии резки, прошивки отверстий, маркировки, гравировки и скрайбирования
- Технологии сварки, наплавки и прототипирования
- Оборудование для лучевых технологий
- Контроль качества и безопасность
- Фотонные технологии живых систем и медицинское применение лазеро.в

www.ilwt-stu.ru

УДК 621.91:669.71

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКЛОННОСТИ К ГОРЯЧЕМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

П. КАХ, Е. ХИЛЬТУНЕН, Дж. МАРТИКАИНЕН
(Лаб. сварочной технологии и лазерной обработки, Лаппеэнрантский технол. ун-т, Финляндия)

Рассмотрено влияние способа сварки (GTAW и GMAW), состава присадочного металла и температуры предварительного подогрева на склонность швов к образованию горячих трещин при сварке алюминиевых сплавов 6005 и 6082.

Ключевые слова: дуговая сварка, вольфрамовый электрод, защитный газ, металлический электрод, горячее растрескивание, присадочные металлы, предварительный подогрев, сплав 6005, сплав 6082, количество подводимого тепла

Алюминиевые сплавы, известные сочетанием таких свойств, как легкость, прочность, высокая ударная вязкость, способность выдерживать экстремальные температуры, коррозионная стойкость и гибкость при штамповке и хорошие характеристики повторной обработки, широко применяют в транспортном, химическом машиностроении, авиастроении, производстве строительных конструкций. Типичные применения термообрабатываемых деформируемых сплавов 6005 и 6028 — это сварные конструкции и архитектура. Сплавы на основе алюминия можно успешно сваривать дуговой сваркой, не опасаясь появления проблем, связанных с растрескиванием или при их незначительном проявлении. Факторами, существенно влияющими на возможность горячего растрескивания в алюминиевых сварных конструкциях, являются: определенный химический состав основного металла, тип легирования присадочного металла и конструктивные особенности соединения. Сплавы серии 6ххх имеют склонность к растрескиванию, если состав основного металла близок к составу присадочного металла. При дуговой сварке возможность растрескивания этих сплавов уменьшается с помощью разбавления основного металла дополнительно магнием (использование присадочных металлов системы Al–Mg серии 5ххх) или кремнием (использование присадочных металлов системы Al–Si серии 4ххх). Наиболее подходящим и успешным методом для предотвращения растрескивания в основных металлах серии 6ххх является использование соответствующего присадочного металла, добавляемого во время сварки [1–10].

Основные причины горячего растрескивания сплавов системы Al–Mg–Si при сварке рассмотрены в работах [4–13]. Для исключения или минимизации эффекта растрескивания рекомендуют использовать соответствующие присадочные сплавы [5–10]. Путем сравнения присадочных металлов 5356 с 5 % Mg и 4043 с 5 % Si определяли влияние состава основного металла на горячее растрескивание. Установлено, что шов, выполненный с присадочным металлом 4043, менее склонен к горячему растрескиванию, чем такой же, выполненный с присадочным металлом 5356 из-за узкого температурного интервала кристаллизации и пониженной эвтектической температуры металла шва, что позволяет основному металлу затвердевать первым (рис. 1). Сплав 4043 легко анодируется после сварки, образуя темный металл шва и хорошо видимый шов, что объясняется присутствием определенного количества кремния в составе. Таким образом, при использовании любого из двух сплавов значительных отличий в твердости не наблюдается. В образцах, сваренных присадочным металлом 4043, ЗТВ в среднем на 2 мм шире, чем в образцах, сваренных присадочным металлом 5356 с помощью дуговой сварки

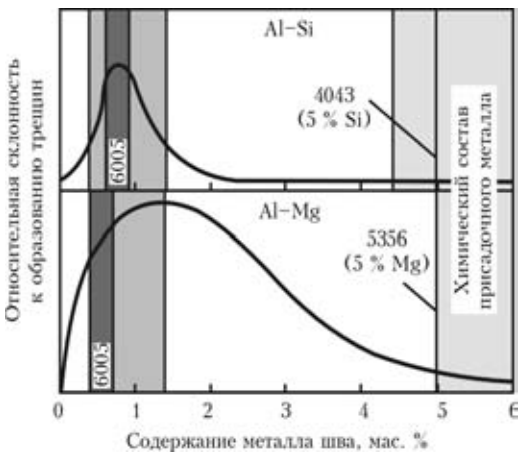


Рис. 1. Влияние химического состава на склонность к образованию трещин в бинарных сплавах систем Al–Si и Al–Mg [14]

© П. Ках, Е. Хильтунен, Дж. Мартикаинен, 2011

Типичные химические составы алюминиевых сплавов и присадочных проволок, мас. %

Алюминиевые сплавы	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Прочие	Al
6005	0,6	0,21	0,12	0,15	0,54	0,028	0,01	0,15	Основа
6082	1,2	0,33	0,08	0,50	0,78	0,14	0,05	0,15	»
Проволоки	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	B	Al
4043	5,00	0,8	0,3	0,05	0,05	0,10	0,20	0,0008	Основа
5356	0,25	0,4	0,1	0,05...0,20	5,00	0,14	0,10	0,0008	»

вольфрамовым электродом в защитном газе (GTAW) и дуговой сварки металлическим электродом в защитном газе (GMAW).

Сварку GTAW и GMAW использовали для сравнения различного количества подводимого тепла, которое при импульсной GTAW в 4 раза выше, чем то же при импульсной GMAW. Некоторые образцы для испытания также предварительно подогревали для уменьшения растягивающих напряжений, а скорость охлаждения выбрали такой, чтобы эффект ликвационного растрескивания уменьшился. Ликвационное растрескивание возникает в зоне частичного расплавления шва, сразу возле зоны сплавления. Ликвация может появиться вдоль границы зерна или внутри. Ликвация на границе зерна делает зону частичного расплавления склонной к ликвационному растрескиванию [15, 16]. Горячее растрескивание — это процесс высокотемпературного растрескивания, который в основном зависит от того, как кристаллизуются системы металлического сплава.

Степень жесткости соединения также оказывает значительное влияние на ликвационное растрескивание. Чем она выше, тем выше возможность ликвационного растрескивания. Поскольку алюминиевые сплавы имеют высокое тепловое сжатие и если они не релаксированы перед кристаллизацией, в соединениях возникают большие растягивающие напряжения, что может приводить к разрушению вдоль ликвационных границ. Выбор основного металла, имеющего мелкозернистую структуру и менее склонного к ликвационному растрескиванию (например, металл, не содержащий низкоплавких примесей или сегрегаций), также может помочь в решении этой проблемы [9, 17].

Экспериментальные методики. Образцы из деформируемых алюминиевых сплавов 6005 и 6082 толщиной 10 мм испытывали на растрескивание с учетом различных критериев. Во-первых, присадочные металлы применяли для того, чтобы определить их влияние на растрескивание. Типичные химические составы сплавов на алюминиевой основе и присадочных проволок представлены в табл. 1. Изучено влияние различных способов сварки, предварительного подогрева и основного металла на горячее растрескивание. Для всех экспериментов использовали механизированную частотой 90 Гц импульсную GTAW и GMAW с переносом металла с короткими замыканиями. Использованы следующие сварочные параметры: температура воздуха приблизительно 20 °С, для оценки влияния предварительного нагрева некоторые образцы перед сваркой нагревали до температуры 120 °С. Использован сварочный ток 172, 210 и 352 А для обоих основных сплавов с и без предварительного подогрева, напряжение удерживали на уровне 17, 22 и 26 В соответственно. Скорость подачи проволоки и скорость сварки соответственно колебались от 2,8…10 мм/с и 0,34…13,5 м/мин. В обоих случаях в качестве защитного газа использовали чистый аргон (Ar + 0,03 % NO), расход которого составлял для GMAW 14 л/мин, для GTAW — 10 л/мин. Диаметр присадочной проволоки составлял 1,2 и 2,4 мм при GMAW и GTAW соответственно, а вылет электрода при GMAW — 15 мм. Способ с валиковой пробой использовали во всех случаях.

Для очистки поверхности перед сваркой от оксидов, смазки и оставшихся частиц использовали щетку из нержавеющей стали. Это важно, поскольку шов из алюминия имеет склонность к пористости (из-за водорода) и образованию окалины (из-за кислорода). Материалы, подлежащие свар-

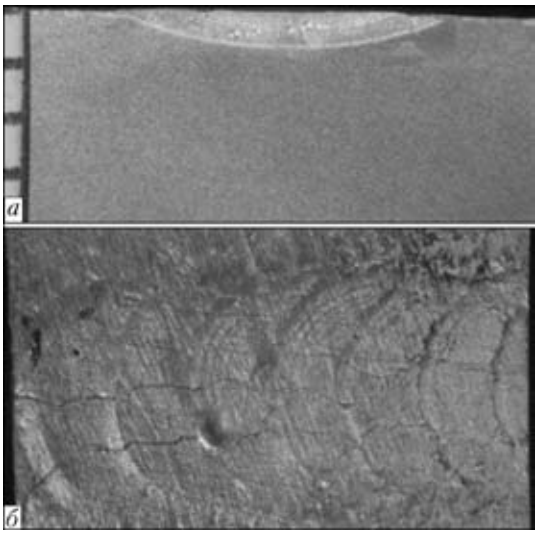


Рис. 2. Характерный пример горячего растрескивания в металле шва: *а* — шлиф поперечного сечения; *б* — вид сверху на образец

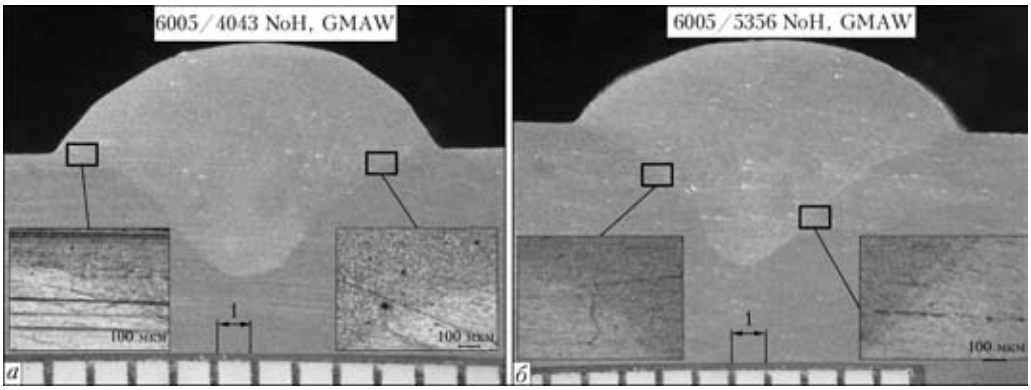


Рис. 3. Макрошлифы соединений сплава 6005, выполненных с использованием присадочного металла 4043 (*а*) и 5356 (*б*) способом GMAW, и микроструктуры с ликвационными трещинами (NoH — без предварительного подогрева)

ке, должны быть достаточно жесткими для предотвращения их сжимания без ограничения во время сварки. Такое условие вызывает появление горячего растрескивания при сварке, что дает возможность оценить склонность материалов к образованию трещин [18–20].

Для GTAW использовали новую установку компании «Fronius» Magic Wave 5000 Job G/F. Импульсный переменный ток машины можно отрегулировать и измерить. Для подачи проволоки использовали механизм ESAB CWF1. В случае с GMAW использовали сварочную машину с импульсным переменным током Pro GMA 530 Kempi. Полученные сварные швы вырезали, отполировали и протравили раствором 8 % HF и 12 % HCl в воде для изучения микроструктуры с помощью оптической микроскопии.

Результаты и обсуждение. Сделаны макро- и микрофотоснимки поперечного сечения шва и проведены испытания на твердость по Виккерсу (3 кг). Эксперимент с присадочным металлом, выполненный для определения влияния присадочного металла на склонность к горячему растрескиванию, представлен на рис. 2. Если присадочный металл отсутствует, горячие трещины находятся в шве и металле ЗТВ. Для GTAW использовали сплав 6005, ток I = 300 А, скорость сварки v = 2,5 мм/с. Присадочный металл и предварительный подогрев (20 °С) не применяли.

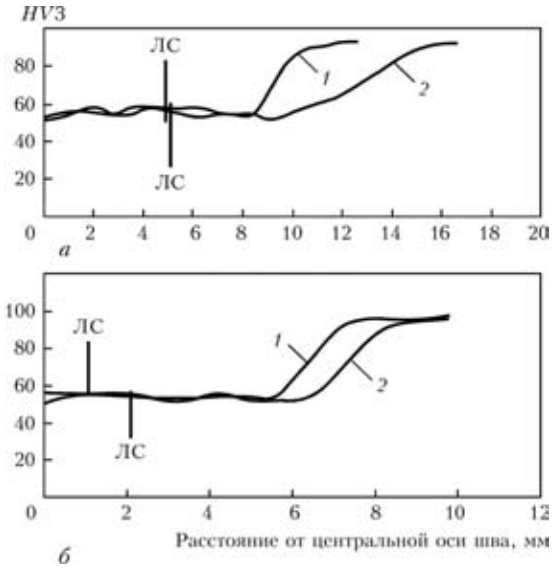


Рис. 4. Распределение твердости в поперечном сечении соединения сплава 6005, выполненного без предварительного подогрева с использованием присадочного металла 5356 (*1*) и 4043 (*2*) способом GTAW (*а*) и GMAW (*б*) (ЛС — линия сплавления)

Влияние присадочных металлов. Влияние присадочных металлов на распространение трещин оценивали посредством простого наблюдения за интенсивностью распространения трещин в поперечном сечении шва, используя большое увеличение — 100. На рис. 3 приведены микроструктуры шва из сплава 6005, который был сварен с количеством подводимого тепла Q = 440 и 426 Дж/мм и использованием присадочных металлов 5356 и 4043 соответственно. Открытые ликвационные трещины хорошо видны вдоль наружной кромки и корня шва.

Как видно из рис. 4, в целом распределение твердости одинаково в металле шва, ЗТВ и основном металле. Минимальные значения для GTAW и GMAW в обоих швах, используя присадочный металл 4043, составляют не более *HV3*–60. Если сплав 6082 сварить такими же присадочными проволоками, ситуация иная. Распределение твердости опускается ниже 60 и поднимается немного выше *HV3*–80. Следовательно, нет существенных отличий в твердости при использовании любого из двух присадочных металлов. Фактически у образцов, сваренных с помощью присадочного металла 4043, ЗТВ в среднем на 2 мм шире, чем то же, сваренное с помощью присадочного металла 5356 для обоих процессов GTAW и GMAW. Меньшее количество небольших трещин можно наблюдать в соединении, выполненном с помощью присадочного металла 4043 (см. рис. 4, *а*). Таким образом, присадочный металл 4043 предпочтительнее металла 5356 с точки зрения склонности к ликвационному растрескиванию при GTAW и GMAW сплава 6005.

Влияние процесса сварки. Зависимость интенсивности развития трещин от процесса GTAW или

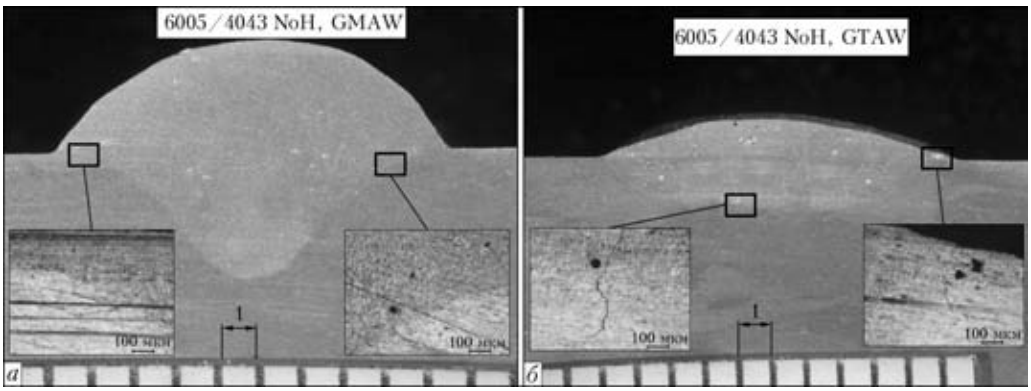


Рис. 5. Макрошлифы соединений сплава 6005, выполненных с использованием присадочного металла 4043 без предварительного подогрева способом GMAW (*а*) и GTAW (*б*)

GMAW можно определить, сравнив рис. 5, *а* (Q = = 440 Дж/мм) и рис. 5, *б* (Q = 1290 Дж/мм). На рис. 5, *а* видны трещины и несколько небольших трещин, а на рис. 5, *б* — только одна большая трещина и незначительное количество небольших трещин, однако также могут присутствовать невидимые трещины. Соответственно в образцах, сваренных GTAW, трещин больше, чем у образцов, сваренных GMAW. Таким образом, образцы, сваренные GMAW, демонстрируют меньшее количество трещин и более высокие и значения твердости при более узкой ЗТВ, чем выполненные способом GTAW (рис. 6).

Различие в значениях твердости у образцов, выполненных GTAW и GMAW, особенно заметно на примере сплава 6082 (в среднем оно составляет около *HV3*–90 (рис. 6, *в*, *г*)). Наиболее малое различие в значениях твердости можно наблюдать в сплаве 6005, оно составляет около *HV3*–1,5 (рис. 6, *а*, *б*). Ширина ЗТВ в соединениях, выполненных GTAW, на 4…5 мм больше, чем то же в соединениях, сваренных GMAW из-за большего количества подводимого тепла.

Влияние предварительного подогрева. Предварительный нагрев способствует уменьшению горячего растрескивания благодаря сокращению напряжений при охлаждении, т. е. можно использовать меньшее количество подводимого тепла. Если рекомендовано, предварительный подогрев используют для подогрева всего основного металла или его части до желаемой температуры перед сваркой. Температура предварительного подогрева, как правило, указана в спецификации процесса сварки для используемого сплава, но обычно она колеблется в интервале 110…140 °С для большинства промышленных сплавов. Если конструкция небольшая, предварительный подогрев можно выполнять в печи, а если имеет большие размеры, может потребоваться набор нагревающих горелок, электрические ленточные или индукционные нагреватели. Основным преимуществом предварительного подогрева является более низкая скорость охлаждения в шве и ос-

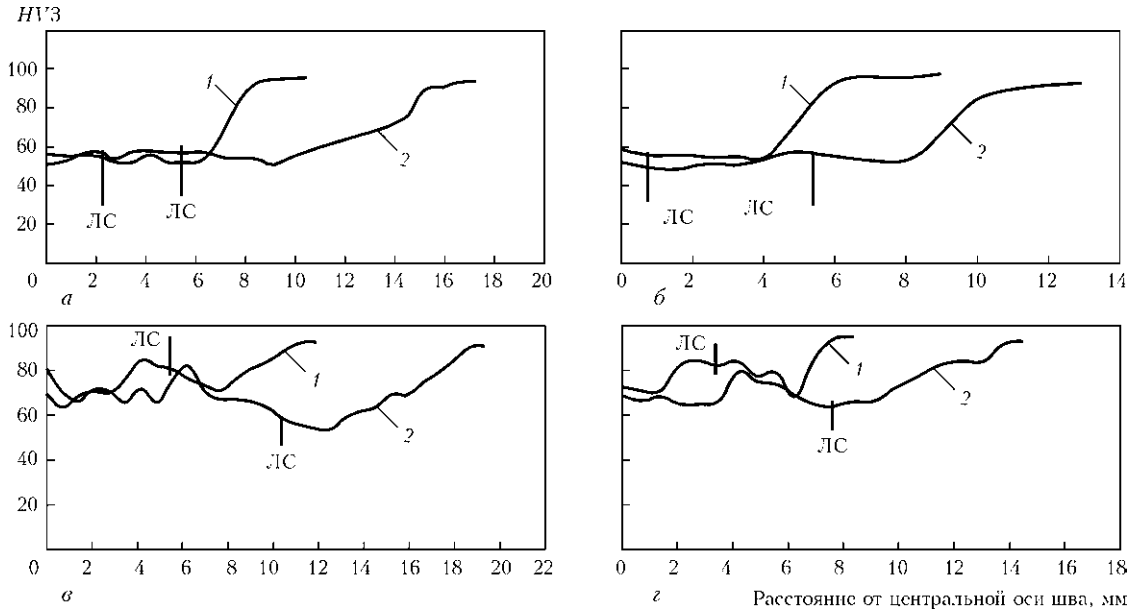


Рис. 6. Распределение твердости в поперечном сечении соединений сплава 6005 (*а*, *б*) и 6082 (*в*, *г*), выполненных без предварительного подогрева с использованием присадочного металла 4043 (*а*, *в*) и 5356 (*в*, *г*) способом GMAW (*1*) и GTAW (*2*)

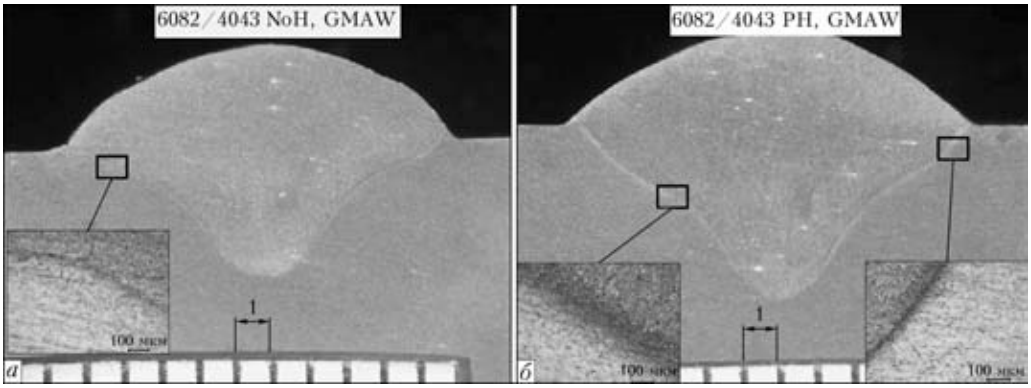


Рис. 7. Макрошлифы соединений сплава 6082, выполненных с использованием присадочного металла 4043 способом GMAW без (*а*) и с предварительным подогревом (PH) (*б*)

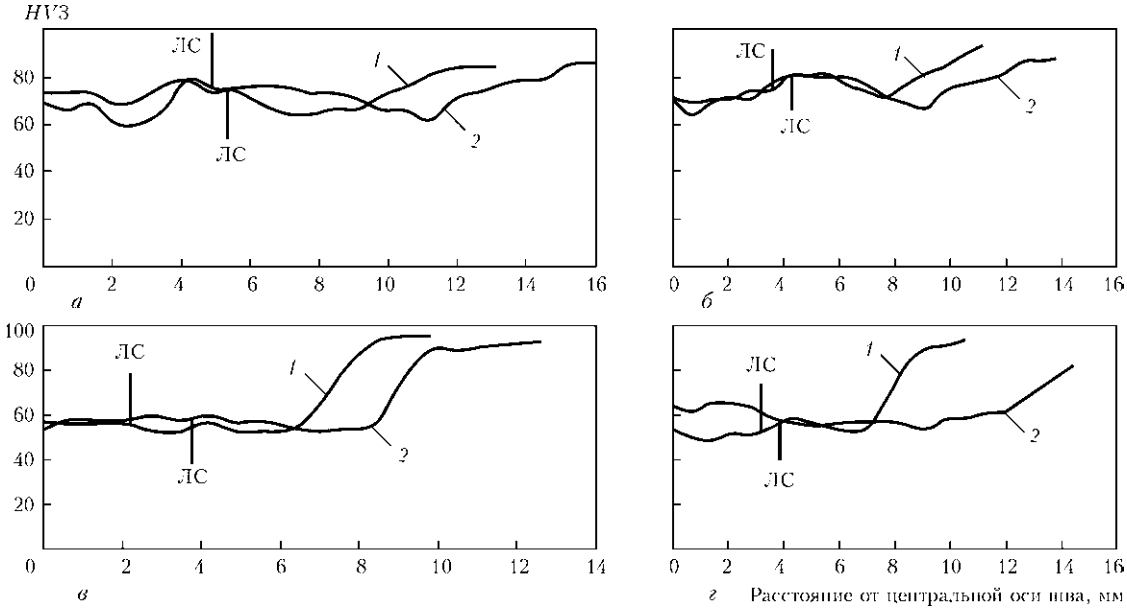


Рис. 8. Распределение твердости в поперечном сечении соединения сплава 6082 (*а*, *б*) и 6005 (*в*, *г*), выполненных с использованием присадочного металла 5356 (*а*, *г*) и 4043 (*б*, *в*) способом GTAW (*а*, *г*) и GMAW (*б*, *в*) без (*1*) и с предварительным подогревом (*2*)

новном металле, что приводит к лучшей пластичности и большему сопротивлению к растрескиванию. В случае с жесткозакрепленными конструкциями и соединениями предварительный подогрев позволяет минимизировать усадочные напряжения в шве и прилегающем основном металле, кроме того, медленное охлаждение позволяет водороду диффундировать до того, как он приведет к проблемам после затвердевания [21–23]. Алюминиево-магниево-кремниевые сплавы чувствительны к перегреву, что может привести к образованию ликвационного растрескивания в металле ЗТВ, т. е. предварительный подогрев нужно выполнять с особой осторожностью [12].

На рис. 7 приведены макрошлифы и микроструктуры образца шва, выполненного с исполь-

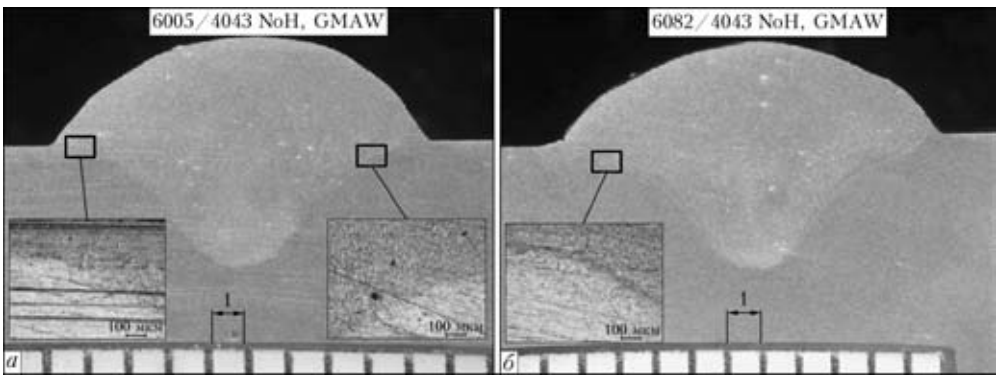


Рис. 9. Макрошлифы соединений сплава 6005 (*а*) и 6082 (*б*), выполненных с использованием присадочного металла 4043 без предварительного подогрева способом GMAW

зованием присадочного металла 4043 с помощью сварки GMAW с и без предварительного подогрева. При предварительном подогреве наблюдается более глубокое проплавление, чем без него. Уменьшение количества трещин благодаря предварительному нагреву (Q = 440 Дж/мм) незначительно, как можно заметить при сравнении рис. 7, *а* и 7, *б*. Хотя в случае с образцом из стали 6005, выполненным GTAW с использованием присадочного металла 5356 и предварительным подогревом, размер трещин несколько сокращается, но их количество остается приблизительно таким же.

Распределение твердости на рис. 8 показывает, что различие между профилями твердости с и без предварительного нагрева не составляет более *HV3*–1,5, а ЗТВ в образцах с предварительным подогревом на 1…2 мм шире. При предварительном подогреве смягченная область увеличивается в результате повышения температуры.

Во всех случаях, если сравнивать потерю твердости и количество образовавшихся трещин, то без значительных различий в твердости интенсивность развития трещин меньше при использовании присадочной проволоки 4043, чем проволоки 5356 как при GMAW, так и при GTAW. Тем не менее влияние предварительного подогрева не демонстрирует никакого уменьшения количества трещин.

Влияние основного металла. Согласно эксперименту сплав 6082 менее склонен к ликвационному растрескиванию, чем сплав 6005 (рис. 9). Количество подводимого тепла Q = 440 Дж/мм было одинаковым в обоих случаях.

Выводы

1. Сплав 6082 менее склонен к ликвационному растрескиванию, чем сплав 6005.

2. Способ сварки оказывает влияние на склонность к растрескиванию. Так, при GMAW наблюдается меньшее количество ликвационных трещин при более узкой ЗТВ и большей твердости в этом участке, чем при способе GTAW.

3. Присадочные проволоки 4043 и 5356 обеспечивают стойкость против кристаллизационных трещин, хотя и не гарантируют возникновение ликвационного растрескивания.

4. Предварительный подогрев не оказывает значительного влияния на возможность исключения ликвационных трещин.

Работа была выполнена при поддержке Финской организации по субсидированию технологий и инноваций (TEKES) по гранту MODUVA. Авторы благодарят Antii Kahkonen и Antii Heikkinen за предоставленные материалы.

1. *Adamowski J., Szkodo M.* Friction stir welds of aluminum alloy AW6082-T6 // J. of Achievements in Mat. and Manufacturing Eng. — 2007. — **20**. — P. 403–406.
2. *Cross C. E., Boellinghaus T.* The effect of restraint on weld solidification cracking in aluminum // Welding in the World. — 2006. — **50**. — P. 51–54.
3. *Mazzolani F. M.* Aluminium alloy structures. — 2nd ed. — London: Chapman & Hall, 1995.
4. *Gittos N. F., Scott M. H.* Heat affected zone cracking of Al–Mg–Si alloys // Welding J. — 1981. — **60**, № 6. — P. 95–103.
5. *Kou S.* Solidification and liquation cracking issues in welding // Welding J. of Minerals, Metals and Materials. — 2003. — **55**, № 6. — P. 37–41.
6. *Huang C., Kou S.* Partially melted zone in aluminum welds — liquation mechanism and directional solidification // Suppl. to Welding J. — 2000. — № 5. — P. 113–120.
7. *Huang C., Kou S.* Liquation mechanisms in multicomponent aluminum alloys during welding // Welding J. — 2002. — № 10. — P. 211–222.
8. *Huang C., Kou S.* Liquation cracking in partial — penetration Al–Mg–Si welds // Ibid. — 2003. — № 8. — P. 184–193.
9. *Huang C., Kou S.* Liquation cracking in full penetration Al–Mg–Si welds // Ibid. — 2004. — № 4. — P. 111–121.
10. *Cao G., Kou S.* Predicting and reducing liquation-cracking susceptibility based on temperature V_s fraction solid // Ibid. — 2006. — № 1. — P. 9–18.
11. *Hunziker O., Dye D., Reed R. C.* On formation of a centerline grain boundary during fusion welding // Acta Materialia. — 2000. — **17**(78). — P. 4191–4201.
12. *Messler R. W. Jr.* Principle of welding. — Wiley-Verlag GmbH & Co., KGaA, Weinheim, 2004.
13. *Davis J. R. Jr.* Aluminum and aluminum alloys. — ASM specialty hand book, 1994.
14. *Grong O.* Metallurgical modeling of welding. — 2nd ed., 1994.
15. *Kou S.* Welding metallurgy. — 2nd ed. — New York: John Wiley, 2003.
16. *Ma T., Den Ouden G.* // Int. J. for the Joining of Materials Denmark. — 1999. — **3**(11). — P. 61–67.
17. *Yeomans S. R.* Successful welding of aluminium and its alloys // Australian Welding J. — 1990. — Fourth quarter.
18. *Lincoln Electric.* The procedure handbook of arc welding. — Lincoln Electric: Cleveland, 1994.
19. *Rao K. P., Ramanaiah N., Viswanathan N.* Partially melted zone cracking in AA6061 welds // Materials and Design. — 2008. — **29**. — P. 179–186.
20. *A study* on the influence of clamping on welding distortion / T. Schenk, I. M. Richardson, M. Kraska, S. Ohnimus // Computational Materials Sci. — 2009. — **45**. — P. 999–1005.
21. *Akahter R., Ivanchev L., Burger H. P.* Effect of pre/post T6 heat treatment on the mechanical properties of laser welded SSM cast A356 aluminum alloy // Materials Sci. and Eng. A. — 2007. — **447**. — P. 192–196.
22. *Funderburk S.* What is preheat? // Engineering Services the Lincoln Electric Company. — Cleveland, 1998.
23. *Lyndon B. J.* Process specification for the heat treatment of aluminum alloys space center NASA. — Houston, 2006.

The effect of the welding method (GTAW and GMAW), composition of filler metal and preheating temperature on susceptibility of the welds to hot cracking in welding of aluminium alloys 6005 and 6082 is considered.

Поступила в редакцию 03.03.2011

УДК 621.791:62-135

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ИЗ СПЛАВА ХН65ВМТЮ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ю. П. ТАРАСЕНКО, канд. физ.-мат. наук, **О. Б. БЕРДНИК**, канд. техн. наук, **И. Н. ЦАРЕВА**, канд. физ.-мат. наук
(Ин-т машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, г. Н. Новгород, РФ)

Изучено состояние материала рабочих лопаток газотурбинных двигателей, прошедших длительный срок эксплуатации, определена их ремонтопригодность. Разработаны режимы высокотемпературной термической обработки сплава ХН65ВМТЮ (ЭИ893) для продления ресурса изделия.

Ключевые слова: рабочие лопатки, восстановительная термическая обработка, микроструктура, физико-механические свойства, продление ресурса

В качестве объектов исследования взяты рабочие лопатки первой ступени ротора турбины, изготовленные методом горячей штамповки, из сплава ХН65ВМТЮ (ЭИ893) с наработкой 53000, 60142 и 62449 ч. Рабочие лопатки могут длительное время (десятки тысяч часов) эксплуатироваться при высокой температуре около 700…750 °С [1]. Однако при этом неизбежно происходят структурно-фазовые превращения, влияющие на их работоспособность. В процессе эксплуатации накапливаются коррозионные, эрозионные, статические, термоусталостные и усталостные повреждения.

Целью настоящей работы являлось изучение постэксплуатационного состояния материала рабочих лопаток газотурбинных двигателей, прошедших длительный срок эксплуатации, определение их ремонтопригодности и возможности восстановления.

Для восстановления структуры и свойств материала опытных лопаток вырезанные из них заготовки термически обрабатывали по различным режимам [2, 3]:

нагрев до 1160 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе + нагрев до 1000 °С, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе + нагрев до 900 °С, выдержка 8 ч + нагрев до 820 °С, выдержка 15 ч, охлаждение на воздухе;

нагрев до 1160 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе + нагрев до 950 °С, выдержка 6 ч, охлаждение на воздухе + старение при 820 °С в течение 12 ч, охлаждение на воздухе;

нагрев до 1160 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе + старение при 800 °С в течение 12 ч, охлаждение на воздухе;

нагрев до 1050 °С, выдержка 3 ч, охлаждение на воздухе + старение при 850 °С в течение 12 ч, охлаждение на воздухе;

нагрев до 1030 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе + старение при 850 °С в течение 12 ч, охлаждение на воздухе;

старение при 750 °С в течение 24 ч, охлаждение на воздухе.

Для анализа состояния материала использованы методы оптической металлографии (микроскоп «Neophot-32») и растровой электронной микроскопии (VEGA/TESCAN). Испытания механических свойств плоских образцов на растяжение при комнатной температуре проводили на разрывной машине У10Т. Микродеформации определяли методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре «Дрон-3М» (с применением Cu–K_α-излучения в традиционной геометрии по Брэггу–Брентано).

С помощью анализа пробы определили химический состав сплава, мас. %: 16,0 Cr; 1,5 Al; 4 Mo; 1,45 Ti; 9 W; 0,5 Mn; 0,01 B; 3,0 Fe; 0,05 C. Химический состав материала лопаток соответствовал нормам, установленным ТУ 14-1-322–72 на сплав ХН65ВМТЮ.

Микроструктуры сплава ХН65ВМТЮ после разной наработки представлены на рис. 1–3. Из анализа структуры металла всех лопаток следует, что в результате длительной эксплуатации при рабочих температурах структурно-фазовое состояние материала существенно изменяется, деградирует. Транс- и интеркристаллитные микротрещины в структуре не обнаружены, но микроструктура сплава характеризуется разнозернистостью. Известно, что на границах разнозернистого металла в процессе эксплуатации могут возникать трещины, так как объемы крупного и мелкого зерна по-разному деформируются. Металл в замковой части имеет более однородную микроструктуру. В металле с меньшей наработкой (53000 ч) упрочняющая интерметаллидная γ′-фаза

© Ю. П. Тарасенко, О. Б. Бердник, И. Н. Царева, 2011

Таблица 1. Механические свойства сплава ХН65ВМТЮ

Состояние материала	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %
ТУ 108.02.005–76	≥ 850	490...660	≥ 20	≥ 25
После эксплуатации 53000 ч	990	340	19	22
	1030	445	26	23
После эксплуатации 60142 ч	1090	430	22	28
После эксплуатации 62449 ч	1000	350	21	26
1. Закалка с 1160 °С, 2 ч, охлаждение на воздухе + 1000 °С, 4 ч, охлаждение на воздухе + старение при 900 °С, 8 ч, охлаждение на воздухе + старение до 820 °С, 15 ч, охлаждение на воздухе	770	350	44	41
2. Закалка с 1160 °С, 2 ч, охлаждение на воздухе + старение при 950 °С, 6 ч, охлаждение на воздухе + старение до 820 °С, 12 ч, охлаждение на воздухе	680	410	22	22
3. Закалка с 1160 °С, 2 ч, охлаждение на воздухе + старение при 800 °С, 12 ч, охлаждение на воздухе	790	415	42	39
4. Закалка с 1050 °С, 3 ч, охлаждение на воздухе + старение при 850 °С, 12 ч, охлаждение на воздухе	920	490	36	25
5. Закалка с 1050 °С, 3 ч, охлаждение на воздухе + старение при 850 °С, 12 ч, охлаждение на воздухе + старение при 750 °С, 24 ч, охлаждение на воздухе	980	460	30	26
Эксплуатация 60142 ч + ВТО	990	555	28	43
Эксплуатация 62449 ч + ВТО	940	485	20	24

(Ni_3Al,Ti) практически полностью растворилась в твердом растворе, а ее остатки имеют хаотичное распределение по объему зерен. Границы зерен линейны, заполнены мелкодисперсной карбидной и интерметаллидной фазами (рис. 1).

При увеличении срока эксплуатации до 60142 ч в микроструктуре образцов (рис. 2) наблюдается выделение крупных карбидов (до 3 мкм), выстраивающихся в цепочки по границам зерен. Произошло перераспределение упрочняющей интерметаллидной фазы, большая часть которой выделилась около границ зерен, что обедняет тело зерна. При увеличении срока эксплуатации материала до 62449 ч (рис. 3) происходит дополнительное выделение и укрупнение карбидов типа MeC, MeC_6, $Me_{23}C_6$ дисперсностью от 0,5 до 6 мкм и выделение большого количества мелкодисперсной γ′-фазы (Ni_3Al,Ti). Согласно инструкции по продлению срока службы металла основных элементов турбин СО 153-34.17.448–2003 в микроструктуре сплава ХН65ВМТЮ не допускаются конгломераты хромистых карбидов размером более 5 мкм. Сплав с наработкой более 62000 ч эксплуатироваться далее не может.

В результате микроспектрального анализа карбидных включений, расположенных на границе и внутри зерен металла, получены спектрограммы, которые позволяют установить, что исследуемое карбидное включение, представленное на рис. 4, *а*, образовано на основе вольфрама, молибдена и хрома и соответствует сложному карбиду II группы типа (W, Mo, Cr)C, а на рис. 4, *б* — карбиду молибдена Mo_2C, являющемуся также карбидом II группы (фазы внедрения). В связи с малым содержанием углерода в сплаве ХН65ВМТЮ (≤ 0,07 % С) количество карбидной фазы в нем незначительно, и она располагается преимущественно по границам аустенитных зерен.

Результаты механических испытаний образцов на растяжение при комнатной температуре показали, что материал в постэксплуатационном состоянии не соответствует требованиям ТУ

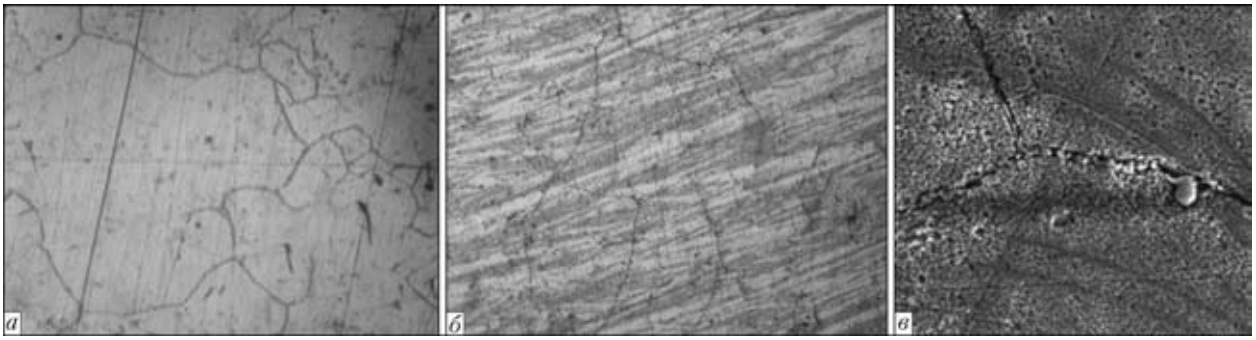


Рис. 1. Микроструктуры сплава ХН65ВМТЮ после эксплуатации 53000 ч образцов из перовой (*а*, *в*) и замковой (*б*) части лопатки: *а*, *б*, ×250; *в*, ×10000

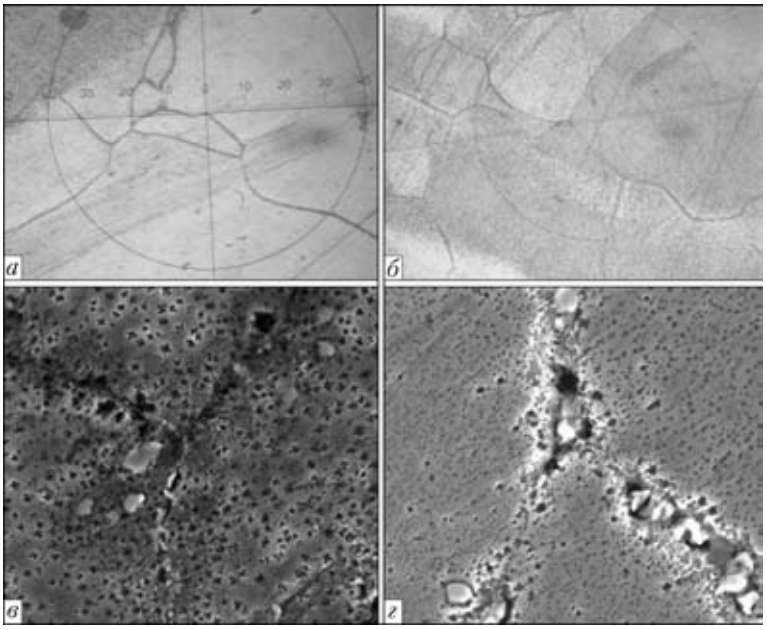


Рис. 2. Микроструктуры сплава ХН65ВМТЮ после эксплуатации 60142 ч образцов из перовой (*а*, *в*) и замковой (*б*, *г*) части: а, *б*, ×250; *в*, *г*, ×10000

108.02.005–76, по пределу текучести и пластическим свойствам не зависимо от сроков наработки. Из табл. 2 следует, что в процессе длительной эксплуатации в материале пера лопатки в результате дополнительного выделения дисперсных частиц γ′-фазы произошло увеличение прочностных и снижение пластических свойств. Предел прочности материала повысился до 1000…1090 МПа при 850 МПа, допустимых по ТУ 108.02.005–76 (*а*), а предел текучести снизился до 340…430 МПа при норме 490…660 МПа.

Опробование сплава ХН65ВМТЮ на материале с наименьшей наработкой (53000 ч) экспериментальных режимов восстановительной термической обработкой (ВТО) привело к снижению уровня прочностных и значительному росту пластических свойств (относительного удлинения и относительного сужения). Оптимальный результат получен после применения режимов № 4 и 5 ВТО (см. табл. 1). Из анализа микрофотографий на рис. 5 следует, что микроструктура сплава ХН65ВМТЮ становится более однородной, происходит снижение разнозернистости. ВТО приводит к некоторой стабилизации микроструктуры, повышению количества γ′-фазы: при использовании ступенчатых режимов ВТО содержание γ′-фазы увеличивается до 3…4 %, при одноступенчатом старении при 820 или 850 °С количество γ′-фазы повышается до 10 %, что является допустимым содержанием для данного сплава. При проведении ВТО образцов по режиму № 5 в течение 30 ч происходит полная регенерация деградированной структуры металла лопаток. В данном случае избыточная интерметаллидная γ′-фаза наблюдается в виде мелкодисперсных выделений. Содержание γ′-фазы после ВТО повышается до 12 %, однако при длительном старении происходит выделение крупных карбидов на границе зерен, которые являются концентраторами напряжений.

Для сплавов с наработкой 60142 и 62449 ч в качестве восстановительной был применен режим № 4 ВТО (закалка 1050 °С, 3 ч, охлаждение на воздухе + старение при 850 °С, 12 ч, охлаждение на воздухе), который показал оптимальные значения структурных и механических показателей на образцах из сплава с наработкой 53000 ч.

При ВТО на сплавах с наработкой 60142 и 62449 ч (рис. 6) получен удовлетворительный результат: произошло растворение и перераспределение интерметаллидной фазы, измельчение карбидов. Изменения в микроструктуре положительно отразились на механических характеристиках материала, представленных в табл. 1. ВТО привела к снижению предела прочности до 990…940 МПа и повышению предела текучести до 555…485 МПа, что соответствует нормируемым значениям механических свойств.

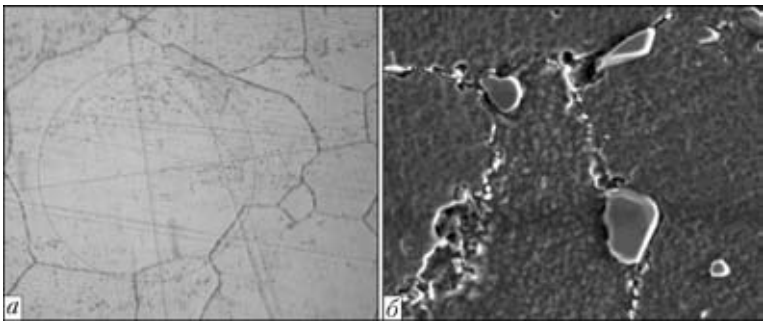


Рис. 3. Микроструктуры сплава ХН65ВМТЮ после эксплуатации 62449 ч: *а*, ×250; *б*, ×1000

Таблица 2. Данные рентгеноструктурного анализа материалов

Состояние материала	D, нм	ε	r_L, см$^{-2}$	ρ_ε, см$^{-2}$
После эксплуатации	270	0,0004	$4{,}1\cdot10^9$	$8\cdot10^9$
Наплавка проволокой 04ХН50ВМТЮБ-ВИ	57	0,00011	$9{,}2\cdot10^{10}$	$6{,}1\cdot10^8$
После наплавки и отпуска	~500	0,00046	$\sim10^9$	10^{10}

Для восстановления геометрических размеров рабочих лопаток применяли сварочно-наплавочные работы проволокой на никелевой основе марки 04ХН50ВМТЮБ-ВИ (ЭП648-ВИ) следующего химического состава, %: 0,04 С; 0,14 Mn; 0,25 Si; 22,2 Cr; 66,3 Ni;

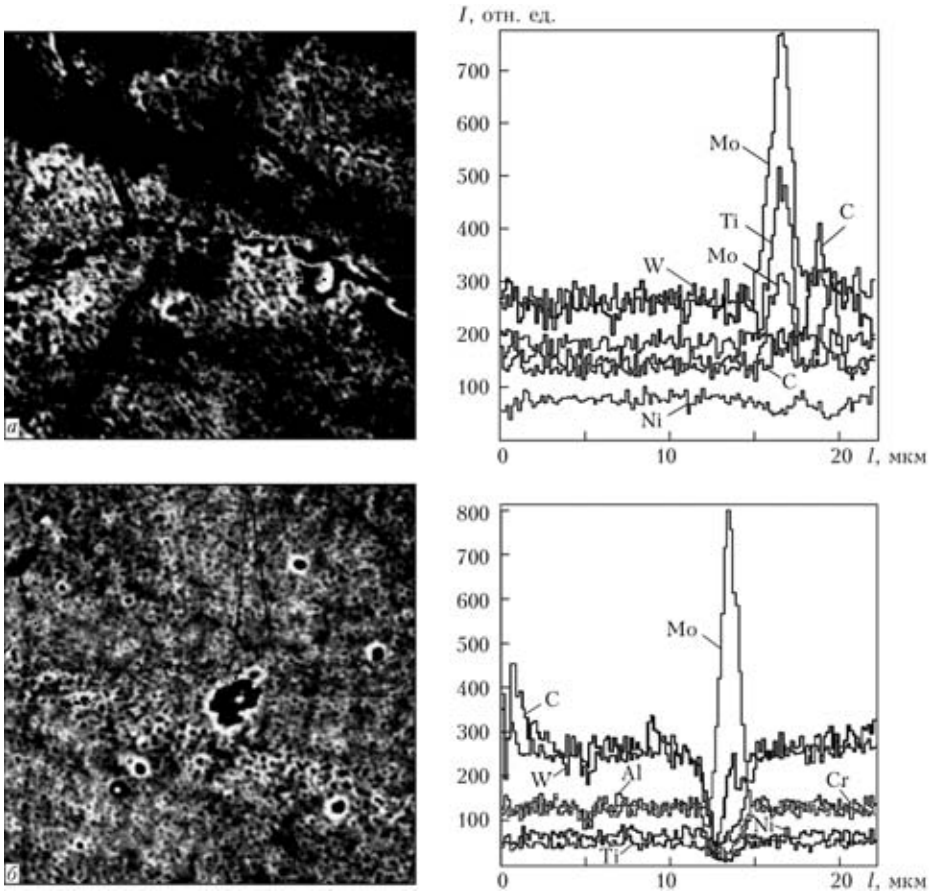


Рис. 4. Микроструктуры и спектрограммы карбидных включений, выявленных на поверхности шлифов: *а* — после эксплуатации; *б* — после ВТО по следующему режиму: закалка с 1050 °С на воздухе + старение при 850 °С, 12 ч, охлаждение на воздухе

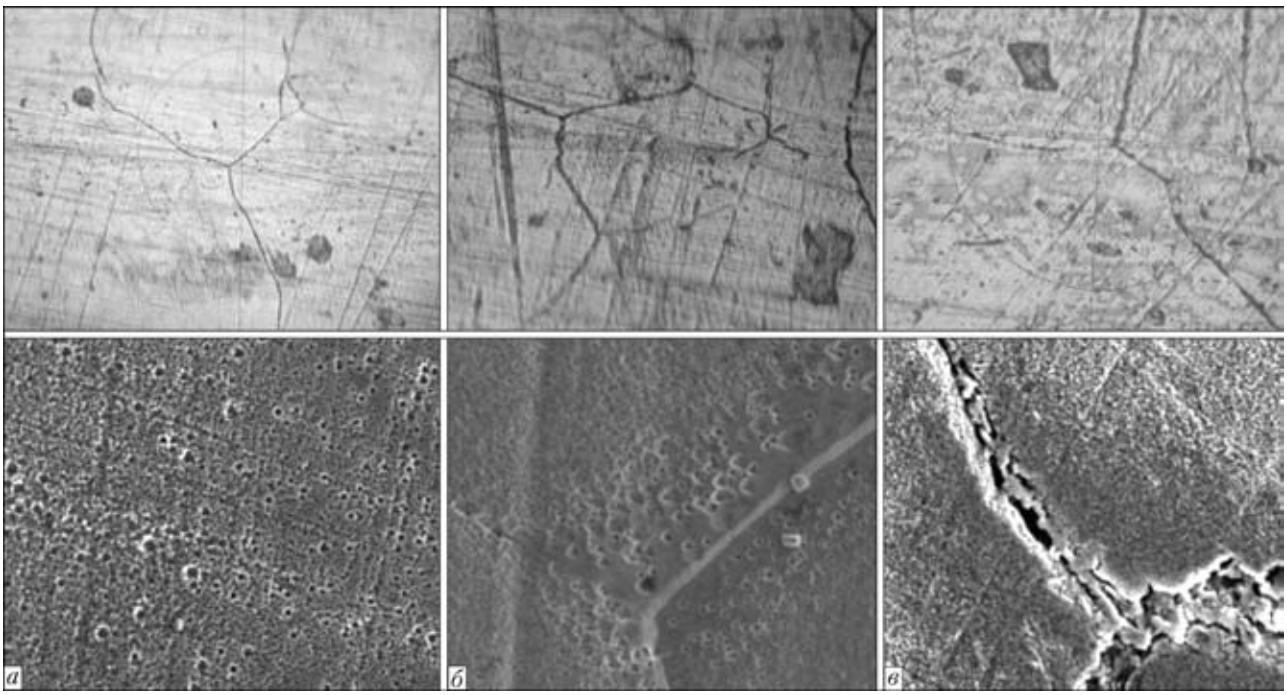


Рис. 5. Микроструктуры сплава ХН65ВМТЮ с наработкой 5300 ч после различных вариантов ВТО: *а* — закалка с 1160 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе + 1000 °С, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе + старение при 900 °С, выдержка 8 ч + старение при 820 °С, выдержка 15 ч, охлаждение на воздухе; *б* — закалка с 1160 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе + старение при 950 °С, выдержка 6 ч, охлаждение на воздухе + старение при 820 °С в течение 12 ч, охлаждение на воздухе; *в* — закалка с 1050 °С, выдержка 3 ч, охлаждение на воздухе + старение при 850 °С, выдержка 12 ч, охлаждение на воздухе + + старение при 750 °С выдержка 24 ч, охлаждение на воздухе; верхний ряд, ×1500; нижний, ×1000

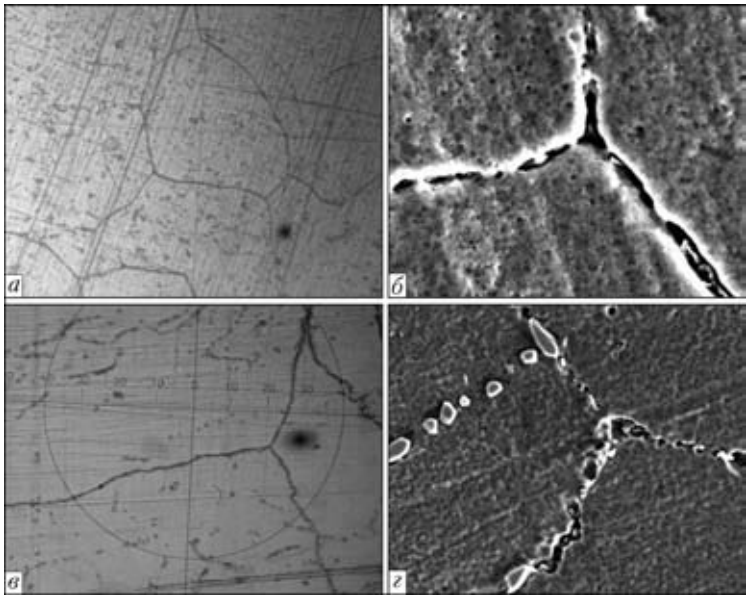


Рис. 6. Микроструктуры сплава ХН65ВМТЮ после ВТО: *а*, *б* — закалка с 1050 °С, 3 ч, охлаждение на воздухе + старение при 850 °С, 12 ч, охлаждение на воздухе при наработке 60142, *в*, *г* — то же, но при наработке и 62449 ч (*в*, *г*): *а*, *в*, ×500; *б*, *г*, ×10000

1,26 Nb; 2,4 Mo; 1,6 Ti; 0,4 Al; 0,95 Fe; 4,4 W. Значения прочностных показателей выбранной наплавочной проволоки близки к значениям основного металла лопаток (по пределу прочности $\sigma_в$ = = 800 МПа, $K = 0{,}94\sigma_в^{осн}$; по пределу текучести $\sigma_{0,2}$ = 470 МПа, $K = 0{,}95\sigma_т^{осн}$), что удовлетворяет требованиям для наплавленного материала. Для снятия остаточных напряжений после сварки был сделан отпуск при 700 °С в течение 8 ч. В табл. 2 представлены результаты рентгеноструктурного анализа образцов.

В состоянии после эксплуатации в материале лопаток зарегистрированы средний уровень микродеформаций и однородное распределение плотности дислокаций внутри и на границах субзеренных блоков. Наплавка значительно размельчает субзерна и резко повышает плотность граничных дислокаций (почти на 2 порядка), что в свою очередь может охрупчивать границы. ВТО способствует укрупнению блоков мозаики и снижению плотности дислокационных дефектов на границе.

На основании проведенных исследований можно сделать заключение, что материал лопаток с разной наработкой от 53000 до 62449 ч имеет деградированную микроструктуру и нуждается во ВТО. Эксплуатация рабочих лопаток из сплава ХН65ВМТЮ более 62000 ч без восстановительного ремонта нежелательна, так как отрицательные изменения в микроструктуре (образование крупных карбидов на границах зерен) могут привести к разрушению лопаток. Все исследованные в данной работе лопатки являются ремонтопригодными и прошли полный восстановительный цикл, включающий термическую обработку для восстановления структуры и физико-механических свойств, наплавочные работы для восстановления геометрических размеров изделия и нанесение газоплазменным методом защитного жаростойкого покрытия. В настоящее время рабочие лопатки установлены в агрегаты и находятся в эксплуатации. Таким образом, технологический цикл ремонтно-восстановительной обработки можно представить в виде схемы:

100 % входной контроль + ВТО (закалка + + старение) + механическая обработка (разделка дефектов) + наплавочные работы (восстановление геометрии), контроль + термическая обработка (отпуск для снятия напряжений) + подготовка поверхности для нанесения покрытий + нанесение защитных жаростойких покрытий газоплазменным методом («Ni–Al» + ZrO_2) + 100 % выходной контроль.

От редакции. По мнению рецензента данной работы, выполнение на воздухе термообработки при температуре 1050 °С бывших в эксплуатации лопаток может привести к окислению поверхности замка, а последующая зачистка либо шлифовка не исключает утонения замковой части и неплотное соединение лопаток.

1. *Гецов Л. Б.* Материалы и прочность деталей газовых турбин. Кн.1. — Рыбинск: ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2010. — 611 с.
2. *Рыбников А. И., Гецов Л. Б.* Термическая обработка лопаток с покрытиями // Металловедение и терм. обработка мет. — 1995. — № 9. — С. 21–25.
3. *Филатов М. А., Судаков В. С.* Влияние термической обработки на структуру и свойства жаропрочных никелевых сплавов // Там же. — 1995. — № 6. — С. 12–15.

Condition of the material of gas turbine engine blades after long-time operation was studied, and their repairability was determined. Parameters were developed for high-temperature heat treatment of alloy KhN65VMTYu (EI893) to extend service life of products.

Поступила в редакцию 17.03.2011

УДК 621.791.927.55

СВОЙСТВА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА ДЛЯ ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ АРМАТУРЫ

Е. Ф. ПЕРЕПЛЕТЧИКОВ, канд. техн. наук, **И. А. РЯБЦЕВ**, д-р техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты исследования свойств сплавов на основе железа, предназначенных для плазменно-порошковой наплавки уплотнительных поверхностей арматуры различного назначения. Показано, что наилучшим сочетанием коррозионной стойкости, горячей твердости, стойкости против задирания, термической выносливости отличается наплавленный металл 15Х19Н9М4С5Г3Д.

Ключевые слова: плазменно-порошковая наплавка, наплавочные материалы, свойства наплавленного металла, наплавка арматуры, коррозионная стойкость, горячая твердость

Для наплавки уплотнительных поверхностей арматуры в энергетическом, нефтехимическом, судовом и общем машиностроении достаточно широко используют сплавы на основе железа. При этом на многих предприятиях стран СНГ для этой цели применяют ручную или механизированную электродуговую наплавку. В зависимости от условий эксплуатации арматуры для ручной электродуговой наплавки используют электроды УОНИ-13/НЖ-2, ЦН-6Л, ЦН-12М, ЦН-24, а для механизированной под флюсом — проволоки сплошного сечения Нп-20Х14, Св-20Х13, Св-10Х17Т, Св-13Х25Т, порошковые проволоки ПП-АН106, ПП-АН133, ПП-АН157 и порошковую ленту ПЛ-АН150.

Механизированная электродуговая наплавка порошковыми проволоками по сравнению с ручной дуговой наплавкой штучными электродами обеспечивает получение более качественного наплавленного металла. Однако ее выполняют, по крайней мере, в три слоя, что ведет к перерасходу наплавочных материалов и увеличению продолжительности процесса наплавки [1]. Кроме того, при механизированной электродуговой наплавке деталей малых диаметров (≤ 200 мм) имеют место трудности, связанные с удалением шлаковой корки с предыдущего наплавленного слоя. В этом случае при наплавке седел необходимо также применять формирующие устройства.

Как показал опыт, плазменно-порошковая наплавка обеспечивает получение наплавленного металла заданного химического состава уже в первом слое и лишена многих недостатков дуговой наплавки [2].

© Е. Ф. Переплетчиков, И. А. Рябцев, 2011

Цель данной работы — исследование свойств сплавов на основе железа применительно к плазменно-порошковой наплавке уплотнительных поверхностей арматуры различного назначения.

На основе имеющегося опыта для исследований были выбраны следующие материалы: хромистая сталь 22Х16Н2М; хромоникелькремнистая сталь 08Х17Н8С6Г (соответствует металлу, наплавленному электродами ЦН-6Л); сталь 13Х16Н8М5С5Г4Б (соответствует металлу, наплавленному электродами ЦН-12М, порошками зарубежного производства марок DS ZN12, Hoganas X-FeSP573, C1111, а также порошковой проволокой марки SK AF Antinit Dur500 [3]); опытные хромоникелькремнистые стали 04Х19Н10М4С5ГФА и 15Х19Н9М4С5Г3Д, которые отличаются содержанием углерода, ванадия, азота и меди; никелевый сплав Н77Х16С3Р3 (в качестве эталона).

Легирование опытных хромоникелькремнистых сталей азотом проводили с целью повышения их пластичности, а медью — для улучшения антифрикционных свойств. Молибден в стали 22Х16Н2М способствует увеличению ее жаростойкости и твердости в наплавленном состоянии.

Все указанные наплавочные материалы использовали в виде порошков фракции 80…200 мкм, которые изготавливали распылением жидкого металла азотом в промышленных условиях.

Плазменно-порошковую наплавку образцов для исследований выполняли на серийном наплавочном оборудовании, укомплектованном плазмотроном с локальным боковым вводом порошка в дугу, который обеспечивает стабильность наплавки при использовании ферромагнитных порошков [4].

Измерения твердости при рабочих температурах проводили на приборе «Помея» фирмы «Помп Сельтик» при нагрузке на индентор 108 Н, выдержке 1 мин и давлении воздуха в рабочей камере 1,33 МПа. Твердость измеряли на наплавленных образцах диаметром 37 мм и высотой 5 мм.

Рис. 1. Вид колец с наплавленным слоем для испытаний на термостойкость

Испытания на общую коррозионную стойкость проводили в водяном паре и на воздухе при температуре 700 °С в течение 500 ч, а также в дистиллированной воде при температуре 300 °С и давлении 20 МПа в течение 1000 ч. Образцы размером 40×10×3,5 мм вырезали из наплавленного металла после отпуска при температуре 600 °С в течение 2 ч.

Стойкость наплавленного металла к межкристаллитной коррозии (МКК) изучали по методу АМУ (ГОСТ 6032–2003) [5] и электрохимическим методом [6]. Для последнего образцы размером 30×10×50 мм выдерживали в растворе $HClO_4$ + NaCl после провоцирующего отпуска при температурах 650, 730 и 850 °С в течение 2 ч. Склонность к МКК оценивали по росту анодного тока растворения *i* при постоянном потенциале +0,3 В в пределах активационного участка.

Испытания на стойкость против задирания проводили на специальном стенде в среде пара на следующих режимах: *T* = 300 °С и *P* = = 12,0 МПа; *T* = 540 °С и *P* = 16,0 МПа; *T* = = 545 °С и *P* = 25,5 МПа. Образцами служили реальные детали затвора задвижки DN150, уплотнительные поверхности которой работают в условиях наибольшего удельного давления. Максимальное количество открытий и закрытий при испытаниях было принято равным 100. Путь относительного перемещения деталей затвора под действием давления составлял за один цикл около 32 мм. Контроль за состоянием затвора при испытаниях производили по протечкам пара. Допускаемая протечка пара составляла около 55 г/мин. Показателем стойкости служило значение удельного задира, т. е. отношение максимальной глубины царапин (в микрометрах) к суммарному пути трения (в метрах).

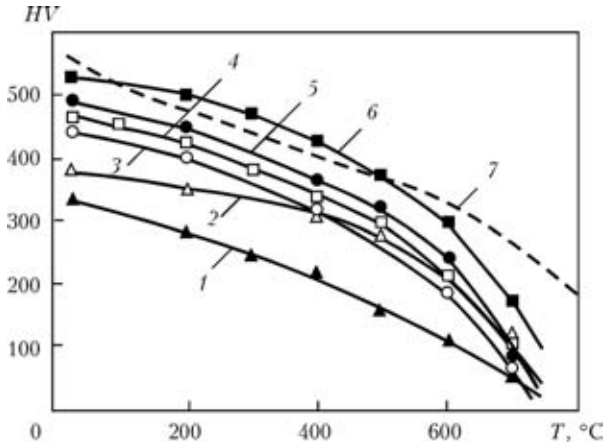


Рис. 2. Зависимость твердости *HV* наплавленного металла для упрочнения уплотнительных поверхностей от температуры [6]: *1* — 08Х17Н8С6Г; *2* — 04Х19Н10М4С5ГФА; *3* — 22Х16Н2М; *4* — 13Х16Н8М5С5Г4Б; *5* — 15Х19Н9М4С5Г3Д; *6* — Н77Х16С3Р3; *7* — стеллит № 6

Испытаниям на стойкость против растрескивания при теплосменах (на термостойкость) подвергали кольца из стали 20 наружного диаметра 130 мм, шириной 18 мм и высотой 25 мм с односторонней наплавкой на торцевой поверхности (рис. 1). Толщина наплавленного слоя составляла 3,8…4,0 мм. После наплавки проводили отпуск при температуре 600 °С в течение 2 ч. Испытания предусматривали нагрев колец в электропечи до 300 °С и охлаждение их в проточной воде комнатной температуры. Термическую выносливость исследуемых сплавов оценивали по количеству теплосмен до появления трещин в наплавленном слое. Наличие трещин контролировали люминесцентным методом.

Зависимость твердости исследуемых сплавов от температуры показана на рис. 2. Там же для сравнения приведена горячая твердость никелевого и кобальтового сплавов, которые отличаются превосходными служебными характеристиками. Все типы наплавленного металла на основе железа, за исключением 08Х17Н8С6Г, сохраняют достаточно высокий уровень твердости при *T* = 400…600 °С. Наибольшая горячая твердость у серийного сплава 13Х16Н8М5С5Г4Б и опытного наплавленного металла 15Х19Н9М4С5Г3Д, однако она ниже, чем у никелевых и кобальтовых сплавов.

В водяном паре и на воздухе все материалы на основе железа окисляются существенно меньше, чем сплав на основе никеля. По коррозионной стойкости в дистиллированной воде все исследуемые типы наплавленного металла принадлежат к группе «весьма стойких» (ГОСТ 13819–68).

Как видно по анодным потенциометрическим кривым прямого хода (рис. 3), наплавленные металлы 22Х16Н2М и 08Х17Н8С6Г характеризуются увеличением тока *i* при потенциале +0,3 В, что свидетельствует об их склонности к МКК. Остальные типы наплавленного металла проявляют стойкость к МКК, поскольку не имеют активационного участка при потенциале +0,3 В.

При испытаниях на МКК по методу АМУ все образцы после кипячения в растворе, содержащем 160 г/дм^3 $CuSO_4$ и 100 г/дм^3 H_2SO_4, в течение 24 ч при загибании на угол 90° разрушались. Комплексные исследования показали, что у наплав-

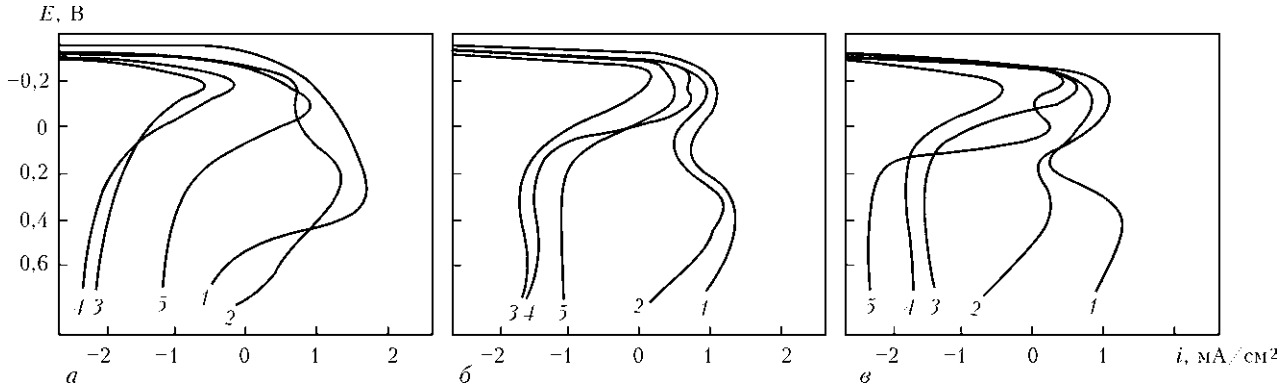


Рис. 3. Анодные потенциометрические кривые прямого хода наплавленного металла при различных температурах отпуска 650 (*а*), 730 (*б*) и 850 (*в*) °С в течение 2 ч: *1* — 22Х16Н2М; *2* — 08Х17Н8С6Г; *3* — 13Х16Н8М5С5Г4Б; *4* — 04Х19Н10М4С5ГФА; *5* — 15Х19Н9М4С5Г3Д

ленных металлов 22Х16Н2М и 08Х17Н8С6Г в результате обеднения приграничной области зерен хромом имеет место развитие МКК в глубь наплавленного слоя.

Обычно стойкость материалов уплотнительных поверхностей на задирание и термическую выносливость определяют по методикам, предусматривающим испытания небольших образцов, вырезанных из наплавленного металла либо наплавленных дисков диаметром 45 мм на специальных лабораторных установках, которые имитируют рабочие условия [7, 8].

В отличие от испытаний малых образцов проведенные нами опыты на реальных деталях позволяют учесть ряд факторов, способных вызвать или ускорить образование трещин термической усталости и задиров, а именно состояние структуры наплавленного слоя, наличие в нем значительных напряжений (рабочих, сварочных, термических и др.), а также технологических дефектов (рыхлот, несплавлений, неметаллических включений и др.).

Испытания показали, что наплавленный металл типа хромистой стали 22Х16Н2М имеет хорошую стойкость против задирания при температуре пара 300 °С и давлении 12 МПа, но в условиях высоких параметров рабочей среды (соответственно 545 °С и 25,5 МПа) его стойкость существенно уменьшается (таблица), хотя при этом горячая твердость остается на достаточно высоком уровне (см. рис. 2).

Среди хромоникелькремнистых материалов наилучшую стойкость против задирания имел наплавленный металл 15Х19Н9М4С5Г3Д. Как при ручной наплавке электродами ЦН-6Л, так и плазменной наплавке с использованием в качестве присадки порошка наплавленный металл типа 08Х17Н8С6Г уступает по стойкости против задирания 13Х16Н8М5С5Г4Б [9, 10]. Как видно из таблицы, все типы наплавленного металла на основе железа по стойкости против задирания существенно уступают никелевым сплавам.

Низкой термостойкостью характеризуется наплавленный металл 13Х16Н8М5С5Г4Б независимо от способа его наплавки и вида наплавочного материала (рис. 4). Следует отметить, что термостойкость рассматриваемых материалов, как правило, уменьшается с увеличением их твердости и сопротивляемости задиранию, что обычно сопровождается резким снижением пластичности. Вместе с тем представляется возможным за счет рационального комплексного легирования и модифицирования наплавленного металла системы Fe–Cr–Ni–Si–Mo обеспечить оптимальный уровень этих характеристик. Как видно из рис. 3, оптимальную термостойкость имел наплавленный

Результаты испытаний на задирание и коррозионную стойкость [9]

Тип наплавленного металла	Твердость наплавленного металла *HRC*	Удельный задир, мкм/м	Длительность испытаний, ч		
			500		1000
			Водяной пар	Воздух	Дистиллированная вода
08Х17Н8С6Г	31…34	9,3	0,0135	0,0186	0,0097
13Х16Н8М5С5Г4Б	45…49	4,6	0,0093	0,0145	0,0061
22Х16Н2М	42…45	14,5	0,0087	0,0137	0,0081
15Х19Н9М4С5Г3Д	48…51	1,8	0,0075	0,0132	0,0051
04Х19Н10М4С5ГФА	37…42	2,8	0,0061	0,0121	0,0041
Н77Х16С3Р3	51…53	1,3	0,0991	0,0250	0,0038

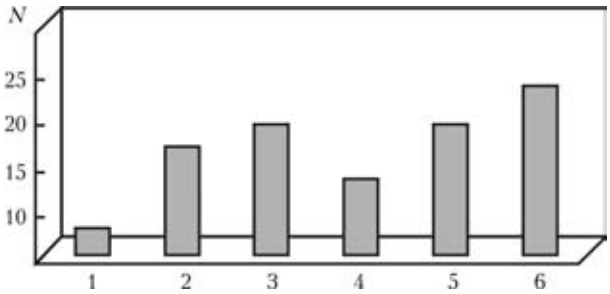


Рис. 4. Термостойкость наплавленного металла [9]: 1 — 13Х16Н8М5С5Г4Б; 2 — 22Х16Н2М; 3 — 15Х19Н9М4С5Г3Д; 4 — 04Х20Н10М4С5ГФА; 5 — Н77Х16С3Р3; 6 — 08Х17Н8С6Г (*N* — количество теплосмен до появления первой трещины)

металл 15Х19Н9М4С5Г3Д. Имея примерно одинаковую твердость со сплавом на никелевой основе типа Н77Х16С3Р3 (*HRC* 50…51), он обеспечивает примерно равную с ним термостойкость.

Структура наплавленного металла 15Х19Н9М4С5Г3Д в исходном состоянии аустенитно-ферритная, объемная доля ферритной фазы составляет 40 %. В зависимости от типа основного металла, его теплофизических характеристик, определяющих условия кристаллизации наплавленного металла, структура упомянутого типа наплавленного металла заметно изменяется (рис. 5).

После наплавки этот металл имеет сравнительно высокую твердость (*HRC* 42…44), что указывает на возможность присутствия в его структуре карбидно-силицидной фазы. Как известно, концентрация элементов-ферритизаторов (хрома, кремния, молибдена и др.) в ферритной фазе выше, чем в аустенитной; более высока в ней и их диффузионная подвижность, что способствует более интенсивному упрочнению ферритной составляющей за счет процессов ее упорядочения и распада при выдержках в соответствующем диапазоне температуры. Отпуск в интервале 650…850 °С приводит к повышению твердости этого типа наплавленного металла до *HRC* 46… 51 и по данным магнитных измерений сопровождается заметным уменьшением количества феррита — тем более значительным, чем больше было его в исходной структуре (рис. 5). Возможно, распад феррита в этих условиях происходит по следующей схеме: $\alpha \rightarrow \gamma''$ + карбиды типа Me_6C + интерметаллиды типа σ-фазы + силициды типа $Cr_3Ni_5Si_2$ (где α — ферритная фаза; γ'' — вторичный аустенит).

Как видно из рис. 6, благодаря характерному для плазменной наплавки малому проплавлению основного металла требуемая твердость и заданный химический состав наплавленного металла обеспечивается уже на расстоянии 0,3…0,5 мм от поверхности сплавления. В результате старения при 600 °С в течение 500 и 1000 ч процессы распада феррита приобретают большую завершенность. Существенных изменений твердости наплавленного слоя не наблюдается. В зоне сплав-

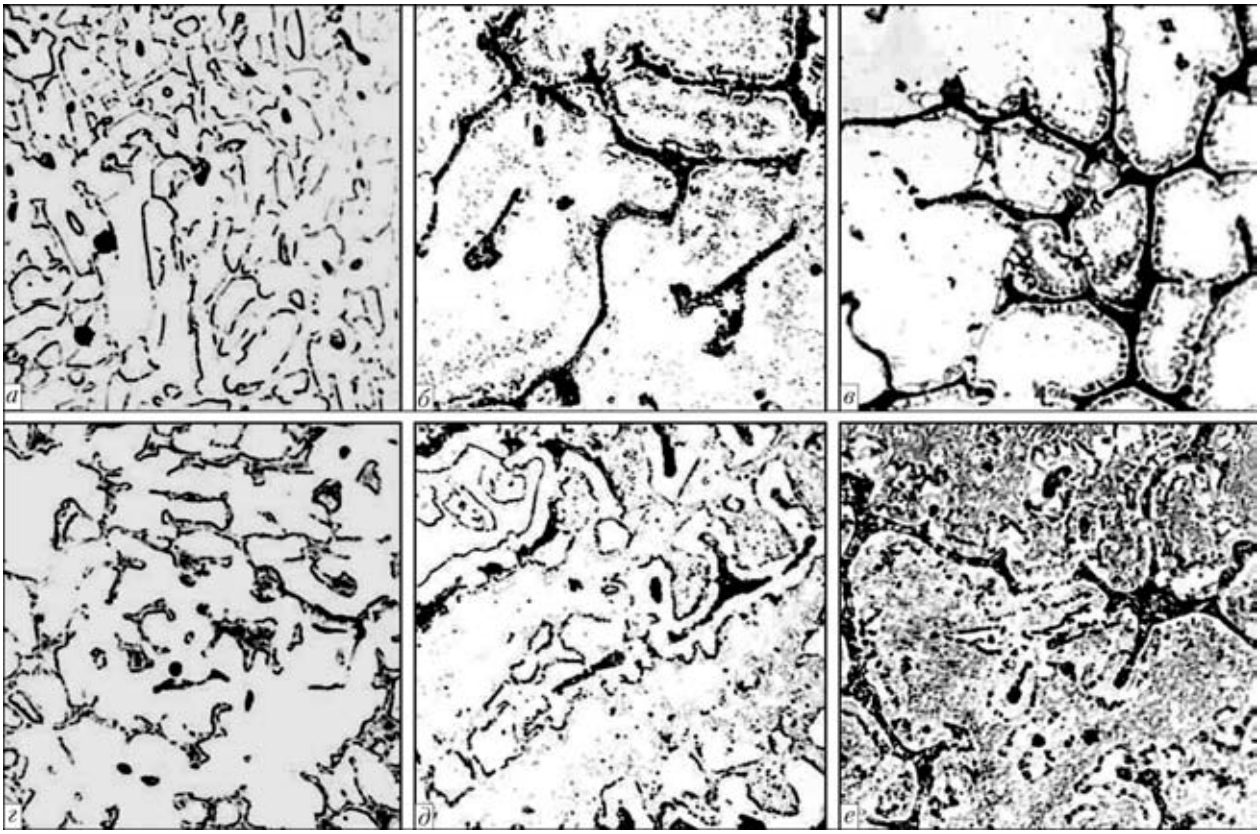


Рис. 5. Микроструктуры (×500) металла, наплавленного порошком 15Х19Н9М4С5Г3Д на стали 20 (*а*, *г*), 12Х1МФ (*б*, *д*) и 08Х18Н10Т (*в*, *е*) в исходном состоянии (*а*–*в*) и после отпуска при температуре 650 °С в течение 2 ч (*г*–*е*)

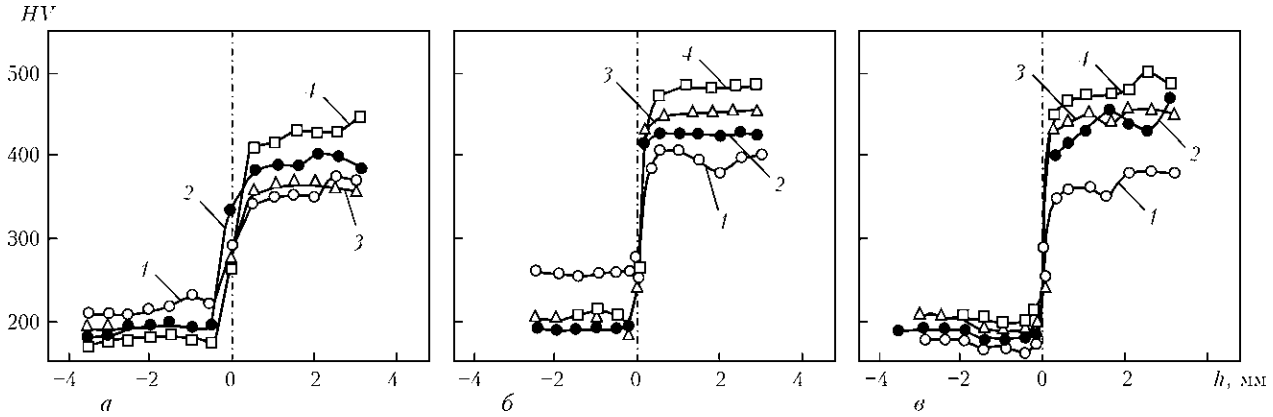


Рис. 6. Распределение твердости по высоте наплавленного слоя 15Х19Н9М4С5Г3Д: *а* — основной металл сталь 20; *б* — то же сталь 12Х1МФ; *в* — то же сталь 08Х18Н10Т; *1* — исходное состояние; *2* — после отпуска; *3*, *4* — после отпуска и старения при T = 600 °С в течение соответственно 500 и 1000 ч

ления не образуется твердых и хрупких составляющих, что должно благоприятно сказываться на работоспособности и надежности наплавленной арматуры.

Проведенные испытания сплавов на основе железа в условиях, максимально приближающихся к условиям работы энергетической арматуры, показали, что наилучшим сочетанием коррозионной стойкости, горячей твердости, стойкости против задирания, термической выносливости характеризуется наплавленный металл 15Х19Н9М4С5Г3Д. По термической выносливости при резких теплосменах и стойкости против задиров этот материал не уступает известным хромоникелевым сплавам с бором и кремнием и существенно превосходит металл 13Х16Н8М5С5Г4Б (наплавка электродами ЦН-12М и его аналогами). Хромистая сталь 22Х16Н2М по ряду эксплуатационных свойств и стоимости вполне приемлема для наплавки уплотнительных поверхностей деталей общепромышленной арматуры, которые эксплуатируются при температуре до 400 °С и давлении 16 МПа.

1. *Химическая* макронеоднородность металла, наплавленного различными электродными материалами / В. Б. Еремеев, Ю. В. Стреляный, В. А. Корбут, Л. В. Песня // Свойства и испытания наплавленного металла: Теоретические и технологические основы наплавки. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1979. — С. 36–42.
2. *Переплетчиков Е. Ф.* Плазменно-порошковая наплавка износо- и коррозионностойких сплавов в арматуростроении // Автомат. сварка. — 2004. — № 10. — С. 37–43.
3. *Степин В. С., Старченко Е. Г.* Применение дисперсионно-твердеющих Cr–Ni–Si-сталей для элементов затворов и наплавки уплотнительных поверхностей арматуры ТЭС и АЭС // Арматуростроение. — 2010. — № 3. — С. 66–69.
4. *Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А.* Плазменная наплавка. — Киев: Екотехнологія, 2007. — 292 с.
5. *ГОСТ 6023–2003.* (Взамен ГОСТ 6032–89). Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии. — Минск: Изд-во стандартов, 2003. — 23 с.
6. *Электрохимический* способ количественного определения склонности сталей к межкристаллитной коррозии / Л. Л. Медведева, В. М. Княжева, Я. М. Колотыркин, С. Г. Бабич // Защита металлов. — 1975. — **11**, № 6. — С. 699–705.
7. *Ратнер А. В.* Арматура для пара сверхкритических параметров. — М.-Л.: Энергия, 1965. — 256 с.
8. *Оценка* стойкости к теплосменам материалов уплотнительных поверхностей арматуры / Б. Я. Ивницкий, В. А. Галанов, В. В. Чернышова, Ю. Н. Сидоренко // Энергомашиностроение. — 1975. — № 7. — С. 27–29.
9. *Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рабинович В. И.* Плазменная наплавка в энергетическом арматуростроении. — М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1970. — 36 с.
10. *Благов Э. Е., Ивницкий Б. Я.* Дроссельно-регулирующая арматура в энергетике. — М.: Энергия, 1974. — 264 с.

The paper gives the results of investigation of the properties of iron-based alloys designed for plasma-powder surfacing of sealing surfaces of various-purpose reinforcement bars. It is shown that 15Kh19N9M4S5G3D deposited metal features the best combination of corrosion resistance, hot hardness, burr resistance, and thermal endurance.

Поступила в редакцию 10.05.2011

УДК 621.791.01:669

ДИСПЕРСНОСТЬ ЧАСТИЦ И ВАЛЕНТНОСТЬ МАРГАНЦА В СВАРОЧНОМ АЭРОЗОЛЕ

Академик НАН Украины **И. К. ПОХОДНЯ**, **В. И. КАРМАНОВ**, д-р техн. наук, **И. Р. ЯВДОЩИН**, канд. техн. наук, **И. П. ГУБЕНЯ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
О. Ю. ХИЖУН, д-р физ.-мат. наук, **И. В. ХОБТА**, инж.
(Ин-т проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины)

Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии определено валентное состояние соединений марганца в сварочном аэрозоле. Обнаружено ранее не выявленное валентное состояние соединений марганца (Mn^{4+}) при сварке электродами с покрытием основного вида. Проведен анализ дисперсности твердой составляющей сварочного аэрозоля с помощью метода лазерной гранулометрии.

Ключевые слова: дуговая сварка, покрытые электроды, твердая составляющая сварочного аэрозоля, дисперсность частиц, бимодальное распределение, агломераты, валентность марганца

При сварке углеродистых низколегированных сталей наиболее опасными компонентами твердой составляющей сварочного аэрозоля (ТССА) являются соединения марганца [1, 2]. Токсичность этих соединений в свою очередь зависит от валентности марганца и возрастает с увеличением его окисленности. Предельно допустимые концентрации (ПДК) марганца и его соединений в сварочном аэрозоле (СА) в воздухе рабочей зоны составляют 0,6/0,2 и 0,3/0,1 мг/м^3 (в числителе указана максимальная разовая, а в знаменателе — среднесменная ПДК) при его содержании в составе СА меньше 20 % и от 20 до 30 % соответственно [3]. Современные нормы ПДК марганца в СА и рекомендации не разделяют соединения марганца по валентности и устанавливают единую норму ПДК, равную 0,2 мг/м^3 [4, 5]. Марганец в СА относится ко второму классу опасности [3].

Ряд исследований, посвященных изучению химического состава ТССА [1, 6–9], показал, что наиболее вероятное состояние марганца Mn^{2+}, Mn^{3+}.

Сотрудниками Института электросварки им. Е. О. Патона и Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины проведены исследования валентного состояния марганца в аэрозолях, образующихся при сварке электродами с покрытиями рутилового и основного видов. Исследования выполняли с использованием рентгеновского фотоэлектронного спектрометра ES-2401.

Для исследований использовали ТССА, образующиеся при сварке опытными электродами с покрытием рутилового (индекс электрода Е4) и основного (индекс электродов ПШ4 и ПШ5) видов. При этом ТССА для анализа отбирали с помощью осаждения на фильтр, механического снятия с фильтра и помещения в латунную бюксу с последующим заполнением последней аргоном для предотвращения доокисления образцов при контакте с кислородом окружающей атмосферы. Спектры возбуждали немонохроматизированным излучением MgK_α-линий. ТССА втирали в поверхность медной пластины, которую предварительно шлифовали и протравливали азотной кислотой. Исследуемые образцы полностью покрывали медную пластину, так что на обзорных спектрах не наблюдались линии, которые соответствуют атомам меди. В обзорном режиме были сняты Mn2*p*- и Mn3*p*-спектры и для исследования выбрали оптимальный режим измерения Mn2*p*-спектров. По результатам анализа полученных Mn2*p*-спектров (рис. 1, *а*) установлено, что марганец в ТССА электродов с покрытием основного вида (ПШ4, ПШ5) присутствует в валентном состоянии +4 (пик *I*), а в ТССА электродов с покрытием рутилового вида (Е4) в валентном состоянии +3 (пик *II*).

Экспериментальные данные, полученные на опытных электродах, подтвердились при рентгеновских фотоэлектронных спектрометрических (РФЭС) исследованиях валентного состояния марганца в ТССА промышленных марок электродов УОНИ-13/55 и МР-3 (рис. 1, *б*). Приведенные данные свидетельствуют о наличии четырехвалентного марганца в ТССА, образующихся при сварке электродами с покрытием основного вида.

Важным фактором, который определяет токсичность ТССА, является дисперсность частиц СА. Частицы диаметром менее 20 мкм могут оставаться взвешенными в воздухе. 100 % частиц диаметром менее 1 мкм проникают в организм дыхательными путями [10]. Около 30 % частиц размером 0,1…1 мкм осаждаются в легких. Час-

© И. К. Походня, В. И. Карманов, И. Р. Явдощин, И. П. Губеня, О. Ю. Хижун, И. В. Хобта, 2011

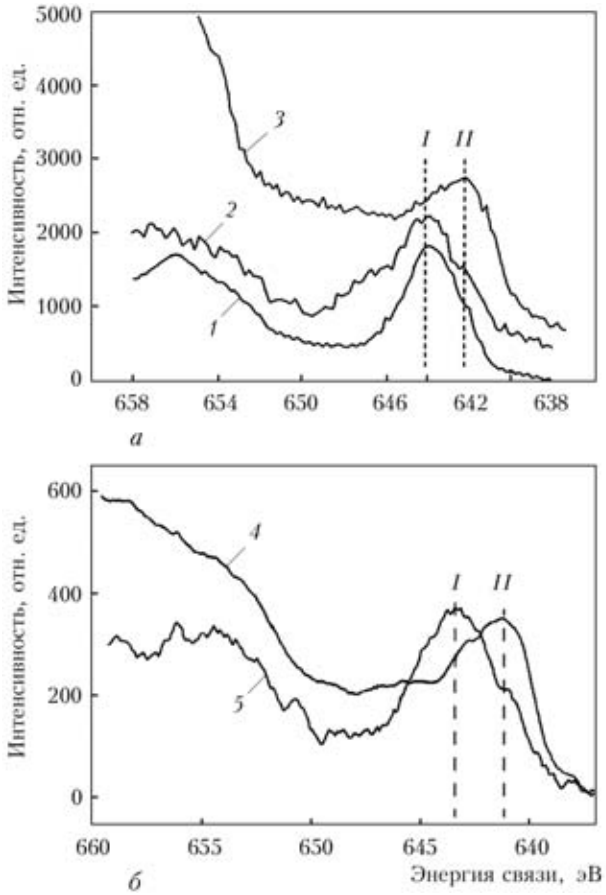


Рис. 1. Сравнение РФЭС спектров ТССА электродов с покрытиями основного ПШ4 (*1*), ПШ5 (*2*), рутилового Е4 (*3*) видов (*а*) и промышленных марок электродов (*б*) МР-3 (*4*) и УОНИ-13/55 (*5*) (обозначения *I*, *II* см. в тексте)

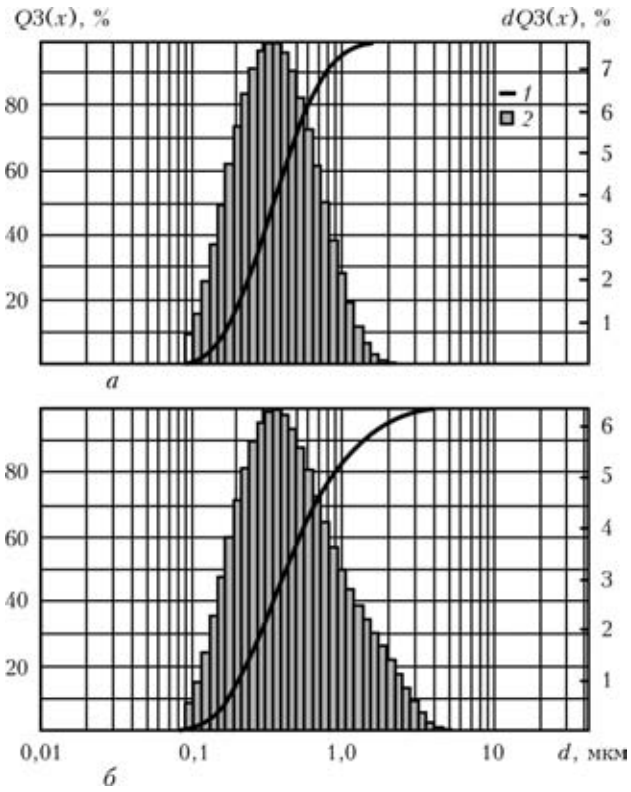


Рис. 2. Объемное распределение $Q3(x)$ (*1*) и плотность распределения $dQ3(x)$ (*2*) дисперсности ТССА электродов с покрытием основного УОНИ-13/55 (*а*) и рутилового МР-3 вида (*б*)

тицы размером менее 0,1 мкм (100 нм) также вдыхаются и осаждаются в легких. Возможно проникновение наноразмерных частиц через кожу [11], а также попадание в мозг через нервы в носовых пазухах [12, 13].

Большинство последних исследований проводили с использованием каскадных импакторов, работающих по методу аэродинамической сепарации [7, 9, 14–16].

В данной работе дисперсность ТССА оценивали методом лазерной гранулометрии анализатором Analysette 22 MicroTec plus компании «Fritsch» (диапазон измерений 0,08…42 мкм). Исследовали ТССА, полученные при сварке электродами с покрытием основного и рутилового видов. Извлеченный из фильтра СА хранили в стеклянной бюксе. При приготовлении к анализу образец смешивали лопаткой, после чего помещали в мензурку, куда добавляли дистиллированную воду с ПАВ (0,1%-й раствор пирофосфата натрия). Суспензию размешивали в течение трех минут в ультразвуковом диспергаторе Ultrasonic Bath LABORETTE 17. Перед анализом суспензии проверяли ее стабильность.

Каждый образец анализировали трижды. Результаты измерений и расчетов представлены на рис. 2. Объемное распределение частиц рассчитывали с использованием теории Фраунгофера. Результаты исследования дисперсности ТССА оказались следующими. У электродов УОНИ-13/55 объем частиц диаметром менее 10 мкм составляет 0,2 %; менее 50 мкм — 0,4 %; менее 90 мкм — 0,8 %. У электродов МР-3 менее 10 мкм составляет 0,2 %; менее 50 мкм — 0,4 %; менее 90 мкм — первые два измерения 1,4 %, третье — 1,3 %. Из приведенных данных видно, что средний диаметр частиц аэрозоля электродов как основного, так и рутилового вида находится в пределах 0,3…0,4 мкм (пик гистограмм плотности распределения $dQ3(x)$ на рис. 2). ТССА электродов МР-3 имеют также большее процентное соотношение более крупных частиц.

Представленные результаты дают общую картину дисперсности ТССА. Для более детального анализа нанодиапазона частиц, которые представляют особую опасность из-за повышенной способности проникновения в организм сварщика, проводили анализ в Институте проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины на приборе Zetasizer 1000HS (диапазон измерений 0,002…3 мкм).

Исследовали ТССА, полученные при сварке электродами с покрытием основного (УОНИ-13/55) и рутилового (МР-3) видов. Извлеченный из фильтра СА механически измельчали и высыпали в

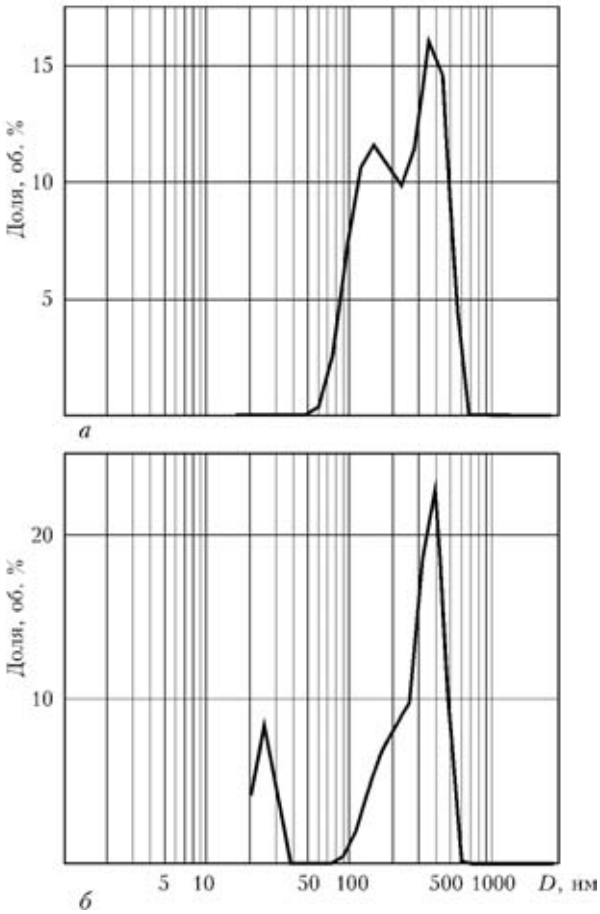


Рис. 3. Объемное распределение дисперсности ТССА электродов с покрытием рутилового МР-3 (*а*) и основного УОНИ-13/55 (*б*) вида

пластиковую посуду, заполненную дистиллированной водой с ПАВ (1%-й раствор гексаметафосфата натрия). Суспензию размешивали в течение 10 мин в ультразвуковом диспергаторе УЗДН-А. Несколько капель полученной суспензии добавляли в кюветку, заполненную на 2/3 дисперсионной средой. Кюветку помещали в прибор, где в ходе первичного анализа определяли степень насыщенности анализируемого раствора.

В ходе анализа каждого образца с помощью ПК проводили три подсчета, каждый из которых проводили на основании результатов десяти измерений с определением среднего значения. Результаты измерений и расчетов представлены на рис. 3 и в таблице. Среднее время анализа одного образца составляло 25 мин. Объемное распределение частиц рассчитывали с использованием теории Ми.

Полученные данные свидетельствуют о том, что ТССА обоих типов электродов имеют бимодальное распределение частиц по размерам. Средний диаметр частиц СА для электродов МР-3 и УОНИ-13/55 составляет соответственно 209,8 и 236,1 нм.

Частички СА электродов МР-3 формируют агло- мераты со средним размером 150±60 и 370±120 нм, первичные частицы обозначены не-

Результаты анализа дисперсности ТССА

Пик	Площадь, усл. ед.	Среднее, нм	Ширина, нм
Пиковые анализы по интенсивности			
I	100,0/99,9	236,2/259,9	243,4/220,6
Пиковые анализы по объему			
I	48,0/16,8	156,5/25,6	96,5/6,0
II	52,0/83,2	370,1/318,2	243,1/212,1
Пиковые анализы по количеству			
I	100,0/99,4	129,8/25,6	85,0/6,0

Примечание. В числителе приведены данные для электродов МР-3, в знаменателе — для УОНИ-13/55.

четко. Первичные частички СА электродов УОНИ-13/55 имеют узкое распределение; их средний размер около 25±6 нм.

Наблюдалась склонность к формированию агломератов размером 320±100 нм.

Выводы

1. В аэрозолях, образующихся при сварке электродами с покрытием основного вида, обнаружены соединения Mn^{+4}.

2. ТССА, образующиеся при сварке электродов с покрытием основного и рутилового видов, имеют бимодальное распределение по размерам.

3. Частицы СА обоих типов при охлаждении формируют агломераты.

1. *Voitkevich V.* Welding fumes: formation, properties and biological effects. — Cambridge: Abington publ., 1995. — 110 p.
2. *ISO 15011-4.* Health and safety in welding and allied processes — laboratory method for sampling fume and gases generated by arc welding. — Pt 4: Fume data sheets, 2006.
3. *ГН 2.2.5.1313-03.* Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. — Введ. 15.06.03.
4. *TLVs and BEIs.* Threshold limit values for chemical substances and biological exposure indices. — ACGIH, 2005. — 81 p.
5. *Recommendation* of occupational exposure limits (2009-2010). The Japan Society for Occupational Health // J. of Occupational Healt. — 2009. — **51**. — P. 454–470.
6. *Jenkins N. T., Eager T. W.* Chemical analysis of welding fume particle // Welding J. — 2005. — № 6. — P. 87–93.
7. *Characterization* procedure for the analysis of arc welding fume / J. W. Sowards, J. C. Lippold, D. W. Dickinson, A. J. Ramires // Welding J. — 2008. — **87**, № 4. — P. 76–83.
8. *Characterization* of welding fume generated by high-Mn consumables / M. J. Gonser, J. C. Lippold, D. W. Dickinson et al. // Ibid. — 2010. — **89**, № 2. — P. 25–33.
9. *Characterization* of welding fume from SMAW electrodes. — Pt II / J. W. Sowards, J. C. Lippold, D. W. Dickinson, A. J. Ramirez // Ibid. — 2010. — **89**, № 4. —P. 82–89.
10. *Sterjovski Z., Norrish J., Monaghan B. J.* The effect of voltage and metal-transfer mode on particulate-fume size during the GMAW of plain-carbon steel. — [2008]. — 12 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. VIII-2092–08).

11. *Hoet P. H. M., Bruske-Hohlfeld I., Salata O. V.* Nanoparticles — known and unknown health risks // J. of Nanobiotechnology. — 2004. — **12**, № 2.
12. *Raloff J.* Destination brain // Sci. News. — 2010. — **177**, № 11.
13. *Глушкова А. В., Радилов А. С., Рембовский В. Р.* Нанотехнологии и нанотоксикология — взгляд на проблему // Токсиколог. вест. — 2007. — № 6. — С. 4–8.
14. *Jenkins N. T., Pierce W. M. G., Eagar T. W.* Particle size distribution of gas metal and flux cored arc welding fumes // Welding J. — 2005. — № 84. — P. 156–163.
15. *Characterization* of welding fume from SMAW electrodes. — Pt I / J. W. Sowards, J. C. Lippold, D. W. Dickinson, A. J. Ramirez // Ibid. — 2008. — **87**, № 4. — P. 106–112.
16. *Physicochemical* characterization of different welding aerosols / B. Berlinger, N. Benker, S. Weinbruch et al. // Anal Bioanal Chemistry. — 2010. — № 10. — P. 1773–1789.

Method of *X*-Ray photoelectronic spectroscopy was used to establish the valent state of manganese compounds in the welding aerosol. Valent state of manganese compounds of Mn^{4+} was found in welding with coated basic electrodes. Analysis of dispersity of welding aerosol solid compound was performed using the method of laser granulometry.

Поступила в редакцию 31.05.2011

11-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА-КОНФЕРЕНЦИЯ

СВАРКА

29 ноября–1 декабря 2011 **Екатеринбург**

Выставочное общество «Уральские Выставки» приглашает принять участие в специализированной выставке конференции «Контроль и диагностика».

Одновременно пройдет 11-я Специализированная выставка «Сварка».

Цель выставки: способствовать развитию и внедрению в производстве новейших технологий и оборудования неразрушающего контроля и технической диагностики, продвижение наиболее высококачественной и конкурентоспособной продукции, расширение научно-технического сотрудничества и долгосрочных коммерческих связей.

Основные направления выставки:

- Оборудование и технологии для электродуговой сварки металлов
- Оборудование и технологии для наплавки и напыления
- Оборудование и технологии для плазменной, газоплазменной сварки и резки
- Оборудование и технологии для производства сварочных электродов и проволок
- Вспомогательное сварочное оборудование
- Сварка в стройиндустрии
- Спецодежда, средства индивидуальной защиты
- Материалы для сварки, наплавки, напыления, резки
- Средства и методы защиты от вредных производственных факторов в сварочном производстве
- Инструменты для сварки и механической обработки
- Промышленная вентиляция
- Методы обучения и повышения квалификации персонала.

Параллельно с выставкой **«СВАРКА»** будет работать 6-я Международная специализированная выставка-конференция **«КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА»**.

Контакты: Россия, 620027, Екатеринбург, ул. Свердлова, 11А, оф. 507.
Тел./факс: +7(343) 310-03-30

УДК 621.791:621.3.06

СВАРНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ РАЗНОРОДНЫХ ПРОВОДНИКОВ

Академик **Б. Е. ПАТОН**, чл.-кор. НАН Украины **В. И. ЛАКОМСКИЙ**
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
В. И. БРАГИНЕЦ, канд. техн. наук (ЗНИЦ ПТ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Запорожье)

Обоснована высокая энергоэффективность использования разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона сварных электрических контактов металлов с различными углеродными материалами и сварных электроконтактов катодных блоков и обожженных анодов. Разработаны конструкции электроконтактных пробок (ЭКП), а также дуготроны — специальные бессопловые горелки, работающие на оксидном катоде. Даны примеры эффективного применения контактных узлов с ЭКП в печах синтеза и Ачесона.

Ключевые слова: энергозатраты, потери электроэнергии, электрический контакт, переходное электросопротивление, оксидный катод, дуготрон, смачивание, сварка «металл – углеродный материал», электроконтактная пробка, сварная контактная сборка, электролизер, печь Ачесона

Как свидетельствует мировой рынок электроэнергии, стоимость последней непрерывно возрастает и, видимо, такая тенденция сохранится еще надолго, если не навсегда. В связи с этим первостепенной задачей заводских ИТР должен быть поиск новых путей минимизации расхода электроэнергии в технологических процессах и непрерывная борьба с потерями электроэнергии. Насколько эффективно решается эта задача на производстве?

На примере производства алюминия покажем, как расточительно расходуется электроэнергия в этой подотрасли цветной металлургии.

Передача электроэнергии от электростанции к алюминиевому заводу зависит от расстояния и доходит до 13 % потерь, поэтому энергетики затрачивают много усилий для энергосбережения, повышая, например, напряжение в ЛЭП. Когда же электроэнергия доставлена на завод, отношение к ней меняется. Одному из авторов доводилось видеть на одном из уральских промышленных предприятий как сварку магистральных алюминиевых шин в цехе производства магния выполняли открытой угольной дугой большой мощности, без какой-либо газовой или шлаковой защиты. Так работали только во времена Н. Н. Бенардоса, когда начиналась дуговая сварка в России и то сваривали сталь, а не алюминий. Этот технологический прием даже трудно назвать сваркой. Можно лишь представить себе, сколько оксидных пленок при этом запутывалось в сварном шве и сколько электроэнергии потом терялось на этом соединении.

В последнее время при проектировании новых алюминиевых заводов принято рассматривать комплекс «алюминиевый завод – электростанция» как единое целое и предпринимать все необходимые меры для энергосбережения.

Из статистических данных, полученных еще в советское время, известно, что из всех потребителей электроэнергии в народном хозяйстве Советского Союза наиболее энергоемким была алюминиевая промышленность. Для того чтобы представить себе насколько много электроэнергии требуется в современном производстве алюминия, приведем такой пример. На производство 36 млн т алюминия (достигнутое недавно ежегодное производство металла во всем мире) требуется столько электроэнергии, сколько может выработать за два с половиной года такой гигант, как Красноярская ГЭС.

Столь огромное потребление энергии при производстве алюминия методом высокотемпературного электролиза объясняется прежде всего весьма прочной химической связью между алюминием и кислородом в глиноземе Al_2O_3 — сырье для производства этого металла. На преодоление химической связи между элементами в этом соединении с целью высвобождения алюминия по различным данным требуется затратить около 7 тыс. кВт·ч, в расчете на каждую тонну получаемого металла. В то же время в промышленности в целом удельный расход электроэнергии в среднем составляет 14 тыс. кВт·ч. Остальные 7 тыс. кВт·ч — это потери.

Полезно используется лишь половина всей электроэнергии, подводимой к алюминиевому электролизеру. Не слишком ли расточительно?

Серьезный и добросовестный ученый, стоявший у истоков металлургии алюминия СССР, Ю. В. Баймаков еще в довоенные годы тщательно проанализировал энергозатраты при производстве легких металлов, а в блокадные ленинградские годы написал небольшую, но весьма ценную кни-

© Б. Е. Патон, В. И. Лакомский, В. И. Брагинец, 2011

гу [1]. Он показал, что в конструкции алюминиевого электролизера наиболее расточительными являются прижимные электроконтакты между стальными токоподводами и электродами из графитированного углеродного материала при их исполнении с помощью чугунной заливки. Только на этих контактах теряется до 30 % всех потерь, наблюдаемых в многочисленных электроконтактах электролизера. Вот он, Молох, пожирающий так тяжело достающуюся человечеству электроэнергию. Последователи Ю. В. Баймакова пренебрегли его рекомендациями и даже придумали название этим паразитным контактным сопротивлениям — «греющие сопротивления». Тем самым они реабилитировали эти потери, свыклись с ними, поэтому даже в электролизерах XXI в. ныне сохраняются те же конструкции контактов, что использовались более ста лет назад в первых промышленных агрегатах.

Как известно всем алюминщикам, электрические контакты в подине электролизера изготавливаются путем заливки жидким чугуном технологической щели, образующейся между стальным токоподводом и пазом, в углеродном подовом блоке. Жидкий чугун хорошо смачивает твердую сталь, поэтому создается хороший электрический контакт. В то же время жидкий чугун совершенно не смачивает углеродный материал подового блока, поэтому перенос электрических зарядов через эту поверхность раздела осуществляется с большими энергопотерями, а сама поверхность раздела доступна для проникновения на нее различных легкоплавких материалов. В процессе работы электролизера на эту поверхность через катодный блок и особенно по швам между блоками просачиваются отдельные элементы электролитной ванны. Со временем эта граница раздела теряет значительную долю и без того малой электропроводности. Вот еще один «виновник» огромных потерь электроэнергии. Здесь мы имеем пример того, как ради простоты технологии сборки катодных блоков, затем в процессе четырех-пятилетней эксплуатации электролизера допускаются большие потери электроэнергии.

Далее, как показывает анализ, большинство электроконтактов в электрометаллургических установках работает при повышенных температурах до 250…300°С, а также 850…900°С (подовые блоки). И, несмотря на столь тяжелые условия работы электрических многоамперных контактов, их исполняют прижимными, что порождает огромные потери электроэнергии вследствие высокого переходного электросопротивления и, что особенно важно отметить, увеличивающегося во время работы агрегата. Для иллюстрации количества потерь электроэнергии на многоамперных контактах можно показать, что каждый микроом сопротивления в современном электролизере на 175 кА приводит к ежегодной потере $1\cdot10^{-6}(175)^2\cdot10^6\cdot24\cdot365 = 268$ тыс. кВт·ч. И это только на одном контакте!

В алюминиевой промышленности находятся в эксплуатации еще много электролизеров с самоспекающимися анодами (аноды Содерберга), к которым электроэнергия подводится от магистрального шинопровода цеха с помощью алюминиево-медно-стальных спусков. Использование в них прижимных контактов вынуждает рабочих довольно часто зачищать вручную контактные поверхности в некомфортных условиях труда (температура до 150…200°С). Посылать рабочих выполнять эти работы на высоте и при таких температурах, это, на наш взгляд, бесчеловечно. Видимо ИТР алюминиевых заводов забыли, что изначально в истории развития техники обязанностью инженеров было облегчение труда рабочих, механизация их труда, создание таких конструкций, которые бы избавляли рабочих от труда в тяжелых условиях.

Эти два примера мы привели для того, чтобы показать, что алюминщики используют в своих электролизерах архаичные конструкции мощных контактных узлов, несмотря на то, что, вот уже более 20 лет существуют прогрессивные сварочные технологии.

Благодаря изобретению оксидных катодов сварочных дуг [2, 3] Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины разработал еще в 1980-х годах и всесторонне проверил в промышленных условиях способ изготовления сварных электрических контактов металлов с различными углеродными материалами [4].

В Институте электросварки им. Е. О. Патона разработаны технологии монтажа с помощью сварных электроконтактов катодных блоков и обожженных анодов. Что касается подвесного контакта «алюминий–медь», то в институте на основе нового способа сварки спроектирован энергосберегающий контакт, не требующий зачистки контактных поверхностей в течение всего ресурса электролизера. Этот контакт получил название «серьга ИЭС», поскольку находится в подвешенном состоянии.

Когда-то в алюминиевых цехах все электрические контакты были прижимными, но после Великой Отечественной войны Минцветмет СССР своим приказом обязал заводы заменить их сварными электроконтактами. Тогда не были известны способы сварки разнородных материалов, а переход на сварные контакты только в металлических проводниках позволил сэкономить 7 % электроэнергии, потребляемой заводами Союзалюминпрома. В целом по стране это составило ощутимый экономический эффект.

В настоящее время широко известны разработки Института электросварки им. Е. О. Патона в области сварки разнородных электропроводных

материалов, но алюминиевые заводы почему-то обходят их. Они, теряя огромное количество электроэнергии, включают эти потери в себестоимость металла и не хотят переходить на новые методы монтажа электрических контактов. Поэтому половину себестоимости алюминия составляет электроэнергия. Нет министерства, которое могло бы заставить заводы освоить новую сварочную технологию! Очевидно, здесь требуется решение правительства, поскольку потери электроэнергии достигают, например, в России при производстве 5…6 млн т алюминия в год, величин государственных масштабов. На наш взгляд, правительству не стоит соглашаться с просьбами алюминщиков снизить тарифы на электроэнергию, отпускаемую государственными электростанциями. У них есть свои внутренние резервы, которые позволяют снизить удельный расход электроэнергии и, тем самым, снизить себестоимость металла, что повысит конкурентоспособность российского алюминия на внешнем рынке.

Справедливости ради следует признать, что выполнение монтажных работ на катодных блоках и на обожженных анодах, конечно, более трудоемкий процесс, нежели заливка блоков жидким чугуном, но, перейдя на новую технологию, завод сэкономит электроэнергию, стоимость которой перекроет с лихвой затраты на оплату труда более квалифицированных рабочих-сварщиков, нежели заливщиков жидкого чугуна. Не следует забывать, что, выплачивая больше рабочим за их труд, завод вносит вклад в решение одной из социальных задач. Кроме того, завод избавляется от вагранок, источника вредных газов, пыли и шлака, несвойственных алюминиевому производству, улучшая тем самым экологическую обстановку на заводе.

Вернемся теперь к контактам. Из теории контактов твердых тел [5] известно, что, как бы тщательно ни подготавливали поверхность металлических контактов, она тем не менее остается шероховатой и реальный контакт двух контактных губок осуществляется не по всей видимой площади, а только по микровыступам на этой поверхности. На медно-алюминиевых контактах реальная площадь, например, составляет всего лишь 5 % видимой площади. В связи с этим контактирующие поверхности с силой прижимают друг к другу, стараясь деформировать микровыступы и тем самым увеличить реальную площадь прижимного контакта. Однако более чем до 30 % увеличить площадь реального указанного контакта физически невозможно.

Данное явление объясняется гиперболической зависимостью контактного электросопротивления от силы прижатия друг к другу контактной пары. Начальные усилия прижатия весьма эффективны и, наоборот, последующие усилия очень слабо действуют на сопротивление контакта.

Такой же характер зависимости между контактным электрическим сопротивлением и, как это на первый взгляд ни странно, силой тока наблюдается при нормальной (комнатной) температуре у контакта «углеродный материал – чугун»: чем выше сила тока, проходящего через контакт, тем ниже его сопротивление. Это явление (явление фитинга) объясняется электрическим пробоем узкого воздушного промежутка между контактирующими материалами. При этом в области больших токов образуются, образно говоря, дополнительные микромостики из чугуна и по ним устремляется ток. Необходимо отметить, что это явление наблюдается только при нормальной температуре. Если же температуру повысить и поверхность чугуна при этом окислится, то явление фитинга, к сожалению, не наблюдается.

В противоположность этому в сварных контактах реальная контактная поверхность равна видимой поверхности. В этом состоит главное преимущество сварных металлических электроконтактов. Естественно, что при этом контактное электросопротивление сварных контактов намного ниже прижимных и главное не возрастает во время работы контакта.

Сварные электрические контакты металлов с углеродными материалами в этом отношении стоят на особом месте. Дело в том, что все твердые углеродные материалы пористые. Общая пористость их колеблется от 20 до 30 %. Есть специальные графитированные материалы с пористостью 50 %.

Указанные материалы имеют поры двух типов: закрытые, обособленные и канальные, транспортные поры. Важно отметить, что последние составляют 3/4 общего объема пор.

При сварке металлов с углеродными материалами используется эта их особенность. Жидкая медь или алюминий в обычных условиях не смачивают углеродные материалы. Если же добавить в них сильные карбидообразующие элементы, лучшими из которых в данном случае являются кремний и марганец, то угол смачивания углеродных материалов падает до 5…15° и тогда жидкий перегретый сплав проникает вглубь графитированных материалов по их транспортным порам на 10…15 мм. В этом случае площадь реального контакта в десятки, а то и сотни раз превышает видимую площадь. В практике электрических контактов — это беспрецедентный случай, и человек обязан использовать этот подарок природы. Жидкое железо смачивает углеродные материалы, но в электроконтактные сплавы на железной основе, тем не менее, тоже добавляют некоторые карбидообразующие химические элементы.

Конструктивным элементом различных сварных контактных сборок является так называемая электроконтактная пробка (ЭКП). Три варианта конструкции этой пробки показаны на рис. 1. ЭКП

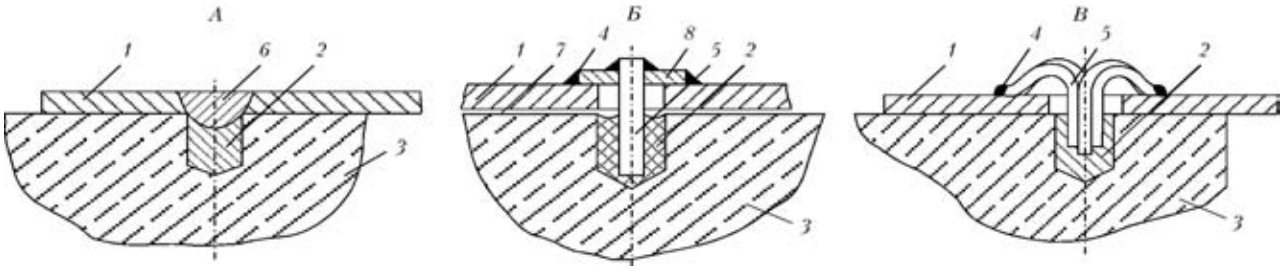


Рис. 1. Схемы сварных соединений «металл – углеродный материал» разных вариантов (*А–В*): *1* — металлическая пластина; *2* — ЭКП; *3* — углеродный блок; *4* — сварной шов; *5* — компенсатор; *6* — электрозаклепка; *7* — зазор между пластиной и углеродным блоком; *8* — шайба

представляет собой пробку диаметром 30 мм и глубиной не более 40 мм, вваренную в массив углеродного блока, будь это катодный блок электролизера или его обожженный анод. ЭКП является общим элементом для всех трех вариантов электроконтактных сборок. Они различаются способом электрического соединения с плоским металлическим токоподводом. Вариант *А* рекомендуется применять в контактных сборках, если расстояния между крайними пробками не превышают 200 мм, вариант *Б* — при расстояниях в зависимости от диаметра штыря-компенсатора до 500 мм. И, наконец, вариант *В* можно использовать без ограничения межпробковых расстояний. На рисунке показано, что компенсатор, будь это единичный пруток или пучок тонких прутков, приварен к токоподводу ручной или полуавтоматической электросваркой.

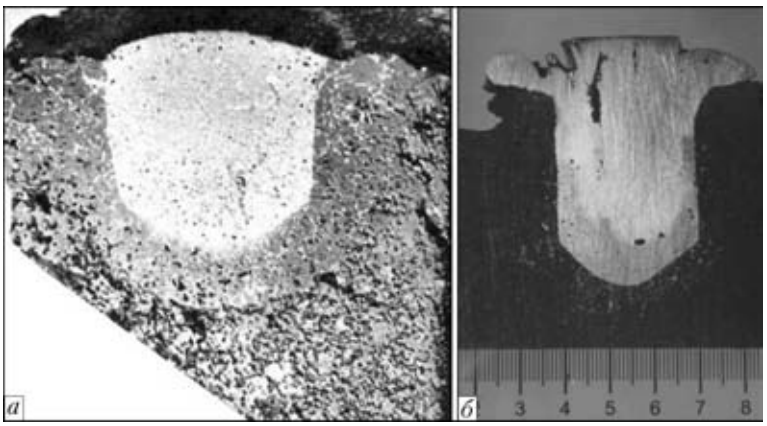


Рис. 2. Макрошлифы ЭКП, вваренных в углеродный материал: *а*, *б* — соответственно сплав на железной и алюминиевой основе

Основа электроконтактного сплава пробки и материал компенсаторов обязательно должна быть такой же, как и металл токоподвода. Назначение компенсаторов сводится к тому, чтобы сгладить огромную разницу в значениях термического коэффициента линейного расширения (КТЛР) углеродного материала ($4 \cdot 10^{-6}$ $К^{-1}$) и, например, алюминия ($28 \cdot 10^{-6}$ $К^{-1}$). Если отказаться от компенсаторов, то при изменении температуры сварное соединение под действием термических напряжений может разрушиться. Контактное сопротивление ЭКП в зависимости от материала сплава, измеренное при комнатной температуре, колеблется от 50…70 (для медного электроконтактного сплава) до 100…120 мкОм (для железного сплава). Предельное значение токовой нагрузки ЭКП колеблется от 400 (для железного сплава) до 750 А (для алюминиевого и медного сплавов).

Создание ЭКП нам далось нелегко: габариты пробки определяются сопоставлением сил адгезии сплава к углеродному материалу с силами, которые вызываются литейной усадкой жидкого сплава ЭКП при его затвердевании и термической усадкой металла при его дальнейшем охлаждении.

Специфическим и очень ценным свойством пробки является постоянство значения контактного сопротивления в процессе многолетней работы пробки. Добавим, что при нагреве ЭКП ее сопротивление снижается на 20…30 %.

С металлургической точки зрения удивительно, что после сварки на открытом воздухе содержание кислорода, например, в металле сплава на железной основе не превышает 0,005 %. Такое же содержание кислорода обнаруживается в обычном сером чугуне. Объяснение этому феномену находим в низком локальном парциальном давлении кислорода в газовой атмосфере в углублении углеродного материала в процессе вваривания пробки, в кратковременном исполнении пробки и в наличии в металле электроконтактного сплава среди присадок сильных раскислителей.

Нормальная макроструктура ЭКП представлена на рис. 2 их продольными сечениями. На рис. 2, *а* просматривается плотная хорошо сформированная граница раздела «пробка–углеродный материал» и мелкая рассредоточенная усадочная пористость в объеме пробки. На рис. 2, *б* видно, что прилежащие к пробке слои углеродного материала глубоко пропитаны электроконтактным сплавом.

Технология вваривания пробки контролируется как контактным электросопротивлением, так и механической силой вырыва пробки из углеродного массива. Усилие вырыва в зависимости

Рис. 3. Внешний вид пробок после испытания на вырыв: верхняя — выполнена с соблюдением технологии; нижняя — с нарушением

от сплава пробки составляет от 600 до 1000 кг. На рис. 3 показаны две вырванные пробки. Конусная форма вырванной пробки свидетельствует о соблюдении технологии сварки. В этом случае сплав по транспортным капиллярным каналам проник глубоко в металл. Такую пробку можно вырвать, приложив усилие до 1000 кг, ее контактное сопротивление минимальное. Другая пробка по форме цилиндрическая, с «лысой» по выражению рабочих поверхностью, вырвана при минимальных усилиях ниже 600 кг, имеет повышенное значение контактного сопротивления. Эта пробка выполнена с нарушением технологии.

Техника и технология вваривания пробок в массив углеродного материала является нашим «know-how» и передается заказчику при покупке лицензии. Выполняется ЭКП с помощью дуготрона — специальной плазменной бессопловой горелки, работающей на оксидном катоде.

Оксидные катоды (рис. 4) — изобретение Института электросварки им. Е. О. Патона. Они относятся к разряду нерасходуемых электродов электрической дуги, как вольфрамовые или угольные. Но в отличие от них оксидные катоды могут работать во всех кислородсодержащих газах, вплоть до чистого кислорода. Ресурс их работы такой же, как и у вольфрамового электрода в среде аргона — $2…4·10^{-8}$ г/К. Катодное пятно на жидком оксидном сплаве при больших токах дуги достигает в диаметре 2 мм, а плотность тока на нем 300 А/мм^2. Рекомендуется, чтобы сварочный ток на дуге не превышал 750…800 А. Диаметр анодного пятна на углеродном материале достигает 20 мм. Указанные параметры для сварочных дуг уникальны.

Электрическая дуга оксидного катода отличается от свободно горящей дуги на порядок меньшим градиентом напряжения в столбе дуги и высокой самостабилизацией, бесшумностью, а также плоским максимумом температуры в поперечном сечении столба дуги и анодного пятна.

Для использования оксидного катода в сварочных работах создан ряд горелок на различные токи, начиная с 50 А, получивших торговое название «дуготрон». С конструкторской точки зрения — это бессопловый плазмотрон с тепловым КПД 95 %. Работы по вваривaнию ЭКП в углеродные блоки выполняют с помощью дуготрона Д-4А (рис. 5).

Многочисленные опыты, проведенные в лабораторных и промышленных масштабах, показали, что применение ЭКП при монтаже катодных блоков электролизеров позволяет получать на каждой тонне алюминия дополнительно 50…200 кг металла при том же расходе электроэнергии. Достигается это за счет не только снижения потерь электроэнергии в контактах при передаче ее от стальных токоподводов к катодным углеродным блокам, но и практически полного исключения такого явления как вторичное окисление алюминия в ванне. Дело в том, что при боковом подводе электроэнергии к подине наблюдается достаточно неоднородная плотность тока на рабочей плоскости подовых блоков. В месте подвода тока она в 16 раз больше, чем в удаленных участках блока. Это, естественно, вызывает образование паразитных горизонтальных токов в металлической ванне. Взаимодействие этих токов с магнитным полем электролизера вызывает образование макротоков металла и электролита. Взвешенные в электролите мельчайшие капельки алюминия выносятся на поверхность раздела с воздухом и окисляются. Это и есть вторичное окисление металла.

Если же подвод энергии к блоку выполняется с помощью ЭКП, то достигается превосходная однородность тока. Плотность тока по всей рабочей поверхности блока 550×1800 мм колеблется в пределах 3 %. Разумеется, при этом паразитные горизонтальные токи сводятся к ничтожно малым

Рис. 4. Оксидные катоды сварочной дуги для различных технологий

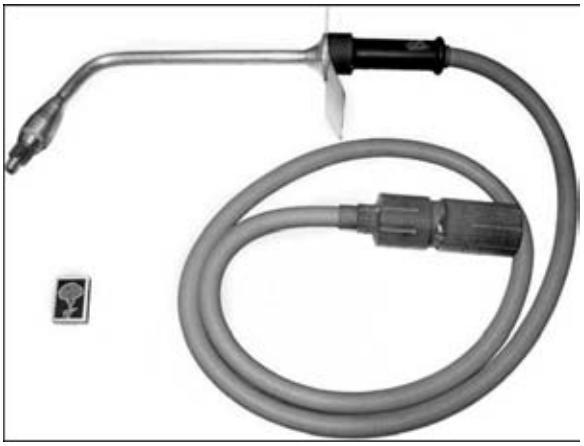


Рис. 5. Специализированный дуготрон Д-4А

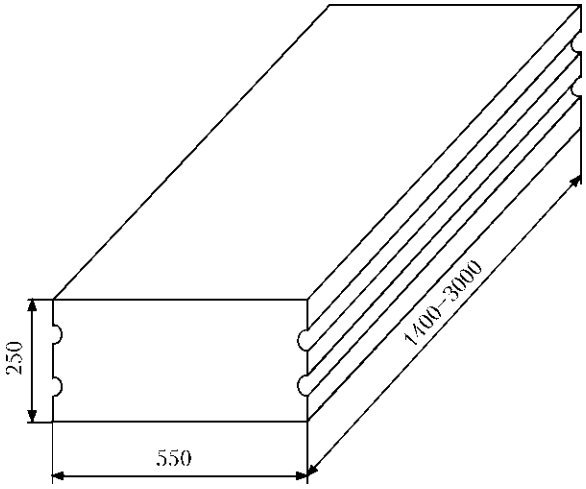


Рис. 6. Схема типичного подового блока новой конструкции

Рис. 7. Фрагменты двух контактных сборок для подины алюминиевого электролизера

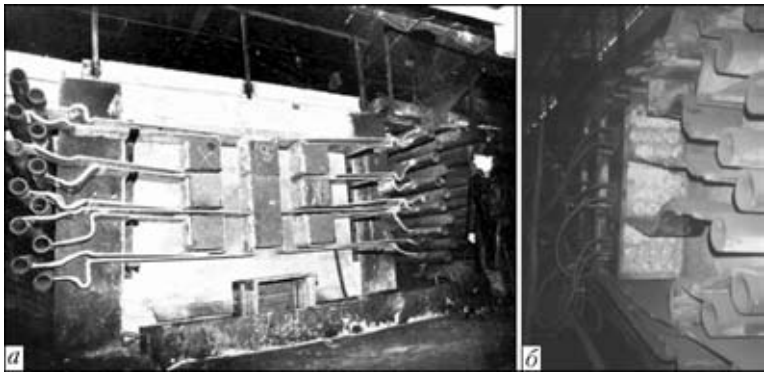


Рис. 8. Задние торцы печей графитации, выполненных с применением ЭКП с неорганизованным (*а*) и принудительным (*б*) охлаждением

Рис. 9. Контактная сборка печи синтеза карбида кремния, выполненная с применением ЭКП

значениям, а вторичное окисление металла практически исключается.

Следует добавить, что взаимодействие горизонтальных паразитных токов с основным магнитным полем электролизера вызывает образование стоячей волны жидкого металла ванны. Последнее заставляет технологов увеличивать толщину слоя электролита, что ведет к перерасходу энергии на ведение процесса электролиза.

Кроме того, замена прижимных электрических контактов катодных блоков на ЭКП позволяет экономить 1/3 катодного углеродного материала, ибо в данном случае вместо архаической формы блоков используется простой параллелепипед (рис. 6).

Экономится также стальной прокат на токоподводы (до 20 %) за счет одинаковой плотности тока в токоподводах длинных и коротких катодных блоков, а также в результате исключения натриевого барьера, поскольку его функцию в этом случае исполняют плоские токоподводы к катодным блокам.

Электродные заводы в свою очередь должны снизить цену на катодные блоки, так как их производство упрощается — блоки не нужно экструдировать на чрезвычайно дорогих мощных прессах.

Приведем несколько примеров использования ЭКП в алюминиевых (рис. 7) и магниевых электролизерах, в печах Ачесона для графитации углеродных материалов (рис. 8) и синтеза карбида кремния (рис. 9).

На рис. 8 показан задний торец печи Ачесона на 100 кА, в котором все электрические контакты между металлическими токоподводами и графитированными электродами выполнены сварными, а медная ошиновка заменена алюминиевой.

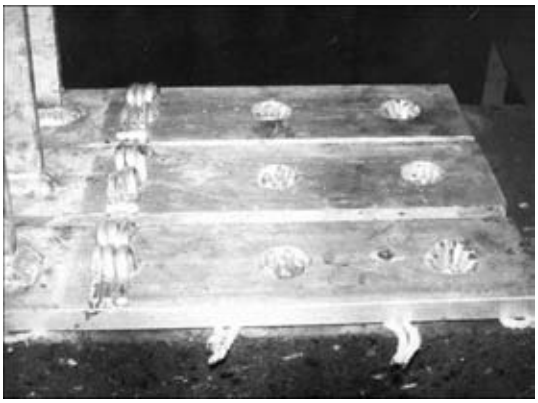


Рис. 10. Элемент контактного узла печи Ачесона, подготовленный к монтажной сварке

Контактная сборка с воздушным охлаждением печи Ачесона на 20 кА для синтеза карбида кремния, выполненная также из алюминия, показана на рис. 9. Один из элементов контактного узла этой печи, подготовленный к ручной монтажной сварке, показан на рис. 10.

Оба примера, относящиеся к печам Ачесона, характерны тем, что обходятся заводу дешевле прижимных контактов с медной ошиновкой по затратам на материалы и обслуживание контактов.

Таким образом, применение описанных в работе решений, найденных специалистами Института электросварки им. Е. О. Патона, позволит заводам цветной металлургии, электродной и инструментальной промышленности сэкономить электроэнергию и улучшить условия труда рабочих.

1. *Баймаков Ю. В.* Электролиз в металлургии: Т. 3. Расход электроэнергии в производстве легких металлов. — М.: Металлургиздат, 1944. — 110 с.
2. *Лакомский В. И.* Оксидные катоды сварочной дуги. — Запорожье: Интернал, 1997. — 192 с.
3. *Lakomsky V. J.* Oxide cathodes for electric arc. — Harwood: Academic publ., 2000. — 121 p.
4. *Лакомский В. И., Фридман М. А.* Плазменно-дуговая сварка углеродных материалов с металлами. — Киев: Екотехнологія, 2004. — 196 с.
5. *Хольм Р.* Электрические контакты. — М.: Изд-во иностр. лит., 1961. — 464 с.

High energy effectiveness of application of welded electric contacts of metals with different carbon materials and welded electric contacts of cathode units and annealed anodes developed at PWI is substantiated. Designs of electric contact plugs (ECP), as well as arcotrons and special nozzle-free torches using an oxide cathode, were developed. Examples of effective application of contact assemblies with ECP in synthesis and Acheson furnaces are given.

Поступила редакцию 19.05.2011

УДК 621.791.72

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА КОРПУСОВ БУРОВЫХ ДОЛОТ С МОДИФИЦИРОВАНИЕМ МЕТАЛЛА ШВА ЦИРКОНИЕМ

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, **А. А. БОНДАРЕВ**, доктора техн. наук, **Ю. А. АРХАНГЕЛЬСКИЙ**, инж., **В. И. ЗАГОРНИКОВ**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние модифицирования металла шва при электронно-лучевой сварке новых конструкций бурильных долот. Показано, что использование вставок-модификаторов из циркония позволяет предотвратить образование трещин в сварных соединениях сталей 40ХН и 14Х3МНА.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, буровое долото, цирконий, модифицирование шва, трещины, микроструктура, твердость

Общепризнано, что единственным действенным средством поисков и разведки месторождений нефти и газа служит глубокое бурение. Принципиальное отличие глубокого бурения на нефть и газ от других видов бурения в первую очередь заключается в глубине скважин. Совершенствование техники и технологии глубокого бурения, существенное повышение производительности буровых долот и снижение их себестоимости — это те задачи, которые стоят перед многими ведущими фирмами-производителями бурового оборудования. В сложной конструкции буровой системы долота являются той составляющей, от которой во многом зависит производительность всего процесса бурения. В связи с этим большое внимание уделяется как совершенствованию известных конструкций долот, так и разработке новых. Результатом такой работы является повышение средней проходки на одно современное

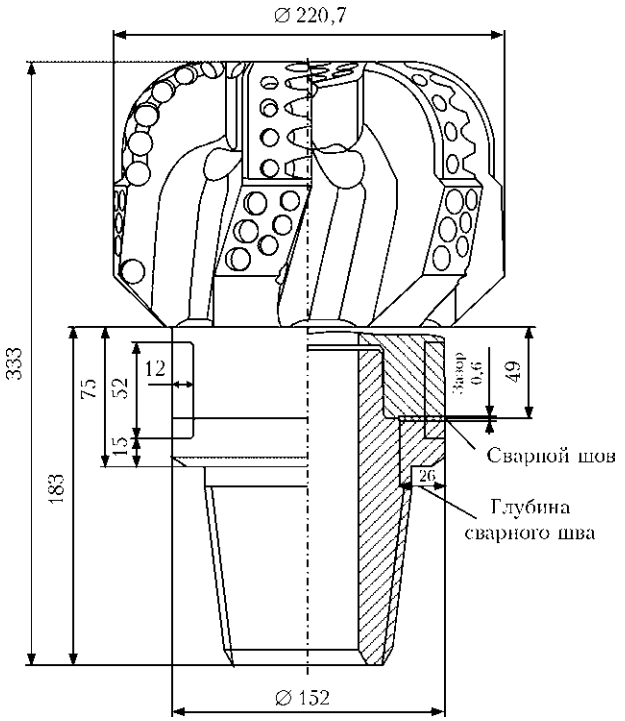


Рис. 1. Схема общего вида долота, изготавливаемого из сталей 40ХН и 14Х3МНА

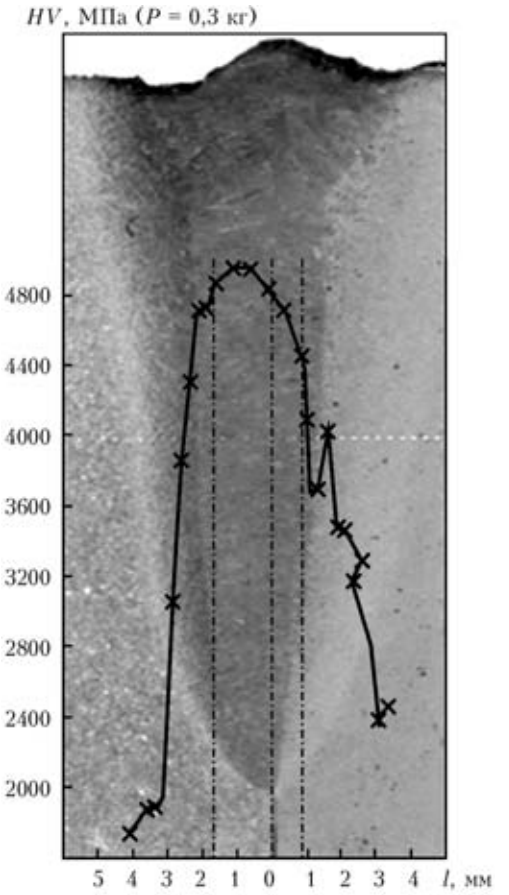


Рис. 2. Поперечное сечение и распределение микротвердости в сварном соединении сталей 40ХН и 14Х3МНА

© В. М. Нестеренков, А. А. Бондарев, Ю. А. Архангельский, В. И. Загорников, 2011

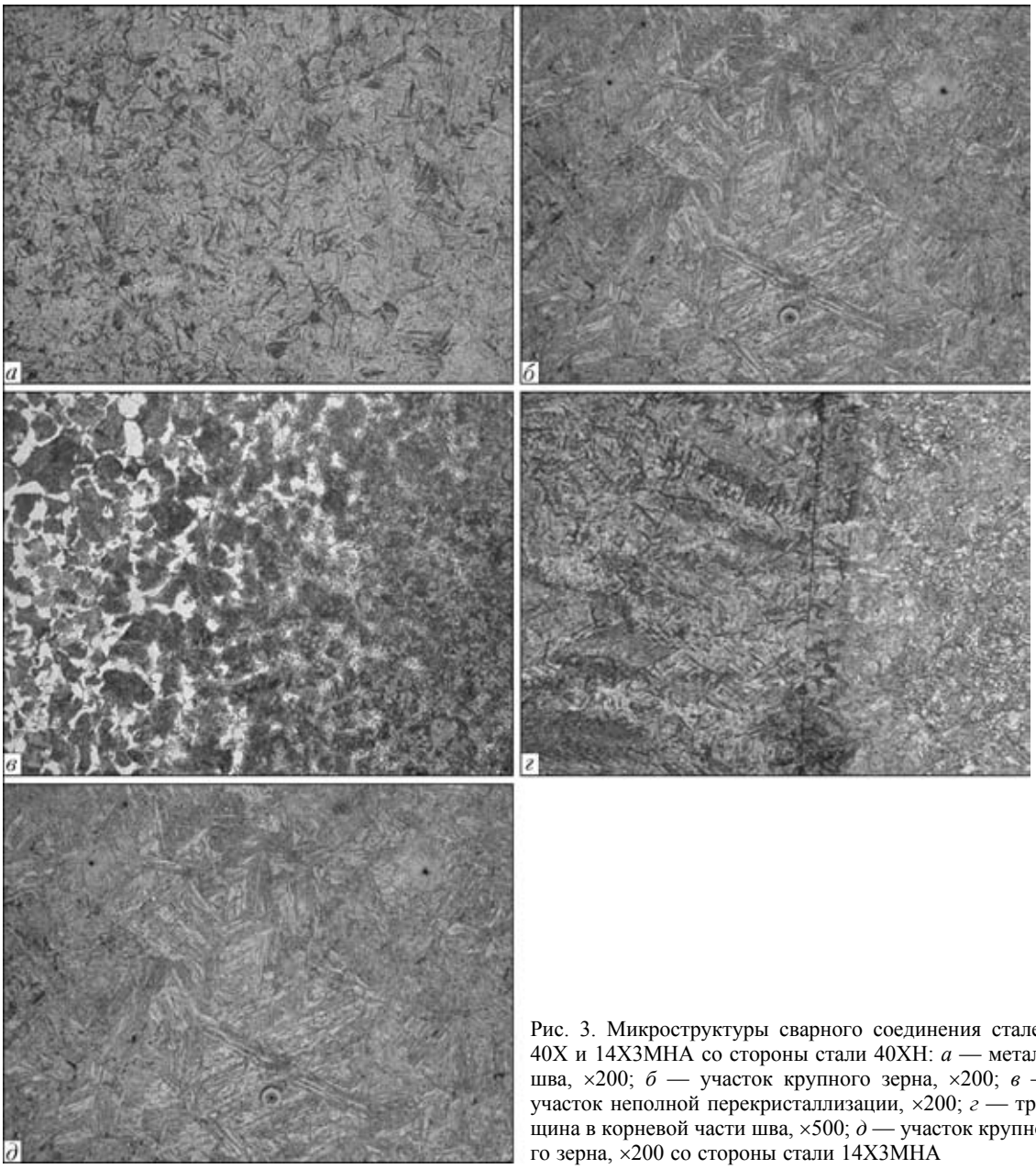


Рис. 3. Микроструктуры сварного соединения сталей 40Х и 14Х3МНА со стороны стали 40ХН: *а* — металл шва, ×200; *б* — участок крупного зерна, ×200; *в* — участок неполной перекристаллизации, ×200; *г* — трещина в корневой части шва, ×500; *д* — участок крупного зерна, ×200 со стороны стали 14Х3МНА

долото на 122 % по сравнению с аналогичным показателем долот конструкции 1984 г.

В связи с тем, что буровые долота эксплуатируются в очень тяжелых условиях, подбор сталей для их изготовления должен быть строго дифференцирован для каждого отдельного элемента долота — от тел качения и материалов подшипников скольжения до корпусов лап и шарошек.

Сталь, используемая для изготовления лапы долота, должна обеспечивать высокую прочность и вязкость в сочетании с хорошей износостойкостью. За рубежом большинство ведущих фирм-изготовителей шарошечных долот для изготовления лап использует сталь AISI 4815H (отечественный аналог — сталь 15Х3МА) или AISI 9315H (отечественный аналог — сталь 19ХГНМА).

Вместе с тем для новых конструкций буровых долот изготовление их корпусной части планируется из стали 40ХН (рис. 1), а соединение со сталью 14Х3МНА ниппельной части должно быть выполнено кольцевым сварным швом. Выбор стали 40ХН обусловлен требованием повышения конструкционной прочности долота для увеличения скорости бурения. Из практики дуговой сварки сталей с повышенным содержанием углерода хорошо известна склонность их сварных соединений к трещинообразованию. Стали типа 40ХН обладают склонностью к обратимой отпускной хрупкости [1]. Предупреждение трещин при дуговой сварке этих сталей достигается предварительной и последующей термообработками, позволяющими повысить пластичность сварных соединений. С этой же целью более перспективны способы сварки стали 40ХН с высокой концентрацией энергии, что обеспечивает меньшее разупрочнение швов.

Известно, что частота вращения долот является ключевым фактором достижения высоких скоростей бурения. На современном рынке появились долота, надежно работающие при частоте вращения до 500 об/мин и более. Производство таких долот должно обеспечивать минимальные конструктивные отклонения геометрии готовой продукции от чертежа. При применении дуговой сварки для соединения составных частей долота в целое зачастую остаточные деформации приводят к отклонениям размеров, что не позволяет использовать их на больших оборотах вращения. Таким образом, и по этой причине существует настоятельная необходимость применения высококонцентрированных источников нагрева в сварочном производстве буровых долот.

Целью данной работы являлось исследование свариваемости сталей 40ХН и 14Х3МНА и разработка принципиальной технологии электронно-лучевой сварки (ЭЛС) в производстве новых конструкций буровых долот.

Природа хрупкого разрушения сварного соединения обусловлена действием двух главных факторов: термическим и силовым воздействием сварки. Локальное разрушение поражает основной металл в непосредственной близости к шву, на расстоянии одного или нескольких зерен от него, т. е. там, где сталь была перегрета до температур, превышающих 1200…1300 °С. Чтобы свести к минимуму перегрев, т. е. уменьшить время пребывания примыкающего к шву участка околошовной зоны при температурах более 1200…1300 °С, нужен такой концентрированный источник нагрева как электронный луч.

Проведенные ранее исследования [2] убедительно показали, что использование ЭЛС позволяет резко снизить перегрев в околошовной зоне, замедлить рост аустенитного зерна, предупредить распространение макротрещин из одних участков сварного соединения в другие за счет «закалки» дефектов физического характера (дислокации, вторичные границы) и устранения возможности их выстраивания в границу. С учетом этого можно ожидать положительных результатов по качеству сварных соединений разнородных сталей, одной из которых является 40ХН.

Принципиальная технология ЭЛС отрабатывалась на плоских моделях сварных соединений сталей 40ХН и 14Х3МНА толщиной 30 мм. В зависимости от размеров долот требуемая глубина проплавления должна быть 15…26 мм. Оптимальная форма шва характеризуется практически параллельными стенками с малым схождением к корню в сочетании с конструкционной глубиной проплавления (рис. 2). Она обеспечивалась определенной погонной энергией сварки, которая, например, для глубины 16 мм составляла 970 кДж/м. Непосредственно перед ЭЛС производили очистку стыка электронным пучком на режиме: скорость перемещения электронного пучка v = 6 мм/с, ток сварки $I_{св}$ = 12 мА, ток фокусирующей линзы $I_{фок}$ = 563 мА, круговая развертка пучка диаметром A = 10 мм. После сварки и механической порезки швов исследованы структуры сварных соединений. Микроструктура металла шва мартенситная, характеризуется игольчатым старением с ориентировкой игл под углом 60°. Твердость довольно высокая — HV 0,1 4810…5050 МПа (рис. 3, *а*).

Микроструктура основного металла стали 40ХН ферритно-перлитная с невысокой твердостью HV 0,1 1680…2180 МПа. Линия сплавления со стороны 40ХН отчетливая, трещин и других дефектов по линии сплавления не наблюдается. В зоне перегрева (на участке крупного зерна) наблюдается мартенситная структура с твердостью HV 0,1 4810 МПа (рис. 3, *б*). Микроструктура участка мелкого зерна также мартенситная с твердостью несколько ниже твердости участка крупного зерна HV 0,1 4410 МПа. В участке неполной

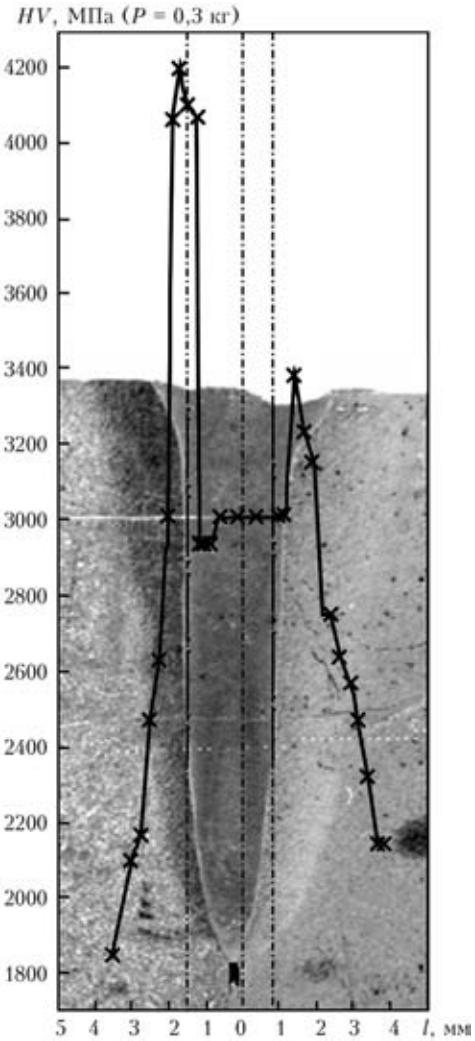


Рис. 4. Поперечное сечение и распределение твердости в сварном соединении сталей 40ХН и 14Х3МНА при модифицировании цирконием

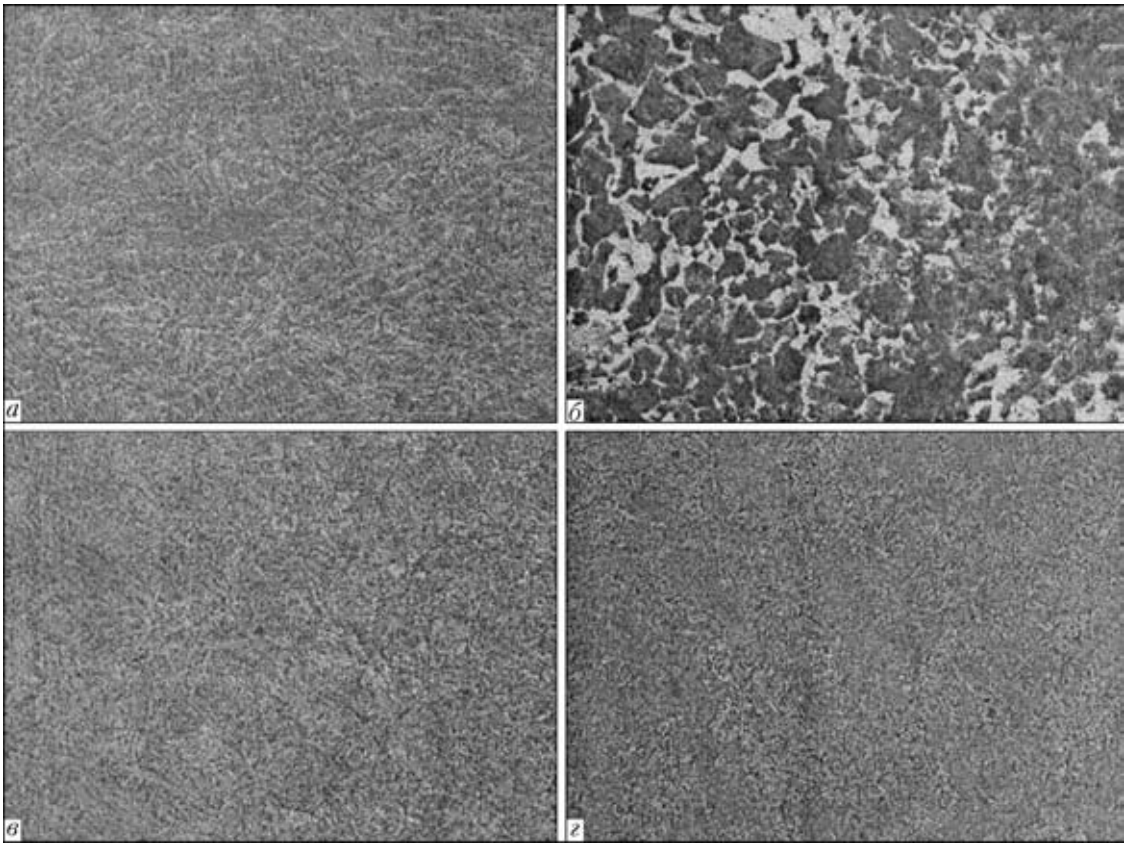


Рис. 5. Микроструктуры (×200) сварного соединения сталей 40Х и 14Х3МНА со вставкой циркония: *а* — металл шва; *б* — участок крупного и мелкого зерна со стороны стали 40Х; *в* — участок неполной перекристаллизации; *г* — участок крупного зерна со стороны стали 14Х3МНА

перекристаллизации (рис. 3, *в*) в структуре наблюдаются феррит и перлит.

Твердость плавно падает по мере увеличения содержания феррита и перлита в структуре. Ширина ЗТВ со стороны 40ХН составляет от 0,3 мм в корневой части до 2 мм в верхней части шва. В ряде случаев в сварных соединениях наблюдались трещины (рис. 3, *г*).

На участке крупного зерна со стороны стали 14Х3МНА наблюдается структура преимущественно нижнего бейнита, который сохранил ориентировку под углом 60° (рис. 3, *д*). Твердость этой структуры ниже мартенситной и составляет *HV* 0,1 3790…4180 МПа. По мере удаления от линии сплавления в структуре появляются участки ферритной составляющей и соответственно твердость падает до *HV* 0,1 2470 МПа. Ширина ЗТВ со стороны стали 14Х3МНА несколько шире ЗТВ со стороны 40ХН и составляет в корневой части 0,5 мм, а в верхней части шва — до 3 мм.

Пластинчато-игольчатая структура сварного соединения исследуемых сталей с большим перепадом твердости предопределяет низкую пластичность соединений с образованием трещин в них. Для преобразования пластинчато-игольчатой структуры и улучшения прочностных свойств соединений было применено модифицирование шва с помощью вставок встык в виде фольги толщиной 0,1…0,2 мм из стали Х18Н9Т, титана и циркония. Эффективность этого метода подтверждена ранее при разработке технологии ЭЛС буровых долот больших габаритов [3].

В данном случае наилучшие результаты с точки зрения предотвращения образования трещин в сварных соединениях получены при использовании вставок из циркония. Вставки в виде прямоугольников фольги размерами 40×10 мм и толщиной 0,1 мм размещались по всей длине стыка с промежутком 30 мм. Режимы ЭЛС сохраняли такими же, как при сварке стыков без вставок. Введение циркония в металл шва способствует образованию труднорастворимых в аустените карбидов. Их воздействие на свойства соединений проявляется в виде измельчения зерна, снижения порога хладноломкости и понижения чуствительности к концентраторам напряжений [4].

Распределение твердости на поперечных шлифах показывает ее понижение в среднем на *HV* 0,1 800 МПа (рис. 4), что свидетельствует о получении более пластичных сварных соединений.

Микроструктура шва со вставкой циркония бейнитно-мартенситная с твердостью *HV* 0,1 4410…4570 МПа (рис. 5, *а*). На участке крупного и мелкого зерна микроструктура со стороны стали 40ХН представляет собой классический мелкоигольчатый мартенсит с твердостью до *HV* 0,1

4800 МПа (рис. 5, *б*). На участке неполной перекристаллизации появляются участки ферритной и перлитной структуры (рис. 5, *в*), что понижает твердость до *HV* 0,1 2320 МПа. На участке крупного зерна со стороны 14Х3МНА микроструктура состоит из смеси верхнего и нижнего бейнита с твердостью *HV* 0,1 3750 МПа (рис. 5, *г*). Трещин в сварных соединениях не наблюдается.

Таким образом, модифицирование металла шва цирконием при ЭЛС сталей 40ХН и 14Х3МНА в конструкциях новых типов буровых долот обеспечивает формирование сварных соединений без трещин.

1. *Келоглу Ю. П., Захаревич К. М., Карташевская М. И.* Металлы и сплавы. — Кишинев: Картя молдавеняскэ, 1977. — 264 с.
2. *Грабин В. Ф., Денисенко А. В.* Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей. — Киев: Наук. думка, 1978. — 276 с.
3. *Нестеренков В. М., Протосей Н. Е., Архангельский Ю. А.* Технологические особенности электроннолучевой сварки буровых долот // Автомат. сварка. — 2009. — № 5. — С. 12–19.
4. *Гривняк И.* Свариваемость сталей / Пер. со словац. Л. С. Гончаренко; под ред. Э. Л. Макарова. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.

Influence of weld metal modification in electron beam welding of new designs of drill bits was studied. It is shown that application of zirconium inserts-modifiers allows preventing cracks in welded joints of 40KhN and 14Kh3MNA steel.

Поступила в редакцию 10.05.2011

ВНИМАНИЮ СПЕЦИАЛИСТОВ!

«ТРИАДА-СВАРКА» — ТЕПЕРЬ и в г. ДНЕПРОПЕТРОВСКЕ

С 1992 г. предприятие «Триада-Сварка» работает на рынке сварочного оборудования. Многолетний опыт работы нашего предприятия построен на тесном и взаимном сотрудничестве с крупнейшими мировыми разработчиками и производителями в этой отрасли: «Fronius International GMBH» (Австрия), «HUPERTHERM» (США), ОАО «СЭЛМА» (Украина), «ABICOR BINZEL» (Германия), «ASKAYNAK» (Турция).

Предприятие «Триада-Сварка» предлагает весь спектр услуг по подбору, поставке и обслуживанию необходимого сварочного оборудования для ручной дуговой, механизированной в защитных газах, аргонодуговой неплавящимся электродом; автоматической под слоем флюса, контактной, плазменной и лазерной сварки. Оборудование для плазменной резки, сварочные принадлежности и расходные материалы являются немаловажной частью ассортимента компании. В сервисном центре работают технически грамотные и высококвалифицированные специалисты, имеющие опыт работы в развитии технологии сварки, прошедшие стажировку на заводах-производителях оборудования Австрии, Германии, Турции и Украины.

Предприятие «Триада-Сварка» прошло сертификацию фирмы «Fronius International GMBH» и получило сертификат официального сертифицированного дилера. В феврале 2011 г. компанией был подписан договор эксклюзивного представителя в Украине турецкого производителя сварочных материалов фирмы «ASKAYNAK».

Высокий технический и профессиональный уровень специалистов позволяет успешно решать задачи не только в подборе и поставках любого современного сварочного оборудования, но и осуществлять квалифицированную консультативную помощь при разработке технологий и пусконаладочных работах. Следующим шагом в развитии предприятия стало открытие офиса в г. Днепропетровске. На базе нового офиса сформирован склад расходных материалов и запчастей к предлагаемому оборудованию, наличие такого склада уменьшит сроки поставок продукции на предприятия заказчиков. Непосредственно в офисе имеется выставочный зал, который позволит наглядно ознакомиться с предлагаемым ассортиментом.

Предприятие «Триада-Сварка» в г. Днепропетровске находится но адресу: проспект Кирова, 58, кв. 6. Новый офис компании сможет предложить новинки сварочной техники в сочетании с гибкой ценовой политикой. Оперативность выполнения заказов и высокая квалификация персонала помогут быстро и качественно подобрать интересующее оборудование.

УДК 621.791.75.02-492

ПОРОШКОВЫЕ ПРОВОЛОКИ СЕРИИ ФМИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ (Обзор)

Чл.-кор. НАН Украины **В. И. ПОХМУРСКИЙ**, **М. М. СТУДЕНТ**, д-р техн. наук, **В. М. ГВОЗДЕЦКИЙ**, инж. (Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины, г. Львов),
А. В. ПОХМУРСКАЯ, д-р техн. наук (Ин-т материаловед., Хемницкий техн. ун-т, Германия)

Приведен краткий обзор разработанных в Физико-механическом институте им. Г. В. Карпенко НАН Украины порошковых проволок для электродугового напыления. Показано, что разработка и применение специальных порошковых проволок как электродных материалов расширило области использования электрометаллизации и во многих случаях позволило получать покрытия со свойствами на уровне лучших плазменных и других газотермических покрытий, но с меньшими затратами.

Ключевые слова: напыление покрытий, электродуговая металлизация, порошковые проволоки, ремонт изношенных поверхностей, структура покрытий, свойства

Электродуговая металлизация — один из газотермических методов нанесения покрытий. Он является технологически наиболее простым и продуктивным методом, не требующим дорогостоящего оборудования, и легко внедряется в производство. Одним из существенных недостатков этого метода является малый ассортимент используемых материалов — проволоки сплошного сечения. Поэтому использование порошковых проволок (ПП) как электродных материалов для электродугового напыления покрытий позволило широко варьировать химический состав покрытий, резко расширять область их использования, а также во многих случаях получить покрытия со свойствами на уровне лучших плазменных и сверхзвуковых газотермических покрытий, но в 5…10 раз дешевле. На сегодня ПП для электродугового напыления серийно выпускают как за рубежом (фирмы «Metco», «Castolin», «TAFA», «Nanosteel»), так и в Украине. Наибольший вклад в разработку и внедрение электродуговых покрытий из ПП в производство внесли специалисты из Института электросварки им. Е. О. Патона [1–8], Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАН Украины (ФМИ) [9–25], Приазовского государственного технического университета [26]. Покрытия из ПП используют во многих отраслях техники для восстановления и защиты от абразивного и газоабразивного износа при комнатной и повышенных температурах вплоть до 700 °С, для ремонта различных деталей машин и агрегатов, работающих в условиях граничного трения.

В ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины разработаны ПП диаметром 1,8 мм для электродуговой металлизации (таблица), опытно-промышленные партии которых изготовлены в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Результаты исследований, посвященных разработке ПП, изучению структурообразования и эксплуатационных свойств электродуговых покрытий различного назначения, отражены в работах [1–10, 26], а разработанные составы ПП защищены патентами Украины [21–25].

Восстановительные покрытия используют для ремонта изношенных поверхностей деталей типа вал с последующей механической обработкой покрытий преимущественно механообрабатывающим инструментом. Поэтому для таких покрытий важнейшим является их высокая износостойкость и производительность при механической обработке. Эти условия обеспечиваются при формировании покрытий с твердостью *HV* 300…400, в структуре которых находится минимальное количество оксидной фазы.

Минимальное количество кислорода в покрытиях на уровне 2 мас. % обеспечивается при наличии в шихте ПП 0,8 % углерода, 6 % хрома и 6 % алюминия (рис. 1).

С увеличением содержания алюминия уменьшается количество мартенсита, но возрастает содержание феррита в покрытии. При этом твердость покрытия уменьшается при одновременном увеличении его адгезионной прочности. Оптимальная твердость покрытия в диапазоне *HV* 300…400 обеспечивается при наличии в проволоке 6…12 мас. % алюминия. Матричной фазой таких покрытий является феррит, легированный хромом и алюминием. ПП с повышенным количеством алюминия применяют в энергетике при восстановлении посадочных мест валов роторов электродвигателей, тормозных барабанов грузовых автомобилей и др. (рис. 2).

Для покрытий, применяемых для деталей, работающих в условиях абразивного износа, выд-

© В. И. Похмурский, М. М. Студент, В. М. Гвоздецкий, А. В. Похмурская, 2011

Порошковые проволоки и их назначение

Марка проволоки	Тип легирования	*HRC*, *HV*, $\sigma_в$, $\sigma_{сц}$	Область применения
ФМИ-2	Х6Ю8Р3	*HRC* 40 *HV* 650 $\sigma_в$ = 130 МПа $\sigma_{сц}$ = 40 МПа	Восстановление шеек средненагруженных коленчатых валов, распределительных валов, защита от абразивного износа полиграфического оборудования
ФМИ-5	50Х6Ю3Г2М2С2	*HV* 350 $\sigma_в$ = 180 МПа $\sigma_{сч}$ = 40 МПа	Восстановление посадочных мест деталей под подшипники
ФМИ-6	Х6Ю6Р3Н4	*HRC* 40 *HV* 1000, $\sigma_в$ = 60 МПа, $\sigma_{сц}$ = 45 МПа	Защита от газовой коррозии и газоабразивного износа при высоких температурах (до 700 °С)
ФМИ-7	70Х6Ю6Р3W4	*HRC* 40 *HV* 1150 $\sigma_в$ = 120 МПа, $\sigma_{сц}$ = 45 МПа	Защита от газовой коррозии и газоабразивного износа при высоких температурах (до 600 °С)
ФМИ-8	50Х6Ю2Г2Т2М2	*HV* 500 $\sigma_в$ = 180 МПа, $\sigma_{сц}$ = 40 МПа	Восстановление шеек средненагруженных коленчатых валов, распределительных валов

вигаются следующие требования: высокая твердость, низкий уровень напряжений первого рода и высокая износостойкость. Установлено, что с увеличением твердости покрытий до *HV* 700…800 их износостойкость возрастает, а более *HV* 800 уменьшается, что связано с возникновением микротрещин в покрытиях. Износ покрытий происходит вследствие роста уже готовых трещин преимущественно по границам ламелей с последующим их скалыванием. Установлено, что высокую износостойкость покрытий при испытании закрепленным абразивом обеспечивают более твердые ламели и твердые оксиды алюминия на границах между ламелями. Поэтому в данном случае следует формировать покрытия, во-первых, с высокой микрогетерогенностью, чтобы обеспечить в них низкий уровень напряжений растяжения, во-вторых, с небольшой толщиной ламелей (высокой дисперсностью покрытия), чтобы повысить содержание оксидов на межламелярных границах. При испытании на износ незакрепленным абразивом слабыми звеньями покрытий являются ламели с наименьшей твердостью и межламелярные границы. В этом случае следует формировать покрытие с низкой микрогетерогенностью и максимальной толщиной ламелей, чтобы минимизировать количество границ между ламелями. Покрытия системы Fe–Cr–B–Al марок ФМИ нашли широкое применение для защиты от абразивного износа в полиграфической промышленности (рис. 3).

Твердость покрытий для деталей, работающих в условиях граничного трения, должна быть не ниже *HV* 600. Механическая обработка таких покрытий проводится шлифованием под требуемые размеры. При этом в структуре покрытий часто возникают микротрещины, которые могут привести к разрушению покрытия во время эксплуатации. Для обеспечения требуемых характеристик покрытий в состав шихты ПП вводится хром, углерод, бор и алюминий в таких количествах, чтобы матричной фазой покрытия был мартенсит.

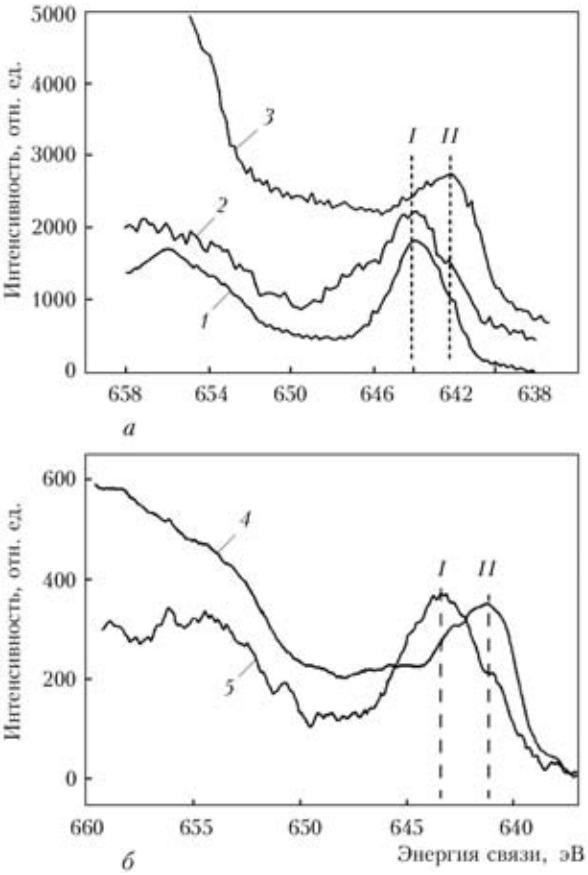


Рис. 1. Влияние количества углерода (*1*), хрома (ПП80Х (0…6) (*2*) и алюминия (ПП80Х6Ю (0...10)) (*3*) в шихте ПП на количество кислорода в покрытиях (*а*) и относительная стойкость резца из сплава ВК8 (*б*) при обработке покрытий из ПП 80Х6Ю (0…10 Al)

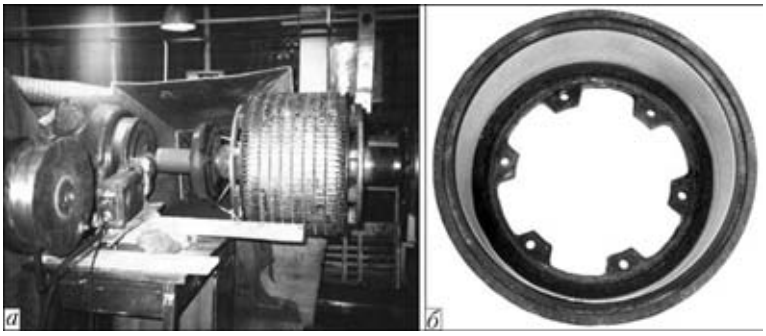


Рис. 2. Восстановление вала ротора электродвигателя (*а*) и тормозного барабана грузового автомобиля (*б*)

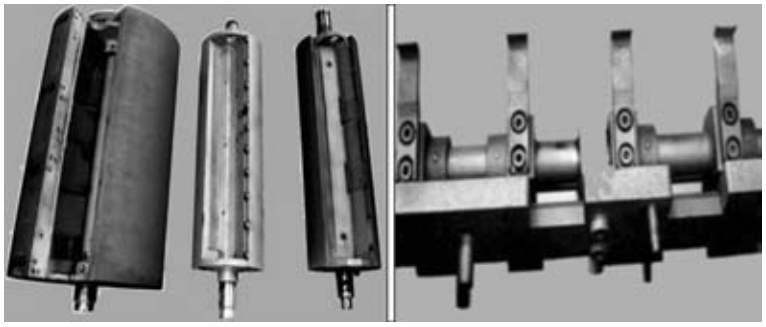


Рис. 3. Восстановленные детали листопротяжной системы полиграфической машины

Такая структура обеспечивает минимальный уровень растягивающих напряжений в покрытии не выше 50 МПа.

При удельных нагрузках свыше 14 МПа в паре трения покрытие – контртело происходит катастрофический износ контртела. Металлографическим, спектральным и рентгеноструктурным анализами установлено, что это обусловлено наличием на шлифованной поверхности покрытий трещин, раскрытые края которых выполняют роль резцов, выступов высотой до 0,3 мкм, образованных оксидами алюминия и карбидами. Выступы из карбидов над шлифованной поверхностью покрытий образуются в результате неполного растворения крупных карбидов из шихты в расплаве ПП. Для устранения интенсивного износа контртела в паре трения с покрытием предложены способы оптимизации покрытий, которые сводятся к следующему:

обеспечение условия полного растворения карбидов в расплаве ПП с использованием для этого меньших по размерам частиц карбидов в шихте ПП или применение повышенного напряжения дуги (34…38 В) при напылении;

уменьшение содержания воздуха в шихте ПП путем ее уплотнения и добавления к ней порошка, содержащего соединения титана, который в паровой фазе взаимодействует с кислородом в зоне расплава, образуя мелкие оксиды титана, которые на 1…2 порядка меньше частиц Al_2O_3.

На шлифованной поверхности покрытия, полученного из ПП с оптимизированным составом шихты, отсутствуют микровыступы и шероховатость его шлифованной поверхности существенно меньше. Кроме того, титан и магний в составе

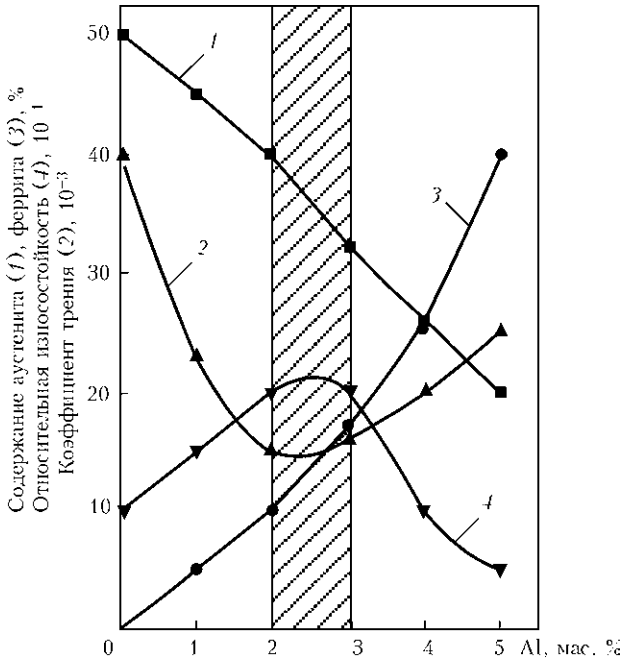


Рис. 4. Влияние содержания алюминия в ПП 50Х6Т2М2Ю2 на трибологические характеристики покрытий с трехфазной структурой в условиях граничного трения при удельной нагрузке P = 7 МПа

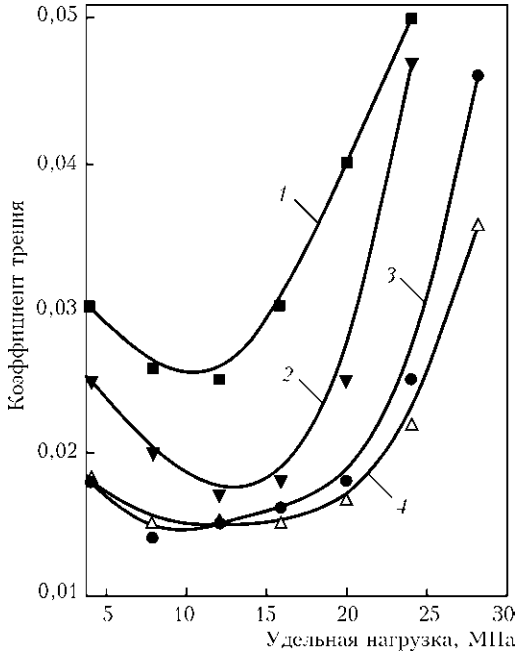


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения в масле дизельном М14В2 от удельной нагрузки для пар трения покрытия с ПП—бронза (БрС-30): *1* — Х6Ю6Р3; *2* — сталь ШХ15 (*HRC* 62); *3* — 50Х6Г2Т2М2+Х6Р3Ю6Т2; *4* — 50Х6Т2М2Ю2

шихты ПП способствуют усвоению 2…3 мас. % азота из воздуха, содержащегося в порах шихты, благодаря чему в покрытии формируются частицы нитридов титана размером 200…500 нм.

В результате неравновесности структуры и фазового состава покрытий при трении в них могут реализовываться условия, благоприятные для самоорганизации поверхностного слоя.

Методами малоугловой рентгенографии покрытия установлено, что оптимальные условия для самоорганизации поверхности возникают в трехфазном покрытии с матричной фазой мартенсита (~50 %), аустенита (~30 %) и феррита (~20 %). При высоких удельных нагрузках из аустенита выделяются карбиды $(Fe, Cr)_{23}C_6$ и часть его с поглощением тепла превращается в отпущенный мартенсит.

Предполагается, что в феррите выделяются наноразмерные частицы графита (10…20 нм). При трении углерод диффундирует к поверхности трения и образует на ней сплошную пленку графита. Оптимальное содержание феррита в структуре покрытия составляет 10…20 %. При этом коэффициент трения и износ пары трения минимальны (рис. 4, 5). Такое содержание феррита в покрытии обеспечивается при наличии в нем 2…3 мас. % алюминия.

Проволоки серии ФМИ нашли применение для восстановления опорных шеек роторов и валов турбины компрессоров для перекачки газа на ремонтных предприятиях «Укрэнергосервис», штоков гидроцилиндров шахтного оборудования (рис. 6).

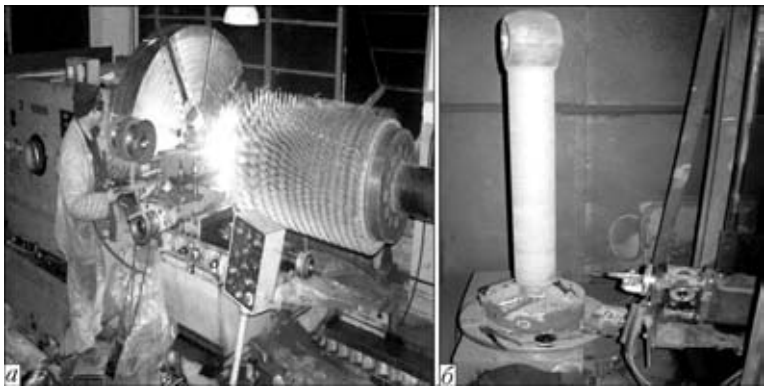


Рис. 6. Напыление покрытия на опорную шейку вала турбины (*а*) и штока гидроцилиндра (*б*)

Для покрытий из ПП системы Fe–Cr–B–Al, эксплуатируемых в условиях повышенных температур при наличии газоабразивного износа, важна стабильно высокая твердость в течение долгого времени эксплуатации (несколько лет) при высокой температуре. Для обеспечения высокой твердости и жаростойкости покрытий в состав шихты ПП добавляли такие элементы, как хром, бор, алюминий, магний, никель и вольфрам, которые могут при повышенной температуре вызвать дисперсионное упрочнение. Фазовым и спектральным анализами установлено, что дисперсионное упрочнение покрытий обеспечивается выделениями в их структуре боридов $(FeCr)_2B$, нитридов CrN и AlN, а также интерметаллидов $FeAl_3$, Ni_3Al и Fe_7W_6. При температуре эксплуатации до 550 °С наибольший эффект упрочнения обеспечивается выделением интерметаллидов Fe_7W_6, а свыше 550 °С — Ni_3Al.

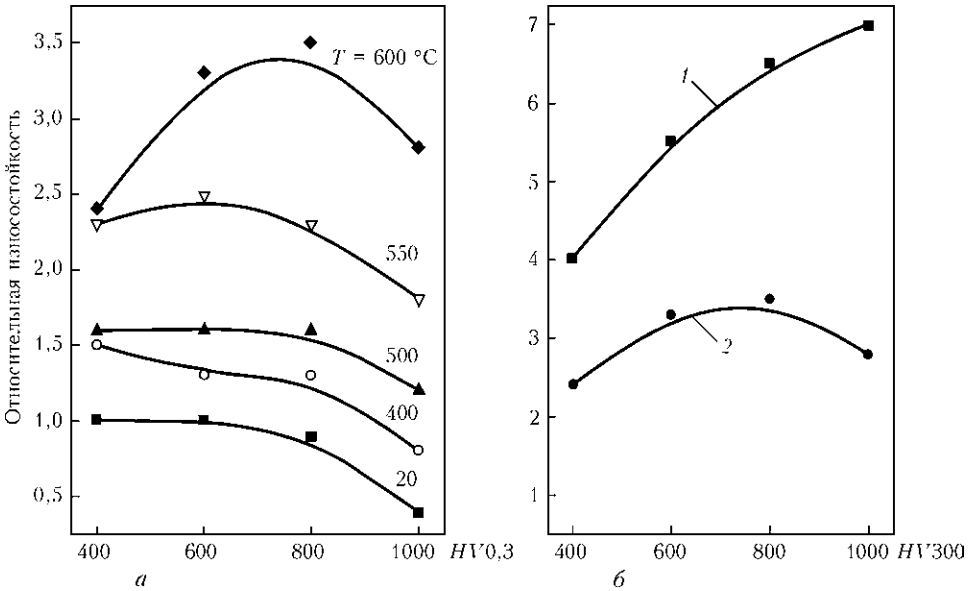


Рис. 7. Относительная износостойкость покрытий из ПП системы Fe–Cr–B–Al (залитые значки) и эталонных образцов из стали 12Х1МФ при различных температурах (предварительная выдержка образцов при температуре испытания 50 ч) (*а*) и относительная износостойкость покрытий из тех же материалов при температуре испытания 600 °С (*б*) и длительности предварительной выдержки образцов 100 (кривая *1*) и 50 (*2*) ч

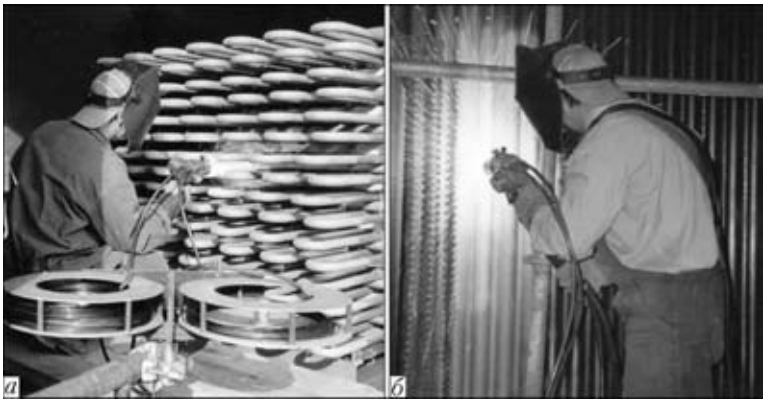


Рис. 8. Напыление покрытий из ПП на трубы экономайзера (*а*) и экранные трубы (*б*) котла ТП-100 для защиты от газоабразивного изнашивания при повышенных температурах

Покрытия из ПП повышают жаростойкость стали 12Х1МФ в 30 раз. В отличие от сплошных материалов покрытиям свойственно как внешнее с поверхности, так и внутреннее межламелярное окисление. Кислород может проникать вдоль границ ламелей и по микротрещинам до стальной основы и формировать там оксидные пленки. Интенсивность газоабразивного износа зависит от твердости покрытий и уровня в них напряжений.

При комнатной температуре износостойкость покрытия уменьшается с повышением его твердости и становится меньше твердости эталона — стали 12Х1МФ. С повышением температуры износостойкость покрытий возрастает, причем чем больше экспозиция при высокой температуре, тем выше износостойкость покрытия (рис. 7). Это обусловлено напряжениями первого рода, которые формируются в покрытии. При длительных экспозициях при температуре 500…600 °С в покрытии происходят два противоположных процесса. Во-первых, в покрытии выделяются дисперсные фазы, в результате чего его объем уменьшается и растягивающие напряжения в нем растут, в то же время в покрытии происходит внутреннее окисление и его объем при этом увеличивается, а напряжения растяжения уменьшаются. Вследствие этого при экспозиции около 1000 ч растягивающие напряжения в покрытиях сменяются на напряжения сжатия.

Покрытия, в структуре которых происходят дисперсионные газовые выделения, применяют для защиты от газоабразивного износа, например, нагревательных элементов котлов ТЭС (рис. 8).

Таким образом, разработанные ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины ПП могут найти применение для электродугового напыления различного назначения.

1. *Борисов Ю. С., Коржик В. Н.* Аморфные газотермические покрытия: теория и практика // Автомат. сварка. — 1995. — № 4. — С. 3–12.
2. *Структура* и свойства электродуговых покрытий на основе ферробора, полученных из порошковых проволок / А. Л. Борисова, И. В. Миц, Т. В. Кайда и др. // Там же. — 1991. — № 9. — С. 66–68.
3. *Влияние* технологических параметров электродуговой металлизации на прочность сцепления и структуру покрытий из порошковых проволок на основе FeCr + Al / А. Л. Борисова, А. Ш. Клейман, В. К. Андрейчук и др. // Тез. докл. X Всесоюз. конф. «Теория и практика газотермического нанесения покрытий». — Димитров, 1989. — Т. 2. — С. 153–157.
4. *Борисова А. Л., Клейман А. Ш.* Влияние редкоземельных металлов и кальция на структуру и физико-механические свойства электрометаллизационных покрытий из порошковых проволок с наполнителем из ферробора // Прочность деталей сельскохозяйственной техники. — Кишинев: Кишинев. с.-х. ин-т, 1990. — С. 33–38.
5. *Борисов Ю. С., Козьяков И. А., Коржик В. Н.* Структура и свойства газотермических покрытий, полученных с использованием порошковых проволок системы Fe–Cr–B, Fe–Cr–B–C // Автомат. сварка. — 1996. — № 5. — С. 21–24.
6. *Влияние* условий напыления на структуру покрытий, полученных из порошковой проволоки «Амотек 101» / Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова, И. А. Козьяков и др. // Там же. — 1996. — № 1. — С. 21–30.
7. *Козьяков И. А., Коржик В. Н., Борисов Ю. С.* Стойкость аморфизированных газопламенных покрытий из порошковых проволок системы Fe–B в условиях газоабразивного изнашивания // Там же. — 1996. — № 9. — С. 27–29.
8. *Козьяков И. А., Коржик В. Н., Борисов Ю. С.* Трибологические характеристики аморфизированных газопламенных покрытий, напыляемых порошковыми проволоками системы Fe–B // Там же. — 1996. — № 10. — С. 24–28.
9. *Електродугові* відновні та захисні покриття / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгуник та ін. — Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2005. — 190 с.
10. *Застосування* електродугової металізації порошковими дротами системи Fe–Cr-C–Al для відновлення деталей машин / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгуник, І. Й. Сидорак // Машинознавство. — 1999. — № 1. — С. 13–18.
11. *Вплив* абразивно-струминної обробки на адгезію протикорозійних і відновних електрометалізаційних покриттів / І. Й. Сидорак, М. М. Студент, В. М. Довгуник, Н. Павлик // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2000. — № 1. — С. 458–460.
12. *Вплив* тертя на фазові перетворення у поверхневих шарах газотермічного покриття FeCrB+Al / М. М. Студент, В. М. Довгуник, І. Й. Сидорак та ін. // Те саме. — 2000. — **36**, № 4. — С. 109–111.
13. *Вплив* тертя на структурно-фазові перетворення у приповерхневому шарі газотермічного покриття FeCr+Al+C / В. М. Довгуник, М. М. Студент, І. Й. Сидорак та ін. // Те саме. — 2000. — № 5. — С 113–116.
14. *Tribologycal* properties of arc sprayed coatings obtained from FeCrB and FeCr based powder wires / A. Pokhmurska, M. Student, E. Bielanska et al. // Surface & Coating Technology. — 2002. — **151–152**. — P. 490–494.
15. *Порошковые* проволоки систем FeCrB+Al и FeCr+Al+C для восстановительных электрометаллизационных покрытий / В. И. Похмурский, М. М. Студент, В. М. Довгуныk, И. И. Сидорак // Автомат. сварка. — 2002. — № 3. — С. 32–35.

16. *Структура* и трибологические свойства покрытий, полученных методом электродуговой металлизации / В. И. Похмурский, М. М. Студент, И. И. Сидорак и др. // Там же. — 2003. — № 8. — С. 13–17.
17. *Влияние* режимов электродуговой металлизации и состава применяемых порошковых проволок на структуру и абразивную износостойкость покрытий // В. И. Похмурский, М. М. Студент, И. А. Рябцев и др. // Там же. — 2006. — № 7. — С. 31–36.
18. *Triboelektroche* miczne wtasciwosci powlok natryskiwanych lukowo na stopy aluminium / V. Pokhmurskii, V. Dovhunyk, M. Student et al. // Inzynieria Powierzchni. — 2008. — № 1. — S. 9–13.
19. *Високотемпературна* корозія електродугових покривів з порошкових дротів на базі системи Fe–Cr–B–Al / М. Студент, Ю. Дзьоба, В. Гвоздецький та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2008. — № 5. — С. 93197.
20. *Пат. 40722U Україна, МПК (2009) C23C 4/00, B22F 7/00, B32B 15/00.* Порошковий дріт для одержання дисперсійно зміцнених електродугових покриттів / В. І. Похмурський, М. М. Студент, Ю. В. Дзьоба, І. Й. Сидорак; заявник і патентовласник. — U2008 12843; заявл. 03.11.2008; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.
21. *Пат. 40723U Україна, МПК (2009) C23C 4/00, B22F 7/00, B32B 15/00.* Порошковий дріт для одержання зносостійких електродугових покриттів / М. М. Студент, Г. В. Похмурська, Я. Я. Сірак, В. М. Гвоздецький; заявник і патентовласник ФМІ НАН України. — U2008 12844; заявл. 03.11.2008; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.
22. *Пат. 47456 Україна, МПК (2009) C23C 6/00.* Порошковий дріт для одержання електродугових покриттів, що дисперсійно зміцнюються за підвищених температур / В. І. Похмурський, М. С. Романів, М. М. Студент, Г. В. Похмурська, Т. М. Харандюк, Я. В. Серівка; заявники і патентовласники: ФМІ НАН України; Бурштинська ТЕС. — U2009 05524; заявл. 01.06.2009; опубл. 10.02.2010; Бюл. № 3.
23. *Пат. 19967 Україна, МПК (2006) C 23 C 4/00.* Спосіб одержання композиційних покриттів / С. І. Маркович, В. І. Похмурський, О. Й. Мажейко, М. М. Студент; заявники і патентовласники: ФМІ НАН України; Кіровоградський нац. техн. ун-т. — U2006 05358; заявл. 16.05.2006; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.
24. *Пат. 20013 Україна, МПК (2006) C23C 4/04, C3C 4/12.* Порошковий дріт для одержання композиційних газотермічних покриттів / В. І. Похмурський, Г. В. Похмурська, М. М. Студент, Ю. В. Дзьоба, Я. Я. Сірак; заявник і патентовласник: ФМІ НАН України. — U2006 06217; заявл. 05.06.2007; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.
25. *Пат. 40721U Україна, МПК (2009) C23C 4/00, B22F 7/00, B32B 15/00.* Порошковий дріт для одержання зносостійких електродугових покриттів / В. І. Похмурський, М. М. Студент, Ю. В. Дзьоба, І. Й. Сидорак; заявник і патентовласник: ФМІ НАН України. — U2008 12842; заявл. 03.11.2008; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.
26. *Роянов В. А.* Теоретические основы создания и промышленное освоение экономнолегированных ПП для электродугового напыления износостойких покрытий с улучшенными эксплуатационными свойствами: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Минск, 1990. — 36 с.

The paper gives a brief review of flux-cored wires developed by the N.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine for electric arc spraying. It is shown that development and utilisation of special flux-cored wires as electrode materials widened the application fields for electric arc metallising and allowed, in many cases, deposition of coatings with properties at a level of the best plasma and other thermal spraying ones at lower costs.

Поступила в редакцию 16.06.2011

ВНИМАНИЮ МОЛОДЫХ СВАРЩИКОВ!

МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНКУРС СВАРЩИКОВ В КИТАЕ

Общество сварщиков Украины информирует, что 27–30 мая 2012 г. в Пекине Китайское сварочное общество проводит международный конкурс сварщиков «2012 ARC Cup International Welding Competition» во время 17-й выставки Beijing Essen Welding and Gutting. Возраст конкурсантов — 16–25 лет (на 1 января 2012 г.). Номинация конкурса: дуговая сварка — ручная покрытыми электродами, механизированная плавящимся электродом в активных газах, неплавящимся электродом в инертных газах и роботизированная.

Заявки на участие в конкурсе направлять
в Общество сварщиков Украины:
тел./факс 44-200 2466, E-mail: tzu@e-mail.ua

УДК 621.791:621.9.06

СОЗДАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ И СРЕДСТВ ОКЕАНОТЕХНИКИ

С. С. РЫЖКОВ, **В. С. БЛИНЦОВ**, доктора техн. наук (Нац. ун-т кораблестроения имени адмирала Макарова),
Г. В. ЕГОРОВ, д-р техн. наук (ООО «Морское инженерное бюро»),
Ю. Д. ЖУКОВ, д-р техн. наук (ООО «Акер Ярдз Дизайн Юкрейн»),
В. Ф. КВАСНИЦКИЙ, **К. В. КОШКИН**, доктора техн. наук (Нац. ун-т кораблестроения имени адмирала Макарова),
И. В. КРИВЦУН, чл.-кор. НАН Украины (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона),
В. А. НЕКРАСОВ, д-р техн. наук (Нац. ун-т кораблестроения имени адмирала Макарова),
В. В. СЕВРЮКОВ, канд. техн. наук, (ГП «Классификационное общество Регистра судоходства Украины»)
Ю. В. СОЛОНИЧЕНКО, инж. (ОАО «Вадан Ярдз Океан»)

Кратко представлен цикл комплексных работ по проектированию конкурентоспособных судов и обеспечению современными технологиями их постройки на украинских верфях, выполненных учеными и специалистами ряда организаций.

Ключевые слова: сварные конструкции, судостроение, транспортные суда, средства океанотехники, проекты, современные сварочные технологии

Судостроение Украины работает в условиях дефицита инновационной финансовой поддержки. Прибыльность предприятий в конкурентной среде может быть обеспечена за счет высокого уровня технологичности и производительности используемых технических средств, гарантирующих требуемое качество продукции. Поэтому инвестиционная привлекательность отечественного судостроения может быть обеспечена в результате всестороннего развития методов проектирования и технологий, а также резкого сокращения сроков постройки судов.

Решению этой комплексной научно-технической общегосударственной проблемы посвящена данная работа, выдвинутая Национальным университетом кораблестроения имени адмирала Макарова на соискание Государственной премии по науке и технике за 2011 г.

В работе принимали участие специалисты Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев; ООО «Морское инженерное бюро», г. Одесса; ООО «Акер Ярдз Дизайн Юкрейн», г. Николаев; Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев; ГП «Классификационное общество Регистра судоходства Украины», г. Киев; ОАО «Вадан Ярдз Океан», г. Николаев.

Работа коллектива ориентирована по двум направлениям — разработка проектов эффективных и надежных, конкурентоспособных судов, а также обеспечение современных технологий и организация их постройки на украинских верфях. В результате научных исследований в областях проектирования, конструирования, технологической подготовки и технологии производства, управления производством судов и объектов морской техники, а также экологии получено решение комплексной научно-технической проблемы создания высокоэффективных универсальных транспортных судов и средств океанотехники для транспортной отрасли, разведки и добычи морских ресурсов Украины.

Судно проекта 005RSD03 «Украинец»

Основные результаты работы*:

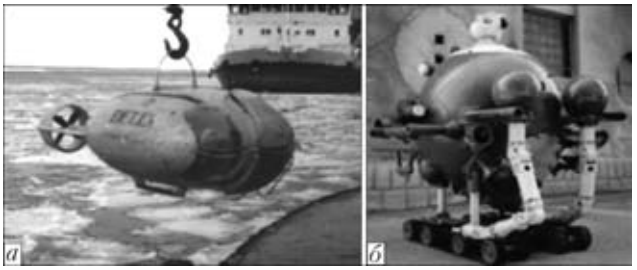
– разработка научных основ современной корабельной инженерии и их реализация на базе интегрального подхода к проектированию, конструированию и постройке судов, а также создание проектных платформ, обеспечивающих прямое общение с базами данных различных верфей и онлайновое решение с этими верфями вопросов проектирования, конструирования, постройки и достройки судов;

– создание и реализация новой методологии проектирования и конструирования на основе раз-

* Створення універсальних транспортних суден та засобів океанотехніки / С. С. Рижков, В. С. Блінцов, Г. В. Єгоров та ін. — Миколаїв: Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова, 2011. — 340 с.

© С. С. Рыжков, В. С. Блинцов, Г. В. Егоров, Ю. Д. Жуков, В. Ф. Квасницкий, К. В. Кошкин, И. В. Кривцун, В. А. Некрасов, В. В. Севрюков, Ю. В. Солониченко, 2011

Железнодорожный паром проекта 002СА01



Внешний вид созданных подводных аппаратов: *а* — «Дельта»; *б* — «МТК-200»

витых авторами теорий технической устойчивости, надежности и эффективности судов, оценки их ценовых характеристик и характеристик безопасности плавания, что обеспечивает также последующее применение программ поддержки этапов жизненных периодов судов с помощью технологий CALS и решений PLM;

– разработка теоретических основ проектирования, изготовление и внедрение высокоэффективных средств океанотехники для изучения и освоения морского шельфа, мониторинга технического состояния морских и портовых инженерных сооружений, определения уровня безопасности водных путей;

– создание и освоение современных металлообрабатывающих и сборочно-сварочных технологий и оборудования для постройки судов, что обеспечит их конкурентоспособность на мировом рынке, в частности внедрение способов воздушно-плазменной резки с добавлением воды в плазму и плазменной резки металла под водой, сборки и сварки объемных секций без применения постелей, механизированной и автоматической сварки порошковыми и сплошными проволоками в смеси газов с использованием керамических подкладок для обратного формирования сварного шва, гибридной лазерно-дуговой и лазерно-плазменной технологий сварки и обработки металла, теоретических основ и технологий модернизации оборудования, в частности машин термической резки, создание лазерно-дугового и лазерно-плазменного оборудования, квазирезонансных источников питания, специализированного оборудования для обработки металла при наплавке судовых валов;

– разработка теоретических основ и создание механизмов и устройств для обеспечения высокого уровня экологической безопасности при постройке и эксплуатации судов, охране жизни человека на берегу и в море;

– формирование отечественной нормативной базы классификации и постройки практически всех типов судов (от малых прибрежного и речного плавания до морских неограниченного района плавания);

– разработка и внедрение в украинское судостроение компьютеризованных интегрированных производств, в частности разработка методов и нового программного обеспечения оптимизационного управления отечественными верфями, т. е. управления операциями по своевременным поставкам материалов и оборудования от отечественных и зарубежных производителей, последовательностями операций сборки и сварки секций, блоков и судна в целом, что обеспечивает ликвидацию долгостроя как основного препятствия на пути к вхождению в мировой рынок.

Такое комплексное решение важнейшей государственной проблемы позволило уже с 2002 г. спроектировать и построить 130 судов на украинских и зарубежных верфях, 10 судов находятся на достройке и 24 — на стапелях предприятий.

В период с 2002 г. и по настоящее время на судостроительном заводе «Океан», Херсонском судостроительном заводе, Килийском заводе и заводе «Южный Севастополь» построена серия судов по заказу Damen Shipyards Hoogezand и других голландских фирм, Briese Schiffahr (Германия), STX Norway Offshore AS и других норвежских фирм, STX Pan Ocean (Корея), а также украинских АСК «Укрречфлот», компании «Черноморский судоходный менеджмент», ООО СП «Нибулон», государственного предприятия «Укрводшлях» и др., а также по заказу 10 российских компаний.

Мировой уровень выполненных работ подтверждается признанием их зарубежными компаниями. Универсальные транспортные суда проектов 006RSD05, RSD17 и RSD19 включены Английским королевским обществом RINA в перечень уникальных «Sighificant Ships», а созданные средства океанотехники, по признанию ЮНЕСКО, поставили Украину в один ряд с государствами — мировыми лидерами в области высоких подводных технологий.

The paper presents a cycle of integrated efforts made by scientists and specialists from a number of organisations and aimed at designing of competitive ships and providing of Ukrainian shipyards with the advanced technologies for their construction.

Поступила в редакцию 10.09.2011

УДК 621.791:061.2/.4

ВСЕУКРАИНСКИЙ СЕМИНАР-СОВЕЩАНИЕ ПО ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКЕ СВАРЩИКОВ

5 июня 2011 г. на базе Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины состоялся Всеукраинский семинар-совещание на тему «Современные подходы к профессиональной подготовке квалифицированных кадров для сварочного производства. Внедрение в учебно-производственный процесс государственного стандарта по профессии «Сварщик».

В семинаре-совещании приняли участие: министр образования и науки, молодежи и спорта Д. В. Табачник, Президент Национальной академии наук Б. Е. Патон, Президент Национальной академии педагогических наук В. Г. Кремень, первый заместитель председателя Общего представительного органа стороны работодателей на национальном уровне, исполнительный Вице-президент Конфедерации работодателей в Украине А. В. Мирошниченко, директор Департамента профессионально-технического образования Министерства образования и науки, молодежи и спорта В. В. Супрун, директор Государственного центра занятости Министерства социальной политики Украины В. М. Галицкий, академик-секретарь Отделения педагогики и психологии профессионально-технического образования Национальной академии педагогических наук Украины Н. Г. Нычкало, директор Института профессионально-технического образования Национальной академии педагогических наук Украины В. А. Радкевич, исполнительный директор Общества сварщиков Украины В. М. Илюшенко, работники Министерства социальной политики, Министерства образования и науки, молодежи и спорта Украины, директора учебных заведений профессионально-технического образования со всех регионов Украины.

Целью семинара-совещания являлось обсуждение проблем профессиональной подготовки персонала в области сварки и рассмотрение новых подходов к организации профессионально-технического обучения сварщиков в соответствии с требованиями национальных и международных стандартов.

Семинар начался с ознакомления с организацией профессиональной подготовки и аттестации сварщиков в Межотраслевом учебно-аттестационном центре ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, которая базируется на использовании модульной технологии обучения.

Были продемонстрированы учебно-методические материалы (модульные блоки и учебные элементы), определяющие содержание и структуру учебного процесса, а также видеокомпьютерные анимации, раскрывающие сущность процессов, особенности выполнения которых сложно воспринимаются слушателями. В процессе их обсуждения отмечалось, что модульные технологии профессиональной подготовки, которые базируются на системном подходе к организации учебного процесса, комплексном методическом обеспечении и эффективном контроле изученного учебного материала, дают возможность своевременно реагировать на смену производственных требований к профессиональной компетентности сварщиков и обеспечивают непрерывность обучения.

Затем состоялось пленарное заседание, которое открыл Президент Национальной академии наук Украины академик Б. Е. Патон, отметивший важность и актуальность данного совещания. Эффективность современного производства в условиях высококонкурентного рынка в значительной мере определяется качеством профессиональной подготовки персонала. Высококвалифицированная рабочая сила является одним из основных факторов повышения эффективности производства и обеспечения качества продукции. Наличие на предприятиях профессионально-компетентного персонала определяет их способность реализовать новейшие достижения науки и техники. Профессиональная подготовка такого персонала требует новых подходов в организации обучения, применении современных и эффективных технологий обучения. С этой целью специалистами ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины при участии Института профессионально-технического образования Национальной академии педагогических наук при поддержке Конфедерации работодателей и Общества сварщиков Украины в рамках проекта Международной организации труда «Внедрение гибких программ профессионального обучения для безработных» и украинско-немецкого

Во время работы семинара

проекта «Поддержка реформ Института профессионально-технического образования в Украине» была обоснована концепция широкопрофильной профессиональной подготовки квалифицированных рабочих в области сварки, разработана и приказом Министерства труда и Министерства социальной политики утверждена квалификационная характеристика на интегрированную профессию «Сварщик». На ее основе совместно с Департаментом профессионально-технического образования подготовлен государственный стандарт профессионально-технического образования, который 20 мая этого года утвержден Министерством образования и науки, молодежи и спорта по согласованию с Министерством социальной политики.

Содержание стандарта, критерии оценки и система подтверждения профессиональной компетентности отвечают международным требованиям к профессиональной подготовке сварщиков, которая обеспечит признание на международном уровне присвоенных в Украине квалификаций.

Презентуя государственный стандарт профессионально-технического образования по профессии «Сварщик», директор Межотраслевого учебно-аттестационного центра ИЭС им. Е. О. Патона П. П. Проценко отметил, что главной проблемой действующей в Украине системы профессиональной подготовки квалифицированных рабочих в области сварки являются несоответствия между характером производственных заданий, которые выполняет сварщик на рабочем месте, и содержанием профессионального обучения. Устранение указанных несоответствий вызвало необходимость в разработке межотраслевой квалификационной характеристики на интегрированную профессию «Сварщик». На ее основе был разработан государственный стандарт профессионально-технического образования по этой профессии. Целью стандарта является реализация единой политики в сфере профессионально-технического образования, устранение содержательных и терминологических отличий в подготовке конкурентоспособного на рынке труда квалифицированного рабочего по профессии «Сварщик» и обеспечение признания квалификации и документов о полученной профессиональной подготовке на национальном и международном уровнях.

Стандарт определяет общие требования к содержанию профессионально-технического образования, образовательного уровня поступающего и уровня профессиональной квалификации выпускника профессионально-технического учебного заведения, устанавливает основные положения, которыми нужно руководствоваться при организации профессиональной подготовки квалифицированных рабочих по интегрированной профессии «Сварщик», включающей четыре специализации:

ручная дуговая сварка покрытыми электродами;

механизированная дуговая сварка плавящимся металлическим электродом;

ручная дуговая сварка неплавящимся металлическим электродом в инертных газах;

газовая сварка и три уровня квалификации — I, II, III.

Структура стандарта предусматривает, что вся образовательно-профессиональная программа теоретического и практического обучения является целостным и неразрывным процессом, направленным на формирование запланированного уровня квалификации. Квалификационная аттестация осуществляется как по завершению полного курса обучения, так и на промежуточных этапах. По результатам квалификационной аттестации ученикам (слушателям), которые по определенным причинам прекращают обучение, присваивается квалификация первого или второго уровня по соответствующей специализации.

Важной частью стандарта профессиональной компетентности является оценка способности сварщика выполнять определенные производственные задачи, которая проводится в виде квалификационной аттестации (сертификации). Оценочные критерии базируются на требованиях, действующих на производстве стандартов по аттестационным испытаниям сварщиков.

При изменении технологической сложности работ по сварке трудовые функции в рамках конкретных видов работ пополняются более сложными элементами, вследствие чего расширяется поле профессиональной деятельности, а это в свою очередь вызывает необходимость в расширении профессиональной компетентности сварщика (повышении квалификации). Таким образом, на базе стандарта может формироваться система непрерывного профессионального обучения, переподготовки, повышения квалификации и аттестации сварщиков.

Выступавшие министр образования и науки, молодежи и спорта Д. В. Табачник, Президент Национальной академии педагогических наук В. Г. Кремень, директор Государственного центра занятости В. М. Галицкий и Вице-президент Конфедерации работодателей А. В. Мирошниченко дали высокую оценку представленному стандарту и отметили, что его внедрение будет способствовать повышению качества профессиональной подготовки и мобильности сварщиков, являться стимулом для их дальнейшего профессионального развития, создаст условия для эффективного функционирования независимой системы оценки профессиональной компетентности и даст возможность работодателям определять соответствие уровня профессиональной подготовки сварщика требованиям рабочего места, что в свою очередь обеспечит повышение конкурентоспособности отечественного сварочного производства.

П. П. Проценко, канд. техн. наук

УДК 621.791:061.2/.4

СОЗДАНИЕ КИТАЙСКО-УКРАИНСКОГО ИНСТИТУТА СВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА

С целью расширения и повышения эффективности международного научно-технического сотрудничества Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ИЭС) выступил учредителем Китайско-украинского института сварки им. Е. О. Патона (КУИС).

Он создан при поддержке Министерства науки и техники КНР, Национальной академии наук Украины, а также Государственного агентства по вопросам науки, инноваций и информации Украины.

Целью КУИС является выполнение совместных научно-технологических работ по созданию современных сварочных и родственных технологий и оборудования на основе инновационных научно-технических разработок ИЭС им. Е. О. Патона, внедрении их на промышленных предприятиях КНР и организации совместных производств.

С китайской стороны в создании КУИС участвовали Гуандунский Генеральный научно-исследовательский институт промышленных технологий и Департамент науки и техники Правительства провинции Гуандун. Соглашение об этом между ними и ИЭС им. Е. О. Патона подписано 24 февраля 2011 г. Учреждение КУИС оформлено также рядом документов в государственных структурах КНР. Ему было присвоено имя основателя Института электросварки в Украине — Е. О. Патона.

В настоящее время организация и деятельность Китайско-украинского института сварки им. Е. О. Патона выведена на уровень межправительственных отношений между Украиной и КНР. Так, в рамках государственного визита в Украину главы Китайской Народной Республики (КНР) Ху Цзиньтао 8–20 июня 2011 г. создание совместного института стало одним из итогов развития отношений стратегического партнерства между Украиной и КНР.

Торжественное подписание соглашения о создании Китайско-украинского института сварки им. Е.О.Патона: *в центре* — директор Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ академик Б. Е. Патон; *справа* — заместитель Генерального директора Департамента науки и техники Правительства провинции Гуандун (КНР) Гон Го-пин (Gong Guo Ping); *слева* — директор Гуандунского Генерального научно-исследовательского института промышленных технологий (КНР)) Цю Сянь-янь (Qiu Xianyang)

Намечены следующие основные направления деятельности КУИС:

- современное сварочное оборудование;
- перспективные сварочные материалы;
- технологии механизированной и автоматической сварки;
- перспективные технологии инженерии поверхности (нанесения покрытий) и обработки материалов;
- ремонтно-сварочные технологии;
- фундаментальные исследования в области металлургии дуговой сварки и специальной электрометаллургии, прочности и продления ресурса сварных конструкций, математическое моделирование сварочных и родственных процессов;
- материалы и технологии для низко- и высокотемпературной пайки;
- инструменты и оборудование для сварки в медицине;
- электродуговые и плазменные технологии и оборудование для обработки материалов и экологически чистой переработки отходов, в том числе с получением альтернативных сырьевых ресурсов и энергоносителей;
- неразрушающие методы контроля и технической диагностики, создание центра по неразрушающему контролю сварных соединений и аттестации технологий сварки;
- технологический аудит сварочного производства и научно-техническое сопровождение изготовления сварных конструкций;
- подготовка персонала и научно-технических кадров.

Территориально КУИС им. Е. О. Патона размещен в Гуанчжоу провинции Гуандун на базе Гуандунского Генерального научно-исследовательского института промышленных технологий. Для выполнения задач данный институт предоставляет офисные, лабораторные и производственные помещения и земельные участки.

В рамках деятельности совместного института между его учасниками обязанности распределены

следующим образом: китайская сторона обеспечивает финансирование деятельности КУИС, включая приобретение научного, технологического и оборудования, заработную плату персонала и другие расходы, а также содействует применению совместных научно-технических разработок на промышленных предприятиях КНР и других стран; украинская сторона формирует программу деятельности КУИС, участвует в разработках по совместным проектам, направляет специалистов и экспертов для выполнения данных научно-технических проектов.

Основные направления деятельности совместного института определяет совет КУИС в составе десяти человек. Почетными председателями совета являются с украинской стороны — Президент Национальной академии наук Украины академик Б. Е. Патон, с китайской — вице-министр Министерства науки и технологий Китая господин Cao Jian-lin (Као Цзянь-лин). Текущую деятельность совместного института ведет дирекция. Директором с украинской стороны является руководитель отдела электротермических процессов обработки материалов ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины доктор технических наук В. Н. Коржик, с китайской стороны — представитель Гуандунского Генерального научно-исследовательского института промышленных технологий доктор технических наук Yang Yongqiang (Янг Енцян).

Главный административный корпус Гуандунского Генерального научно-исследовательского института промышленных технологий

В настоящее время КУИС им. Е . О. Патона начал работу над первыми совместными проектами в области разработки новых технологий и оборудования для сварки и наплавки крупногабаритных конструкций энергетического оборудования, создания и получения новых сварочных материалов (порошковых проволок и порошков), контактной стыковой сварки оплавлением, новых плазменных и лазерных технологий.

В. Н. Коржик, д-р техн. наук

УДК 621.791:061.2/.4

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО СВАРОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ СТРАН СНГ

6–10 июня 2011 г. в пос. Агой Краснодарского края состоялась VI Международная конференция «Сварочные материалы. Дуговая сварка. Производство. Качество». Организаторами конференции выступили Ассоциация «Электрод» предприятий стран СНГ и ООО НПЦ «Сварочные материалы» (г. Краснодар). В работе конференции приняли участие 69 специалистов-производственников и ученых, представляющих 48 предприятий и организаций России, Украины, Казахстана, Беларуси и Литвы. Среди них ряд известных производителей сварочных материалов — «ОЗСМ ИЭС им. Е. О. Патона», ЗАО «Электродный завод» (г. С.-Петербург), ОАО ММК «Метиз» (г. Днепропетровск), ПАО «Плазма-Тек» (г. Винница) и др., институтов — ИЭС им. Е. О. Патона, ФГУП «ЦНИИТ КМ «Прометей», НПО «ЦНИИТмаш», ОАО «НИИмонтаж» и др., производителей технологического оборудования — ООО «Велма», ООО «Ротекс».

Работу конференции открыл Президент ассоциации генеральный директор ЗАО «Свама» И. М. Лившиц. С вступительным словом к участникам конференции обратился генеральный директор ООО НПЦ «Сварочные материалы» В. М. Дзюба. Исполнительный директор Ассоциации «Электрод» П. В. Игнатченко зачитал участникам конференции приветствие академика Б. Е. Патона. Программа конференции включала 52 доклада и сообщения. Большая часть докладов вошла в сборник, который вышел накануне конференции. Значительная часть докладов была посвящена вопросам разработки покрытых электродов и технологии их изготовления. В докладах нашли отражение также проблемы разработки, производства и применения проволок сплошного сечения, порошковых проволок, ленточных электродов и флюсов для механизированной дуговой сварки и наплавки, вопросы совершенствования технологического оборудования для производства покрытых электродов, особенности влияния свойств сырья на технологические и металлургические свойства наплавленного металла, возможность

использования наноразмерных частиц при производстве сварочных материалов.

Многие выступления вызвали оживленную дискуссию участников. После обмена мнениями было принято совместное решение, которое содержит практические рекомендации для достижения большей эффективности работы предприятий в сфере производства сварочных материалов.

П. В. Игнатченко, инж.

УДК 621.791:061.2/.4

12-я ВСЕМИРНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ТИТАНУ «Ti–2011»

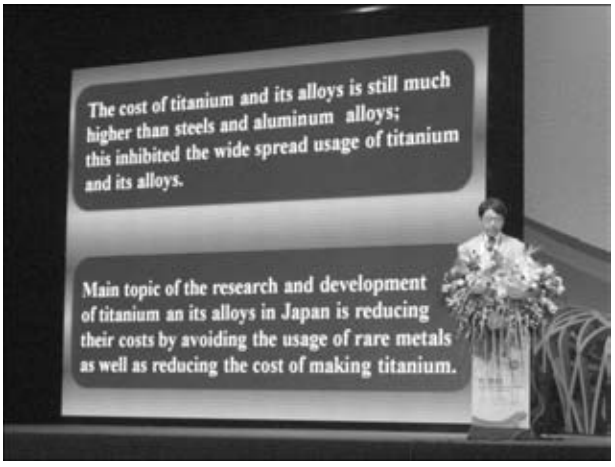
Всемирная конференция по титану впервые была проведена в Лондоне в 1968 г. С тех пор она проходила в Бостоне (1972), Москве (1976), Киото (1980, 2007), Мюнхене (1984), Каннах (1988), Сан Диего (1992), Бирмингеме (1995), Санкт-Петербурге (1999), Гамбурге (2003). Очередная, 12-я Всемирная конференция по титану прошла 19–24 июня 2011 г. в Пекине. В ней приняли участие более 1000 участников из 33 стран, в том числе из Китая (407 человек), Японии (102), Франции (54), США (47), Великобритании (42), России (35), Германии (29), Австралии (26), Украины (13).

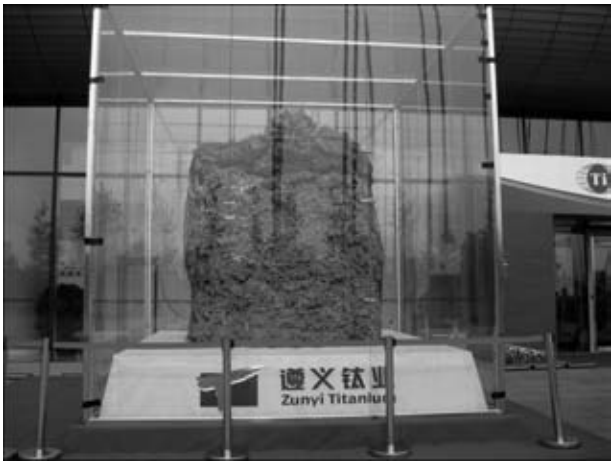
С пленарными докладами на конференции выступили представители Великобритании, США, СНГ, Японии, Германии, Франции и Китая. Судя по выступлениям на пленарном заседании титановая отрасль полностью преодолела кризис, что подтверждается непрерывно растущими объемами производства и ценами на титановую продукцию. Так, на рынке Китая с января по май 2011 г. цена губчатого титана возросла с 6,1 до 11,8 дол. США/кг, а цена титановых слитков — с 7,7 до 12,5 дол. США/кг. Особо следует отметить бурно растущий рынок Китая. В настоящее время Китай является крупнейшим в мире производителем титана и изделий из него. На выставке «Пекин ЭКСПО», которая проходила параллельно с работой конференции, была представлена высококачественная титановая продукция высокого передела (лист, пруток, трубы, проволока) более чем 40 китайских предприятий.

Работа конференции проходила в 12 секциях: металлургия титана; обработка титана давлением; микроструктура титановых сплавов; свойства титановых сплавов; интерметаллиды и композиты; изготовление узлов и изделий из титана; литейные и порошковые технологии; взаимодействие титана с окружающей средой; аэрокосмическое применение титана; применение титана в медицине; новые рынки для титана; применение титана в судостроении.

Анализ содержания всех представленных на конференции докладов показывает, что основные направления научно-исследовательских работ в титановой отрасли сопряжены с поиском путей удешевления титановой продукции. В металлургии титана — это создание новых более экономически эффективных способов производства губчатого титана, а также разработка и применение технологии электронно-лучевой плавки титана с промежуточной емкостью. В деформационной обработке титана — разработка теории и практики ступенчатой изотермической прессовки деталей сложной формы с минимальными припусками. При разработке новых титановых сплавов основное внимание уделяется не только повышению их эксплуатационных характеристик, но и снижению стоимости за счет применения более дешевых легирующих компонентов.

Большое внимание на конференции уделялось вопросам изучения возможностей литейных и порошковых технологий для снижения стоимости изготовления изделий из титановых сплавов, а также совершенствованию различных технологий сварки





(аргоно-дуговая, электронно-лучевая, лазерная и др.) с целью повышения их технико-экономической эффективности. В связи с этим следует отметить значительный интерес к докладу представителей Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ Б. Е. Патона, С. В. Ахонина, В. П. Прилуцкого «Развитие технологий сварки титана при изготовлении сварных узлов и изделий».

Следует отметить, что на конференции большое количество докладов было посвящено вопросам создания и разработки технологий обработки сплавов на основе алюминидов титана, которые являются перспективными материалами для авиастроения и могут эксплуатироваться при повышенных температурах (до 700 ^{o}C и более).

Анализ различных областей применения титана показал, что основными отраслями потребления титановой продукции продолжают оставаться военное и гражданское самолетостроение, а также энергетическое и химическое машиностроение. Например, в гражданских самолетах нового поколения («Boing 787», «AERBUS 350») доля титана в общей массе планера и двигателей увеличилась до 15 %, а при строительстве одного блока АЭС мощностью 1 ГВт требуется до 320 т титановых полуфабрикатов. Наряду с этим в настоящее время наблюдается увеличение использования титана в области производства перспективных видов вооружений (артиллерия, военно-морской флот и т. д.), строительстве (в качестве примера можно привести опорные колонны расположенной в море взлетно-посадочной полосы Токийского аэропорта), изготовлении спортивного инвентаря, а также в производстве имплантов, эндопротезов и другой медицинской техники.

Согласно решению Международного организационного комитета следующая 13-я Мировая конференция по титану пройдет в Сан Диего, США в 2015 г.

С. В. Ахонин, д-р техн. наук

УДК 621.791:061.2/.4

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ В НИЖНЕМ ТАГИЛЕ

23–24 июня 2011 г. в Нижнем Тагиле Свердловской области состоялась Международная научно-техническая конференция на тему «Состояние и перспективы развития сборочно-сварочного производства», посвященная 75-летию сварочного производства ОАО «НПК «Уралвагонзавод». В ее работе приняли участие более 50-ти ученых, преподавателей, инженеров, специалистов НИИ, предприятий и организаций из России, Украины и Германии.

Открывая конференцию, главный сварщик ОАО «НПК «Уралвагонзавод» А. В. Масалков коротко изложил историю развития сварочного производства на заводе, особо отметив, что существенный вклад в этот процесс внес ИЭС им. Е. О. Патона, а также охарактеризовал основные направления работ, которые проводит служба главного сварщика и другие подразделения завода с целью повышения эффективности производства, производительности труда и качества выпускаемой продукции. После этого с приветственным словом к участникам конференции и поздравлениями в адрес коллектива сварщиков ОАО «НПК «Уралвагонзавод» от лица Б. Е. Патона обратился академик НАН Украины Л. М. Лобанов.

На конференции были рассмотрены вопросы, касающиеся как технологических процессов сварки и наплавки металлоконструкций, сварочного и вспомогательного оборудования, предназначенного для реализации этих процессов, так и вопросы численного моделирования в области сварки и резки, а также нормативно-технического обеспечения сварочного производства.

С научными докладами на конференции выступили представители ИЭС им. Е. О. Патона, Института физики металлов УрО РАН, Уральского федерального университета им. Б. Н. Ельцина, Омского государственного технического университета,

«ЦНИИМ» (г. Санкт-Петербург), НПО ЦНИИТмаш, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ОАО «ВНИИЖТ», представители компаний «Messer Cutting & Welding», «LORCH», ESAB, «Шторм» и др.

Особый интерес у участников конференции вызвал доклад Л. М. Лобанова, в котором он рассказал о современных исследованиях и разработках ИЭС им. Е. О. Патона в области сварки и прочности конструкций. В выступлении, в частности, было отмечено, что поскольку дуговая сварка остается основой сварочного производства, то в институте получили дальнейшее развитие исследования, направленные на углубление знаний в области физики дугового разряда, управления плавлением и переносом электродного металла, металлургии и металловедения сварки, компьютерного моделирования теплофизических, металлургических и термодеформационных процессов. Эти фундаментальные исследования послужили научной основой технологий новых сталей и сплавов на основе алюминия, титана, меди и других металлов.

Заинтересованность участников конференции вызвали доклады, посвященные сварочным технологиям: «Техника MIG/MAG сварки вертикальных швов — SPEEDUP» (ООО «Шторм», г. Екатеринбург), «Высокая производительность и отличное качество MIG\MAG сварки» («LORCH», Германия), «Разработки ОАО «ЦНИИМ» в области сварочных технологий и газотермического напыления» (ОАО «ЦНИИМ», г. Санкт-Петербург), «Пути совершенствования технологии сварки корпусов спецтехники» (ОАО «Уралтрансмаш», г. Екатеринбург).

Ряд представленных на конференции докладов был посвящен современным материалам и технологиям наплавки металлических конструкций. Наибольший интерес среди них вызвали доклады на тему «Порошковая проволока для наплавки инструментов горячего деформирования» (Омский государственный технический университет), а также «Технологии износостойкой наплавки литых деталей грузовых вагонов» (ОАО ВНИИЖТ», г. Москва).

Проблемы ремонтно-сварочных технологий нашли отражение в докладах «Вероятность образования холодных трещин в соединениях высокопрочных сталей при сварке в жестком контуре» (ИЭС им. Е. О. Патона, г. Киев, Украина), «Информационные технологии ремонтной сварки конструкций индивидуального тяжелого машиностроения» (Уральский федеральный университет им. Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург), «Применение ионно-плазменного напыления для восстановления изношенных поверхностей плунжерных пар топливного насоса» (ОАО Омский научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей).

Среди докладов, посвященных разработке и применению современного оборудования для разделительной резки металлов, особый интерес у участников конференции вызвал доклад «Новое оборудование для термической резки фирмы «Мессер» («Автоген, плазма, лазер. Какой из способов резки наиболее приемлемый»). В нем сделан детальный сравнительный анализ преимуществ и недостатков этих способов резки. Проанализировав стоимость оборудования, его технические характеристики, функциональные возможности, авторы пришли к заключению, что автогенную резку целесообразно использовать при раскрое металла больших толщин и в том случае, когда к качеству и скорости реза не предъявляются высокие требования. Плазму целесообразно применять при резке металла малых и средних толщин, когда к качеству реза предъявляются повышенные требования, а лазер — при резке металла очень малой толщины с очень высокими требованиями к качеству реза. Живой интерес вызвали также доклады «Новые разработки компании ESAB в автоматизации заготовительного производства» и «Новое поколение автоматизированного оборудования для аргонодуговой сварки» (ООО НПО «Электросварочное оборудование», г. Санкт-Петербург).

Целый ряд представленных на конференции докладов касались вопросов вагоностроения. Изысканию и исследованию свариваемости высокопрочных сталей для вагонов нового поколения посвящен доклад на тему «Сталь 10Г2ФБ для грузовых вагонов нового поколения» (ИЭС им. Е. О. Патона). Заинтересованность и оживленное обсуждение вызвал также доклад «Задачи координации в сварке конструкций подвижного состава железных дорог» (ОАО ВНИИЖТ», г. Москва).

После завершения пленарных заседаний участники конференции посетили музей истории ОАО «НПК «Уралвагонзавод», где с большим интересом ознакомились с бережно хранящимися здесь экспонатами, многие из которых являются уникальными. На протяжении экскурсии неоднократно отмечалось, что неоценимый вклад в развитие сварочного производства завода внесли специалисты ИЭС им. Е. О. Патона, тесное сотрудничество с которым началось еще в довоенные годы, а затем укрепилось в суровые дни Великой Отечественной войны.

Подводя итоги, участники конференции отметили ее актуальность и полезность для дальнейшего развития техники, технологий, материалов и оборудования сварочного производства и родственных ему процессов.

В. Д. Позняков, д-р техн. наук

УДК 621.791:061.2/.4

ЕЖЕГОДНАЯ АССАМБЛЕЯ МИС

17–23 июля 2011 г. в Ченнай (Мадрас), Индия, был проведен ряд мероприятий под руководством Международного института сварки: 64-я Ежегодная ассамблея, Международная конференция «Мировые тенденции развития технологии сварки, резки и обработки поверхности» и 6-я Международная выставка «Weld India–2011». Организатором выступил Институт сварки Индии, представляющий свою страну в МИС, совместно с туристической компанией «KW Tourism». Город Ченнай, являющийся столицей штата Тамил Наду, расположен на берегу Бенгальского залива. Он относительно молод и насчитывает лишь 370 лет. Это четвертый по населению (после Мумбаи, Дели и Калькутты) крупный город в стране. Он известен благодаря многочисленным индуистским храмам, национальному крокодильему заповеднику и одной из трех в мире католических церквей, где находятся могилы апостолов Христовых. В Ченнай расположен третий по величине в Индии выставочный центр, ставший одним из мест проведения международных мероприятий этого года: в нем проходили заседания секций конференции и выставка. Собрания комиссий и рабочих групп МИСа, а также церемония открытия и традиционная Индийская ночь проходили в гостиницах «Le Royal Meridien» и «Hilton».

Ассамблея 2011 г. не может похвастаться большим количеством участников и делегаций, по сравнению с прошлогодней, проходившей в Стамбуле. География съезда нынешнего года охватывала 41 страну (в 2010 г. делегации прибыли из 48 стран), а общее количество участников составило около 650 (в 2010 г. их было более 900), из них более 200 принимали участие только в конференции. Наиболее многочисленные делегации в нынешнем году прибыли из Германии (более 70), Японии (около 60) и Индии. Следует отметить, что количество участников ассамблеи и конференции от Индии составило более 200 человек. Количество компаний-участников выставки значительно увеличилось по сравнению с предыдущим годом. В 2011 г. на международной выставке было представлено 165 экспозиций из Индии, США, Китая, Великобритании, Японии, Нидерландов и Сингапура.

В 2011 г. в состав участников МИСа сварки вошли Перу и Казахстан, таким образом, на сегодня общее количество стран в организации составляет 55.

В ходе Генеральной ассамблеи МИС, которая состоялась 17 июля, было объявлено о кадровых изменениях в различных подразделениях организации. С нынешнего года президентом МИС стал профессор Балдев Радж (Индия). Предыдущий президент Ульрих Дилтай (Германия) в течение последующих трех лет будет занимать пост председателя IAB (Международной комиссии по аккредитации), а Кристоф Визнер (Великобритания) занял пост председателя TMB (Комиссии по техническим вопросам). В связи с окончанием сроков членства существенно изменился состав совета директоров. С 2011 г. Украина более не имеет своего представителя в нем. Национальным делегациям были вручены сертификаты, подтверждающие членство организаций в МИС.

Во время торжественного открытия ассамблеи состоялось вручение международных премий ряду ученых за наиболее выдающиеся работы в области сварки и родственных технологий. В этом году награды были вручены в следующих номинациях:

- технология производства и соединения (награда Анри Граньона категории А);
- свойства и свариваемость материалов (награда Анри Граньона категории В);

- проектирование и технологичность конструкций (награда Анри Граньона категории С);
- награда за инновации в области программного обеспечения (награда Хайнца Соссенхаймера);
- фундаментальные исследования в области сварки и родственных технологий (награда Йошиаки Арата);
- разработка и усовершенствование стандартов в области сварки (медаль Томаса);
- за активную работу в рамках проектов МИСа (награда Артура Смита);
- за личный вклад в развитие сварочных и родственных технологий (награда Евгения Патона).

В 2011 г. награда Евгения Патона была присуждена проф. Вольфгангу Фрике (Германия) за фундаментальные исследования в области изучения усталостной прочности сварных конструкций. Награду от имени МИСа и Национального комитета по сварке Украины вручила Е. П. Чвертко.

Первые дни ассамблеи были посвящены заседаниям комиссий, рабочих групп и других подразделений МИСа. Делегация Украины приняла участие в работе комиссии С-XIV «Обучение и подготовка кадров», исследовательской группы SG-RES «Исследования, стратегии развития и сотрудничество в области сварки» (в 2011 г. в рамках заседания группы был проведен семинар, посвященный использованию нанотехнологий в сварке, пайке и обработке поверхностей), а также в работе групп IAB.

21–22 июля в рамках работы ассамблеи была проведена конференция «Мировые тенденции развития технологии сварки, резки и обработки поверхности». Конференция состояла из 24 сессий (это в два раза больше, чем в 2010 г.), на которых было представлено 140 докладов, из них 27 стендовых. Ключевой доклад конференции на тему «Проблемы свариваемости новых материалов» сделал профессор Дж. Липпольд (главный редактор журнала «Welding in the World»).

Участникам и гостям ассамблеи была предложена обширная культурная программа — ряд туристических маршрутов как в городе Ченнай, так и за его пределами. В перечне технических визитов были: Институт металлургии и машиностроения Ченнай (крупнейший исследовательский институт штата), компании «ESAB India» (представительство мирового лидера по производству сварочного оборудования и материалов), «Ford India» (представительство одной из крупнейших в мире автомобилестроительных компаний), Ador Welding (компания–производитель сварочных материалов), «Wheels India» (компания–производитель колес для различных видов транспорта).

На торжественной церемонии закрытия ассамблеи Е. П. Чвертко вручила неофициальную награду «Мисс МИС» представительнице Центра исследований в области атомной физики им. Индиры Ганди Г. Сашикала — титановую розу, изготовленную мастером производственного обучения МУАЦ ИЭС им. Е. О. Патона Г. Г. Дочкиным.

В целом участие Украины в работе 64-й ассамблеи МИС следует признать успешным. Очередная ассамблея состоится 8–13 июля 2012 г. в Денвере (Колорадо, США).

Е. П. Чвертко, инж.

УДК 621.791:061.2/.4

VIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНКУРС СВАРЩИКОВ В УКРАИНЕ

С 15 по 19 августа 2011 г. в Одессе состоялся ежегодный VIII Международный конкурс профессионального мастерства сварщиков. Организатор конкурса — Общество сварщиков Украины (ОСУ). Председатель оргкомитета — вице-президент ОСУ д-р техн. наук А. А. Кайдалов, зам. председателя — председатель правления Одесского областного отделения ОСУ А. Н. Воробьев. Конкурс проходил на учебно-аттестационной базе ОИАЦ «Прометей» по следующим номинациям: ручная дуговая сварка покрытым электродом (метод 111), дуговая сварка плавящимся электродом в активных газах (метод 135), дуговая сварка вольфрамовым электродом в инертных газах (метод 141). В конкурсе приняли участие сварщики из Украины, Республики Беларусь, Российской Федерации и Литовской Республики — всего 34 сварщика из 21 предприятия. Председатель жюри конкурса — председатель Украинского аттестационного комитета по сварке канд. техн. наук В. Т. Котик.

Финансово-материальную поддержку конкурсу оказали такие предприятия и фирмы: ОАО «Одесский припортовый завод», ПАО «Азот» (г. Черкассы), НПЦ «Сварка» (г. Одесса), ООО «Фрониус Украина» (Киевская обл.), ООО «Бинцель Украина» (г. Киев), ООО НПФ «Сварконтакт» (г. Харьков), ООО «АРКСЭЛ» (г. Донецк), завод автогенного оборудования «ДОНМЕТ» (г. Краматорск). Призы победителям, призерам и дипломантам конкурса предоставили следующие фирмы и организации: ООО «Фрониус Украина» (Киевская обл.), МЧП «Далет» (г. Одесса), ООО НПФ «Сварконтакт» (г. Харьков), ООО «3М Украина» (г. Киев), ООО «Бинцель Украина» (г. Киев), ООО «Эйр Ликвид

Велдинг Украина» (г. Харьков), завод автогенного оборудования «ДОНМЕТ» (г. Краматорск), фирма «Плазмотехнология» (г. Одесса).

Конкурсанты состязались как в выполнении практических заданий по сварке стальных пластин и труб, так и в знании теории, нормативных положений и техники безопасности.

Победители и призеры конкурса:

Номинация 111

1 место — Р. Г. Гарин (ООО «Карат», г. Ачинск, РФ),

2 место — А. М. Унтила (ООО «Хай-Рейз Констракшнз», г. Ильичевск, Украина),

3 место — А. В. Булыга (ОАО «Белтрансгаз», г. Минск, Республика Беларусь);

Номинация 135

1 место — С. А. Егоров (ООО «Хай-Рейз Констракшнз», г. Ильичевск, Украина),

2 место — С. Е. Смутило (ОАО «Крюковский вагоностроительный завод», г. Кременчуг, Украина),

3 место — М. В. Мина (ПАО «Кременчугский завод дорожных машин», г. Кременчуг, Украина);

Номинация 141

1 место — А. Н. Шепель (ПАО «Азот», г. Черкассы, Украина),

2 место — Р. Г. Гарин (ООО «Карат», г. Ачинск, РФ),

3 место — В. А. Супруненко (ЗАО «Новокраматорский машиностроительный завод», г. Краматорск, Украина).

По решению ОИАЦ «Прометей», за лучшее качество выполненных сварных швов награждены Международным сертификатом «Bureau Veritas» сварщики: Шигалев К. П. (ОАО «Белоруснефть-Сейсмотехника», г. Гомель, Республика Беларусь); Гарин Р. Г. (ООО «Карат», г. Ачинск, РФ); Егоров С. А. (ООО «Хай-Рейз Констракшнз», г. Ильичевск, Украина).

За лучшее качество сварного шва из всех трех номинаций по решению жюри награжден сварочной маской типа «Хамелеон» с индивидуальной аэрографией «ТЗУ» конкурсант в *номинации 141* К. П. Шигалев (ОАО «Белоруснефть-Сейсмотехника», г. Гомель, Республика Беларусь).

На техническом семинаре для конкурсантов и гостей конкурса были представлены подробные доклады о сварочных масках (ООО «3М Украина»), сварочных горелках (ООО «Бинцель Украина») и инверторных источниках питания для дуговой сварки (ООО НПФ «Сварконтакт»).

Для сопровождающих конкурсантов лиц и гостей конкурса были организованы экскурсия по Одессе и катание на яхте.

Подготовка и проведение конкурса прошли на хорошем уровне. Работа конкурса освещалось местным телевидением. Информация о конкурсе дана также на сайте Одесского областного отделения Общества сварщиков Украины www.tzu.od.ua.

Следующий конкурс сварщиков состоится в августе 2012 г.

А. А. Кайдалов, д-р техн. наук,
вице-президент Общества сварщиков Украины

В. Н. Липодаеву — 70

Исполнилось 70 лет видному специалисту в области сварки высоколегированных сталей и сплавов, доктору технических наук, ведущему научному сотруднику ИЭС им. Е. О. Патона Владимиру Николаевичу Липодаеву.

После окончания Киевского политехнического института в 1966 г. В. Н. Липодаев был направлен в Институт электросварки им. Е. О. Патона, где прошел путь от инженера до заведующего научным отделом, а затем ведущего научного сотрудника.

Свою трудовую деятельность в институте Владимир Николаевич начал в лаборатории (позже отделе) металлургии и технологии сварки высоколегированных сталей и сплавов, руководимым известным ученым Н. И. Каховским. Им были изучены металлургические особенности сварки особонизкоуглеродистых коррозионностойких сталей, разработан ряд марок покрытых электродов для их сварки, освоено производство и внедрение электродов на крупных заводах химического машиностроения.

В 1973 г. В. Н. Липодаев защитил кандидатскую диссертацию. В 1977 г. ему присвоено ученое звание «Старший научный сотрудник».

В последующие годы работы в институте В. Н. Липодаевым был выполнен ряд оригинальных разработок: предложена технология сварки стабильноаустенитных сплавов с использованием композитного металла шва и разработаны соответствующие сварочные материалы (покрытые электроды и порошковая проволока); разработаны экономнолегированные материалы для сварки без подогрева закаливающихся высокоуглеродистых металлов и разнородных сталей для производства горно-шахтного оборудования; отработаны принципы модифицирования нитридами хромистых ферритных коррозионностойких сталей с целью улучшения их

свариваемости; разработана гамма материалов, ряд способов и технологических процессов сварки высоколегированных сталей и сплавов различных типов легирования, позволяющих повысить коррозионную стойкость химической аппаратуры; выявлена либо уточнена природа локальных видов коррозии в средах высокой агрессивности; обоснованы общие принципы легирования и регулирования примесного состава высоколегированных конструкционных сталей и металла швов, принципы построения электродных покрытий, керамических флюсов и порошковых проволок. Ряд разработок отмечен медалями ВДНХ СССР.

В 1987 г. В. Н. Липодаев защитил докторскую диссертацию. В течение 1988–1992 гг. он руководил научным отделом физико-металлургических процессов сварки среднелегированных высокопрочных сталей. С 1992 г. В. Н. Липодаев является заместителем главного редактора журнала «Автоматическая сварка», ведущего ежемесячного издания ИЭС им. Е. О. Патона. С его непосредственным участием реализован ряд новаций, направленных на сохранение высокого имиджа журнала, его популяризацию и актуализацию с учетом современных требований.

Труд В. Н. Липодаева отмечен Почетной грамотой НАН Украины.

В. Н. Липодаев — автор свыше 160 научных работ, в том числе 2 монографий и около 80 авторских свидетельств на изобретения.

Искреннее признание коллег и друзей юбиляр заслужил благодаря своему высокому профессионализму, неиссякаемой деловой и творческой энергии, порядочности и доброжелательности.

В. М. Нестеренкову — 60

В сентябре исполнилось 60 лет доктору технических наук Владимиру Михайловичу Нестеренкову, лауреату Государственной премии Украины в области науки и техники, специалисту по технологии и оборудованию электронно-лучевой сварки, заместителю заведующего отделом Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

Основные направления научных исследований — развитие теоретических представлений о формировании швов при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) металлов большой толщины, определение критериев устойчивости сварочной ванны и разработка основ промышленной технологии ЭЛС крупногабаритных изделий ответственного назначения. На этой основе были созданы технологические процессы ЭЛС ряда низколегированных сталей толщиной до 150 мм и алюминиевых сплавов толщиной до 300 мм, что нашло промышленное применение в ряде стран. В частности, для фирмы «Framatome» (Франция) были разработаны технологические процессы ЭЛС кольцевых стыков низколегированной стали 2,25CrlMo толщиной 150 мм с замыканием шва для соединения корпусных конструкций, а также технология ЭЛС сплава AG5M толщиной 290 мм для сварки лепестков зеркал телескопов диаметром 8 м и оборудование для реализации этих технологий. Для ряда машиностроительных предприятий Китая предложены технология и оборудование для ЭЛС кольцевых стыков с замыканием шва на корпусах запорной арматуры, которая производится из сталей 12CrMo, SA106B и SA299. Результаты разработок успешно применены при ЭЛС высокопрочных алюминиевых сплавов в международном проекте по созданию пассажирского аэробуса А-380.

Теоретические и практические аспекты работы, обеспечивающие устойчивость сварочной ванны при ЭЛС металлов большой толщины с замыканием кольцевых швов, реализованы в конструкции и алгоритмах работы десяти установок для ЭЛС, изготовленных в ИЭС им Е. О. Патона в 1998–2010 гг.

На основе использования результатов исследований были успешно завершены 20 контрактных работ с фирмами «Framatome», «Aerospatiale» (Франция), «Airbus» (Англия), HBC, WBC (Китай), «K+S Services», «Alcoa» (США), которые явились по сути промышленной проверкой выполненных разработок.

Сердечно поздравляем юбиляров, от всей души желаем им крепкого здоровья и бодрости, творческой энергии и новых достижений в развитии сварочной науки и сварочного производства.

НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ!

Коллектив Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, редколлегия и редакция журнала «Автоматическая сварка» горячо и сердечно поздравляют заместителя директора по научной работе, доктора технических наук, академика НАН Украины ***Сергея Ивановича Кучука-Яценко*** *с высокой государственной наградой*

УКАЗ

ПРЕЗИДЕНТА УКРАЇНИ № 845/2011

Про відзначення державними нагородами України з нагоди 20-річчя незалежності України

За значний особистий внесок у становлення незалежності України, утвердження її суверенітету та міжнародного авторитету, заслуги у державотворчій, соціально-економічній, науково-технічній, культурно-освітній діяльності, сумлінне та бездоганне служіння Українському народові **постановляю**:

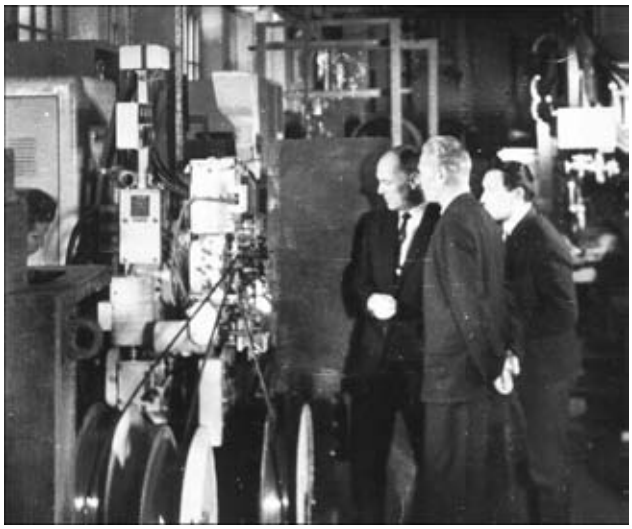
нагородити орденом князя Ярослава Мудрого IV ступеня **Кучука-Яценка Сергія Івановича** — заступника директора Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона, академіка НАН України, м. Київ.

Президент України Віктор ЯНУКОВИЧ

УЧЕНЫЙ, ИЗОБРЕТАТЕЛЬ, ИНЖЕНЕР-КОНСТРУКТОР
(к 100-летию со дня рождения Г. З. Волошкевича)

Трудовую деятельность Георгий Зосимович Волошкевич начал в восемнадцатилетнем возрасте электриком после окончания училища на предприятиях Житомира и Киева. После окончания в 1938 г. Киевского индустриального института (ныне НТУУ «Киевский политехнический институт») работал конструктором. С мая 1941 г. и до конца жизни его деятельность была неразрывно связана с Институтом электросварки. Он был одним из первых участников широкомасштабного внедрения автоматической сварки под флюсом в машиностроение, в производство и ремонт военной техники. Творческий талант, неординарное мышление, любовь к конструированию в полной мере раскрылись в первый послевоенный год, когда под руководством Е. О. Патона развернулись работы по внедрению автоматической сварки в различные отрасли восстанавливаемой промышленности страны. Сотрудников было мало и каждому из них приходилось заниматься проблемами конкретных заводов, а то и целых отраслей. Глубокие знания особенностей сварки под флюсом и конструкторский опыт пригодились Г. З. Волошкевичу при решении проблемы производства железнодорожных цистерн. Совместно с работниками Ма-

Георгий Зосимович за работой



У установки ЭШС (слева направо: Б. Е. Патон, Г. З. Волошкевич, И. И. Сущук-Слюсаренко)

риупольского завода им. Ильича, МИИТ и ЦНИИ МПС он разработал принципиально новую конструкцию котлов железнодорожных цистерн, отличающихся высокой технологичностью, и организовал поточную линию по их производству. В 1947 г. за эту работу Г. З. Волошкевичу и еще троим специалистам завода была присуждена Сталинская премия 1-й степени.

Новая задача, поставленная Е. О. Патоном, — разработать автоматическую сварку под флюсом вертикальных швов, была еще масштабнее и касалась значительно большего количества отраслей. Г. З. Волошкевич предложил технологию и устройства для подачи электродной проволоки и формирования шва. Впервые в 1948 г. на заводе «Запорожсталь» Г. З. Волошкевичем были сварены автоматом в монтажных условиях четыре пояса строящейся доменной печи (в том числе и вертикальные швы). В следующем году сотрудниками института совместно с работниками треста «Стальмонтаж» был сварен кожух доменной печи объемом 1050 м^3. Трудоемкость основных операций снизилась в 3 раза, повысился съем готовой продукции с единицы площади. Появилась возможность полностью автоматизировать сварку крупногабаритных пространственных конструкций. В последующие годы принудительное формирование применили при строительстве цельносварного моста через Днепр в Киеве и на других объектах.

Г. З. Волошкевич, продолжая усовершенствовать дуговую вертикальную сварку под флюсом, обнаружил, что при глубокой шлаковой ванне и при некоторых других невыясненных условиях дуговой процесс становился неустойчивым и даже прекращался, а шов продолжал формироваться. Оказалось, что при некоторых условиях электродная проволока, шлак и кромки стабильно и одновременно плавились за счет «джоулева» тепла, выделяющегося при прохождении тока через электрод и жидкий шлак. К решению проблем управления этими процессами приступил заведующий электротехническим отделом Б. Е. Патон. В 1949 г. в ИЭС был создан новый способ сварки — электрошлаковая сварка (ЭШС). Г. З. Волошкевич и Б. Е. Патон добились высокой стабильности процесса при сварке за один проход соединений значительной толщины. Б. Е. Патон доказал возможность саморегулирования процесса и разработал соответствующее оборудование. К началу 1950-х годов в ИЭС им. Е. О. Патона были развернуты систематические исследования физических и металлургических процессов, разработаны специальные флюсы, источники питания и аппараты, системы управления, методы учета и снижения ожидаемых напряжений и деформаций. В становление, развитие и широкое внедрение ЭШС творческий вклад внесли сотрудники лаборатории Г. З. Волошкевича: И. И. Сущук-Слюсаренко, В. М. Хрундже, И. И. Лычко и др. Кроме ЭШС сталей, другими специалистами института были разработаны технологии ЭШС алюминия, титана, меди и их сплавов.

Освоение технологий и совершенствование нового способа сварки осуществлялось в тесном взаимодействии с производственниками (И. Г. Гузенко, В. В. Черных, Л. П. Ерегин, И. Д. Давиденко, М. Г. Козулин, В. Г. Радченко и др.) Таганрогского завода «Красный котельщик», Барнаульского котельного завода, Новокраматорского машиностроительного завода им. И. В. Сталина, Ленинградского металлического завода и др., где патоновцы начали внедрять ЭШС.

Г. З. Волошкевича часто видели в цехах. В рабочей одежде он настраивал оборудование, корректировал технику сварки и тут же чертил эскизы новых аппаратов, создавал оригинальные приспособления. От этой работы Георгий Зосимович не отвлекался даже во время прихода высокого началь-

ства. Будучи человеком творческим одухотворенным он продолжал углублять научные исследования, раскрывал новые возможности и устранял недостатки ЭШС, им было опубликовано десятки статей и получено более 20 авторских свидетельств и патентов. Особого внимания заслуживают его работы по исследованию физической сущности процесса с принудительным формированием металла шва, используя при этом оригинальные методики: рентгенографическое исследование плавления электрода и переноса металла, принудительное перемещение свариваемых кромок; учет ожидаемых деформаций заготовок; стабилизацию процесса сварки путем изменения внешней характеристики источников питания, определение мокрого вылета электрода; дублирование сварочных аппаратов и др. Он дал токование основным параметрам режима сварки и определил взаимосвязь между ними, что позволило создавать технологии ЭШС крупногабаритных металлоконструкций, внес существенный вклад в создание сварочных аппаратов и установок.

Г. З. Волошкевич определил основные принципы конструирования и производства сварнолитых, прокатно-сварных и сварно-кованых заготовок на основе использования ЭШС. В 1963 г. он защитил докторскую диссертацию. Им подготовлены специалисты высшей квалификации как в институте, так и на многих предприятиях — от операторов-сварщиков до научных сотрудников, руководителей сварочного производства отдельных крупных предприятий тяжелого машиностроения и целых отраслей народного хозяйства. Г. З. Волошкевич был награжден двумя орденами «Знак Почета» и медалями. В 1957 г. «За создание и внедрение в тяжелое машиностроение электрошлаковой сварки» Г. З. Волошкевичу в соавторстве с Б. Е. Патоном, И. Г. Гузенко, И. Д. Давиденко и В. Г. Радченко была присуждена Ленинская премия.

Разработка ЭШС была отмечена Гран-при на Всемирной выставке в Брюсселе в 1958 г.

Светлая память о Георгии Зосимовиче, замечательном человеке, ученом, изобретателе, инженере-конструкторе, сохранится в сердцах всех, кто его знал и кто с ним работал.

1 августа в честь 100-летнего юбилея со дня рождения Г. С. Волошкевича совместным решением НАН Украины, ИЭС им. Е. О. Патона и ПАО «НКМЗ» участку ЭШС изделий большой толщины ПАО «НКМЗ» присвоено имя Георгия Зосимовича Волошкевича.

СВАРКА И РЕЗКА
12-я международная специализированная выставка

20–23 марта 2012 г. Минск

Тематика экспозиций

- Материалы для сварки, наплавки и пайки
- Оборудование и технологии сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки
- Источники питания и системы управления сварочным оборудованием
- Оборудование для орбитальной сварки и обработки труб
- Электронно-лучевая, лазерная, плазменная сварка и резка
- Автоматизированные комплексные системы и агрегаты для сварки и резки
- Автоматизация сварочных производственных и технологических процессов, программное обеспечение
- Приборы для неразрушающего контроля сварных соединений
- Научное и информационное обеспечение сварки
- Система подготовки, переподготовки и аттестации сварщиков
- Охрана труда и экологическая безопасность в сварочном производстве
- Сертификация сварочного оборудования.

Выставка проводится одновременно международным специализированным салоном «Защита от коррозии. Покрытия». В программе выставки: конференции, семинары, пресс-конференции, деловые встречи, презентации отечественных и зарубежных фирм.
www.minskexpo.com

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.	78 дол. США	156 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).

РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190×190 мм)
- Вторая, третья и четвертая страницы обложки (200×290 мм)
- Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм)
- Вклейка А4 (200×290 мм)
- Разворот А3 (400×290 мм)
- 0,5 А4 (185×130 мм)
- 0,25 А4 (90×130 мм)

Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрези 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

© Автоматическая сварка, 2011

Подписано к печати 12.07.2011. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 9,09. Усл.-отт. 10,05. Уч.-изд. л. 10,24 + 10 цв. вклеек.
Печать ООО «Фирма «Эссе».
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

СТАЛЬ И АЛЮМИНИЙ — ТЕРМИЧЕСКОЕ СОЕДИНЕНИЕ, КОТОРОЕ РАНЕЕ СЧИТАЛОСЬ НЕВОЗМОЖНЫМ

Инновации еще больше расширили границы возможностей сварки: раньше считалось, что сталь и алюминий невозможно соединить с помощью электродуговой сварки из-за их различных физико-химических свойств, но теперь это осуществимо на практике.

В учебных пособиях по сварке четко сказано, что металлы, значительно отличающиеся друг от друга по физическим и химическим свойствам, таким, как температура плавления (1500 °С для стали и 590 °С для алюминия), коэффициент расширения (1,2 мм для стали и 2,3 мм для алюминия при 100 °С) или электрохимический потенциал, невозможно соединить посредством электродуговой сварки. Компания «Fronius» на протяжении 20 лет усердно работала над устранением этого технического «недостатка». Еще до открытия технологии CMT (Cold Metal Transfer) были получены первые воспроизводимые соединения. В 2003 г. при сотрудничестве со сталелитейной компанией «Voestalpine» была разработана соответствующая технология. Многочисленные испытания подтверждают промышленную пригодность данного способа сварки и целесообразность его применений.

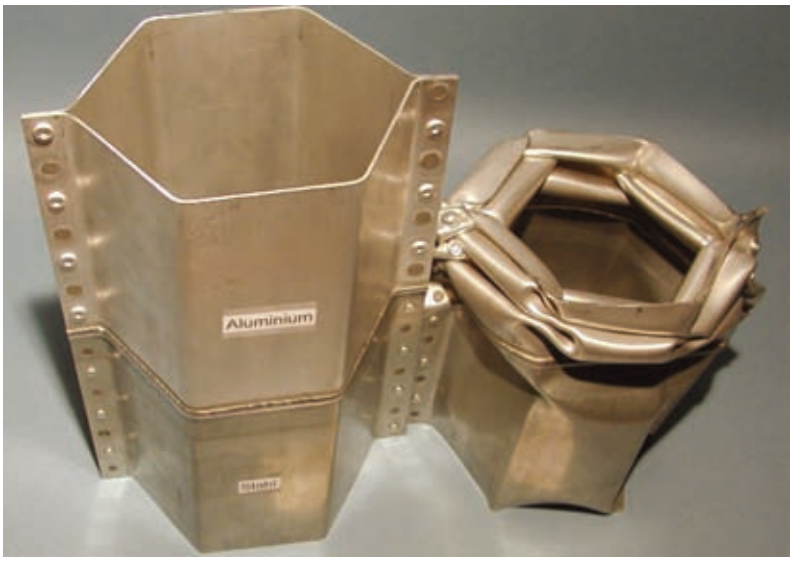
Соединение стали (слева) с алюминием (справа) — пайка стали и сварка алюминия

Особенностью выполнения разнородного соединения стали с алюминием является сварка со стороны алюминия и пайка со стороны стали. Результатом успешной совместной работы компаний «Fronius» и «Voestalpine» стало получение различных патентов на данное инновационное решение.

Основой для выполнения высококачественных разнородных соединений стали и алюминия является процесс CMT. За аббревиатурой CMT скрывается один из самых стабильных в мире сварочных процессов. «Холодная» сварка от «Fronius» означает наилучшие результаты при работе с различными материалами, стабильную дугу и точнейшее управление. Это возможно благодаря процессу, который, в сравнении с обычной сваркой MIG/MAG, действительно является «холодным». С помощью средств цифрового управления происходит распознавание короткого замыкания и отрыв капли от торца электрода посредством отвода поволоки в момент короткого замыкания — до 90 раз в секунду. За счет этого сама дуга в фазе горения оказывает тепловое воздействие незначительный промежуток времени, ток поддерживается на предельно низком уровне, а переход металла в сварочную ванну происходит без возникновения брызг. Установка и контроль длины дуги выполняются автоматически, т. е. дуга остается стабильной независимо от особенностей поверхности изделия или же скорости сварки. CMT имеет значительную гибкость относительно различных сфер применения, будь-то сварка тонколистового металла от 0,3 мм, на-

Система для роботизированной сварки CMT

* Статья на правах рекламы.



Испытания образцов, выполненных с помощью сварко-пайки CMT, демонстрируют впечатляющие результаты

плавка с минимальным коэфициентом разбавления, MIG-пайка листов с покрытием и т. д.

Рассмотрим некоторые технологические особенности выполнения разнородных соединений стали с алюминием с помощью процесса CMT. Исходными являются условия, при которых сталь должна быть оцинкована, алюминиевый сплав выбирается из ряда EN AW 5xxx (алюминиево-магниевые сплавы) или 6xxx (сплавы системы Al–Mg–Si), а в качестве присадочного материала рекомендуется использовать проволоку AlSi3Mn1. Слой цинка, нанесенный на стальной лист путем гальванического или горячего цинкования, выступает в роли флюсующего вещества. Размер интерметаллидной зоны, возникающей по линии сплавления алюминий–сталь, является решающим фактором для получения качественного соединения, т. е. данная зона (фаза) должна быть минимизирована и составлять не больше 10 мкм. Только в этом случае обеспечивается высокая надежность соединения.

Многолетние тесты и испытания образцов, выполненных с помощью сварко-пайки CMT, демонстрируют высокие эксплуатационные характеристики соединения, отсутствие межкристаллитной коррозии и трещинообразования.

В автомобилестроении и в других отраслях промышленности — от строительства до электроэнергетики — существует потребность в изготовлении надежных и легких конструкций. Термическое соединение стали с алюминием позволяет значительно уменьшить массу изделия в зависимости от необходимой нагрузки. Например, в автомобилестроении данная технология обеспечивает уменьшение массы транспортного средства, тем самым снижает его энергопотребление и уровень выбросов CO и CO_2. Революционный процесс CMT от компании «Fronius» позволяет воплотить в жизнь мечты конструкторов и технологов — соединить прочную сталь с легким алюминием.

«Fronius International» — австрийское предприятие, головной офис которого расположен в Петтенбахе и которое также имеет отделения в Вельсе, Тальхайме и Заттледте. Предприятие специализируется на системах для заряда батарей, сварочном оборудовании и солнечной электронике. Всего штат компании насчитывает 3250 сотрудников. Доля экспорта составляет 95 %, что достигается благодаря 17 дочерним компаниям и международным партнерам по сбыту и представителям «Fronius» более чем в 60 странах. В 2010 г. общий оборот компании составил 499 миллионов евро. Благодаря первоклассным товарам и услугам, а также 737 действующим патентам «Fronius» является лидером в области технологий на мировом рынке. В отделе опытно-конструкторских разработок заняты 392 сотрудника.

Fronius
РАСШИРЯЯ ГРАНИЦЫ

ООО «ФРОНИУС УКРАИНА»
07455, Киевская обл.,
Броварской р-н, с. Княжичи, ул. Славы, 24
Тел.: +38 044 277 21 41; факс: +38 044 277 21 44
E-mail: sales.ukraine@fronius.com
www.fronius.ua