



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. Пиллярчик (Польша)
Г. А. Туричин (Россия)
Чжан Янмин (Китай)
Д. фон Хофе (Германия)

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

ИЗДАТЕЛЬ:
МА «Сварка»

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

Редакторы:

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

Свидетельство о государственной
регистрации КВ 4788
от 09.01.2001

**Журнал входит в перечень
утвержденных ВАК Украины
изданий для публикации трудов
соискателей ученых степеней**

За содержание рекламных
материалов редакция журнала
ответственности не несет

Цена договорная

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- Походня И. К.* Отделу исследований физико-химических процессов в сварочной дуге — 50 3
- Кулик В. М., Шелягин В. Д., Савицкий М. М., Елагин В. П., Сиора А. В., Шуба И. В.* Технологические особенности лазерной сварки среднеуглеродистой легированной стали 11
- Харбин Н. Н., Слепцов О. И., Сивцев М. Н., Винокуров Г. Г.* Оценка влияния водорода на замедленное разрушение сварных соединений высокопрочных низколегированных сталей 15
- Гарсия-Родригес А., Гомес Перес К. Р., Куинтата Пучол Р.* Исследование процессов горения дуги и переноса электродного металла при сварке покрытыми электродами E6013 18
- Горобец О. Ю., Максимов С. Ю., Прилипко Е. А.* Механизм электромагнитной дегазации жидкого металла при под- водной сварке 25
- Кривчилов С. Ю.* Модифицирование бором наплавленного металла типа серого чугуна 28

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- Кучук-Яценко С. И., Кривенко В. Г., Дидковский А. В., Швец Ю. В., Харченко А. К., Левчук А. Н.* Технология и новое поколение оборудования для контактной стыковой сварки высокопрочных рельсов современного производства при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей 32
- Цымбалистая Т. В.* Применение теплозащитных покрытий для двигателей внутреннего сгорания (Обзор) 38
- Маковецкая О. К.* Основные тенденции на рынке сварочной техники в 2008–2011 гг. и прогноз его развития (Обзор) 44
- Знаменательные даты**
- Вклад ИЭС им. Е. О. Патона в послевоенное возрождение промышленности 51
- Завершенные НИР в ИЭС им. Е. О. Патона 24, 27, 31, 37

ХРОНИКА

- Международная конференция «Титан-2012 в СНГ» 53
- Международный конкурс молодых сварщиков в Чехии 54
- К 90-летию со дня рождения В. К. Лебедева 56
- ИНФОРМАЦИЯ** 58

Avtomaticheskaya Svarka

№ 6 (710)

June 2012

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
URL: www.rucont.ru

Editors:

E. N. Kazarova, T. V. Yushkina

Electron galley:

I. R. Naumova, A. I. Sulima

State Registration Certificate
KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved

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

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

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

- Pokhodnya I. K.* Department of investigation of physical-chemical processes in welding arc is 50 3
- Kulik V. M., Shelyagin V. D., Savitsky M. M., Elagin V. P., Siora A. V., Shuba I. V.* Technological peculiarities of laser welding of medium-carbon alloyed steel 11
- Kharbin N.N., Sleptsov O.I., Sivtsev M.N., Vinokurov G.G.* Estimation of hydrogen effect on delayed fracture of welded joints of high-strength low-alloy steels 15
- A. Rodriquez, C. Perez, R. Puchol.* Investigation of processes of arc burning and electrode metal transfer in welding with covered electrodes E6013 18
- Gorobets O. Yu., Maksimov S. Yu., Prilipko E. A.* Mechanism of electromagnetic degassing of molten metal in underwater welding 25
- Krivchikov C. Yu.* Modifying of deposited metal of grey cast iron type using boron 28

INDUSTRIAL

- Kuchuk-Yatsenko S. I., Krivenko V. G., Didkovsky A. V., Shvets Yu. V., Kharchenko A. K., Levchuk A. N.* Technology and new generation of equipment for flash-butt welding of high-strength rails of advanced production in construction and reconstruction of high-speed rail road lines 32
- Tsymbalistaya T. V.* Application of heat-protective coatings for internal combustion engines (Review) 38
- Makovetskaya O. K.* Main tendencies at the market of welding equipment in 2008- 2011 and prediction of its development 44
- Remarkable dates*
Contribution of the E. O. Paton Electric Welding Institute to the post-war revival of industry 51
Accomplished R&D works at the E. O. Paton Electric Welding Institute 24, 27, 31, 37

NEWS

- International Conference «Ti-2012 in CIS» 53
- International competition of young welders in Czech Republic 54
- Towards the 90th birthday of V. K. Lebedev 56
- INFORMATION 58



УДК 621.791.75.04:621.791.001.5



ОТДЕЛУ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СВАРОЧНОЙ ДУГЕ — 50

Академик НАН Украины **И. К. ПОХОДНЯ**
 (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Бурное развитие машиностроения, строительства и других отраслей народного хозяйства СССР в послевоенные годы потребовало создания и исследования новых материалов для сварки конструкционных сталей различных классов. Необходимо было также создать новые промышленные производства покрытых электродов общего и специального назначения с улучшенными санитарно-гигиеническими свойствами.

Б. Е. Патон принял решение организовать на новом уровне исследования металлургических и электрофизических проблем дуговой сварки, разработку низкотоксичных электродов и технологии их промышленного производства. Для решения этих задач в ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР в 1958 г. была организована новая лаборатория, руководство которой было поручено автору этой статьи.

В 1960-е годы в лаборатории был выполнен ряд исследований. Создан оригинальный метод скоростной рентгеновской киносъемки быстротекущих процессов, с помощью которого впервые получены достоверные данные о процессах плавления и переноса электродного металла при дуговой сварке покрытыми электродами, под водой и под флюсом. Изучены закономерности кинетики плавления и переноса электродного металла, распределения температуры в каплях электродного металла, процессы теплообмена между дугой и расплавленным металлом на торце электрода, процессы абсорбции газов расплавленным металлом в условиях существования дугового разряда и закономерности распределения водорода и азота в сварочной ванне при непрерывном движении границы раздела жидкой фазы и кристаллизующегося металла.

Установлены закономерности влияния режимов сварки, плотности и полярности тока на температуру капель, времени взаимодействия капель с окружающей средой, влияния типа покрытия на процесс плавления и переноса металла при сварке покрытыми электродами. Определена вза-

имосвязь между плотностью и полярностью тока и температурой капель электродного металла, градиентом напряжения в столбе дуги и переносом электродного металла.

Установление закономерностей процессов абсорбции и десорбции газов позволило с новых позиций подойти к трактовке механизма образования пористости сварных швов (И. К. Походня, А. М. Суптель, И. Р. Явдошин, Г. Г. Корицкий, А. П. Пальцевич, В. Н. Горпенюк, Б. А. Костенко).

Результаты этих исследований изложены в монографии И. К. Походни «Газы в сварных швах», изданной в СССР в 1972 г., а позже переизданной в ЧССР и Китае. Они стали теоретической базой для создания многих марок прогрессивных низкотоксичных и высокопроизводительных сварочных электродов, характеризующихся благоприятными сварочно-технологическими свойствами, обеспечивающими резкое снижение выделения вредных веществ и хорошие механические свойства металла швов. Композиции покрытий электродов оригинальны, они защищены авторскими свидетельствами СССР и зарубежными патентами.

Для массового высокомеханизированного производства электродов необходимо было осуществить проектирование и строительство новых мощных цехов. На выполнение этой народнохозяйственной задачи отводились короткие сроки.

В 1962 г. в ИЭС им. Е. О. Патона было создано опытное производство сварочных материалов, деятельность которого позволила резко сократить время от возникновения научной идеи до ее широкого внедрения в практику (В. Л. Борисюк, Л. Ф. Белозеров).

В июне 1962 г. электродная лаборатория была преобразована в отдел исследований физико-химических процессов в сварочной дуге, деятельность которого высоко оценена как в СССР, так и за рубежом.

В ИЭС им. Е. О. Патона А. Е. Марченко, И. Р. Явдошин, А. М. Бейниш провели исследования по совершенствованию технологий изготовления электродов. Эта работа была выполнена в сотрудничестве с ГИПРОМЕТИЗом, «Промсталь-



конструкцией», Институтами гигиены труда и профзаболеваний Москвы и Киева, Институтом металлургии им. А. А. Байкова АН СССР, а также НИИМЕТИЗом, ЦНИИТМАШем, «Прометеем», Московскими электродным и опытным сварочными заводами, Магнитогорским метизно-металлургическим заводом, Днепропетровскими заводами «Красный Профинтерн», металлоизделий (впоследствии «Днепрометиз»), Одесским, Череповецким и Орловским сталепрокатными заводами, Артемовским заводом «Победа труда», Сулинским металлургическим заводом, Гомельским заводом пусковых двигателей и многими другими. Благодаря объединению усилий ученых-сварщиков и металлургов, проектировщиков и производственников удалось в короткие сроки решить важную народнохозяйственную задачу — обеспечить страну первоклассными низкотоксичными электродами.

В 1971 г. работа «Коренное улучшение условий труда и повышение производительности при сварке покрытыми электродами и их производстве» удостоена Государственной премии СССР. Среди лауреатов — сотрудники ИЭС им. Е. О. Патона И. К. Походня (руководитель), А. Е. Марченко, И. Р. Явдошин, А. М. Бейниш.

Б. Е. Патон предложил использовать для механизации сварки на монтаже порошковую проволоку. В 1959 г. был разработан промышленный образец порошковой проволоки, не требующей дополнительной защиты расплавленного металла (И. К. Походня, А. М. Суптель).

И. К. Походня совместно с А. М. Суптелем, В. Н. Шлепаковым изучили особенности тепло- и массообмена, твердофазного взаимодействия составляющих сердечника порошковой проволоки при нагреве, разработали методы регулирования скоростей плавления оболочки и сердечника

проволоки, предложили методы предупреждения пористости швов. Была изучена кинетика плавления и переноса электродного металла, установлены особенности окислительно-восстановительных реакций взаимодействия между металлом, шлаком и газовой фазой, предложены методы управления этими процессами, обеспечивающие удаление продуктов реакций из сварочной ванны, оптимальное легирование металлической матрицы, высокую сопротивляемость сварных соединений зарождению и распространению трещин. В результате проведенных исследований создан ряд самозащитных порошковых проволок различного назначения, характеризующихся оригинальными композициями и конструкциями оболочки.

Разработка самозащитных порошковых проволок явилась новым шагом в технике и технологии сварочного производства. Их применение позволило решить проблему механизации сварочных процессов на монтаже, в открытых цехах, в полевых условиях, на стапелях. Морские регистры Lloyd Register of Shipping (Великобритания), Bureau Veritas (Франция), American Bureau of Shipping (США), Germanischer Lloyd (ФРГ), Речной и Морской регистры СССР разрешили применение этих проволок при изготовлении ответственных корпусных конструкций морских и речных судов, что повысило производительность сварки. Порошковые проволоки двухслойной конструкции удостоены Золотой медали на выставке «Сварка-75» в Брно (ЧССР).

В начале 1950-х годов И. К. Походня предложил использовать наплавку порошковой проволокой в углекислом газе. И. К. Походня совместно с В. Н. Шлепаковым, С. А. Супруном, В. Н. Головкин, Ю. А. Гаврилюком, Л. Н. Орловым, Г. А. Шевченко, А. С. Котельчуком, В. Н. Упырем, А. А. Голякевичем и В. Н. Игнатуком создали

гамму газозащитных порошковых проволок общего и специального назначения, которые широко применяются в промышленности. Это направление, получившее большое развитие в мировой сварочной науке и технике, является одним из ведущих направлений повышения производительности труда и улучшения качества сварных соединений.

Создание способов сварки порошковой проволокой потребовало разработки специальной сварочной аппаратуры, источников питания, а также технологии сварки. Необходимо было также разработать высокопроизводительные технологии и оборудование для изготовления порошковой проволоки, организовать серийное производство этого оборудования, спроектировать и организовать современное высокомеханизированное про-



Разработчики низкотоксичных электродов массового применения (слева направо: И. К. Походня, А. Е. Марченко, И. Р. Явдошин)



изводство порошковой проволоки. А. М. Суптель, В. Н. Шлепаков, В. Ф. Альтер, П. А. Косенко, П. И. Рак, И. П. Каплиенко исследовали технологические особенности изготовления порошковой проволоки: совместную пластическую деформацию сплошных и сыпучих тел, силовые условия их обработки, процессы профилирования композитных материалов сложных сечений, непрерывное дозирование многокомпонентных порошкообразных смесей. Эти работы были положены в основу создания современной промышленной технологии изготовления порошковых проволок, разработки конструкции оригинальных высокопроизводительных агрегатов для одновременного профилирования ленты и дозирования порошкообразной шихты. Приоритет наших ученых в этой области защищены авторскими свидетельствами СССР, Болгарии и ЧССР, патентами США, ФРГ, Великобритании, Франции, Италии, Австрии, Швейцарии, ГДР, ВНР и других стран. ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР и Алма-Атинским заводом тяжелого машиностроения создано высокопроизводительное оборудование для изготовления порошковых проволок различной конструкции. Организовано серийное производство этого оборудования.

Спроектированы и построены высокотехнологичные цеха по производству порошковой проволоки в Украине и России. Отечественные технологические линии, оборудование, ноу-хау поставлены фирмам США, ФРГ, Франции, Японии, ЧССР, ВНР, НРБ, Аргентины, Китая.

Авторскому коллективу в составе И. К. Походни (руководитель), И. И. Фрумина, А. М. Суптеля, В. Н. Шлепакова, В. Ф. Альтера и сотрудников ряда других организаций в 1978 г. была присуждена Государственная премия СССР «За создание, организацию массового производства и внедрение новых материалов (порошковых проволок) для механизированной сварки, обеспечивающих повышение производительности труда и качества сварных конструкций».

Результаты исследований обобщены в монографиях «Сварка порошковой проволокой» и «Производство порошковой проволоки». Первая из них издана также в ЧССР.

В 1965 г. под руководством Б. Е. Патона начались работы по созданию способов, оборудования для сварки в космических условиях. Сотрудники отдела А. Е. Марченко, Ю. Д. Морозов, В. И. Пономарев принимали активное участие в выполнении комплексных исследований поведения жидкого металла при дуговой сварке в условиях изменяющейся гравитации и особенностей дугового разряда между плавящимися электродами в вакууме. Был разработан оригинальный спо-



Лауреаты Государственной премии СССР — создатели порошковых проволок (слева направо: И. И. Фрумин, А. М. Суптель, И. К. Походня, В. Н. Шлепаков, В. Ф. Альтер)

соб дуговой сварки в вакууме и невесомости. Испытание этого способа вошло в программу первого в мире технологического эксперимента — сварки в космосе, осуществленной в 1969 г. летчиком-космонавтом В. Н. Кубасовым на космическом корабле «Союз-6». Результаты исследований опубликованы в сборниках «Космическое материаловедение и технологии» (1977) и «Космос: технологии, материаловедение, конструкции» (2000).

Исследования основных закономерностей формирования металла шва, легирования, кристаллизации сварочной ванны в условиях искусственного охлаждения поверхности шва и изменяющегося пространственного положения ванны, выполненные В. Н. Шлепаковым, В. Н. Игнатуком, Ю. А. Гаврилюком, С. П. Гиюком, С. Ю. Юзвенко, позволили создать прогрессивную технологию, оборудование для дуговой сварки неповоротных стыков труб с использованием самозащитной порошковой проволоки. Принудительное формирование сварного шва дало возможность повысить производительность работ по сравнению с ручной дуговой сваркой в 3–6 раз. Были разработаны системы легирования металла шва, созданы новые порошковые проволоки, определены оптимальные параметры процесса сварки, обеспечивающие получение высоких механических свойств сварных соединений труб, используемых для сооружения магистральных трубопроводов, а также внедрена промышленная технология и освоено производство сварочной порошковой проволоки для трубопроводного строительства.

ИЭС им. Е. О. Патона, ОКБ ИЭС, Каховский завод электросварочного оборудования создали специализированный комплекс оборудования «Стык» для сварки неповоротных стыков труб диаметром 1220...1420 мм. Технология автоматической сварки трубопроводов с применением комплексов «Стык» широко использовалась при строительстве ряда магистральных газопроводов. Способ сварки, оборудование, присадочные материалы защищены авторскими свидетельствами СССР



и патентами США, Канады, ФРГ, Франции, Японии, Великобритании и других стран.

В 1983 г. за работу «Комплекс исследований, проектно-конструкторских и технологических работ по созданию и внедрению прогрессивной технологии дуговой сварки и оборудования (комплекс «Стык») для технического перевооружения сварочного производства при сооружении магистральных трубопроводов» присуждена Премия Совета Министров СССР. В коллективе авторов — сотрудники ИЭС им. Е. О. Патона И. К. Походня (руководитель), В. Е. Патон, В. Я. Дубовецкий, В. Н. Шлепаков, А. Н. Кутовой, В. Н. Головкин, В. А. Титаренко, П. А. Косенко, В. А. Котов, В. К. Сирик. В 1985 г. эта работа удостоена Золотой медали на Лейпцигской ярмарке.

В 1978 г. в состав ИЭС им. Е. О. Патона вошел сварочно-электродный завод Министерства черной металлургии УССР. За короткий срок завод был реконструирован, оснащен новым современным оборудованием. На нем было организовано новое производство электродов, порошковых проволок, сварочных флюсов, наплавочных материалов, улучшилось качество продукции. Деятельность опытного завода сварочных материалов, возглавляемого более 33 лет П. А. Косенко, способствовала продвижению на рынок новых разработок института. Коллектив завода стабильно работает, совершенствует производство, активно занимается улучшением качества продукции, поддерживает постоянные творческие связи с сотрудниками отдела. Продукция завода заслужила всеобщее признание инженеров-производственников, сварщиков.

Опытное производство сварочных материалов института реорганизовано в Научно-инженерный центр материалов для сварки и наплавки. Руководит им сотрудник отдела А. С. Бибииков. Центр поставляет опытные партии сварочных материалов промышленным предприятиям и стройкам Украины и стран СНГ, что позволяет проводить маркетинг новых разработок института и организовывать их производство в промышленных масштабах. Большую помощь в этой работе оказывает ассоциация «Электрод» (П. В. Игнатченко).

Дальнейшее развитие получили работы по созданию перспективных сварочных материалов — агломерированных флюсов для автоматической сварки. Д. М. Кушнерев, В. В. Головкин и С. Д. Устинов исследовали металлургические особенности сварки под керамическими флюсами и пути снижения содержания вредных примесей в сварных швах, выявили эффективность модифицирования и микролегирования наплавленного металла с помощью этих флюсов. Эти исследования дали возможность создать новые флюсы алюминатно-рутилового, алюминатно-основного типов, характеризующиеся хорошими технологическими

свойствами и обеспечивающие высокие механические характеристики металла швов. Они одобрены Морским регистром СССР для использования при изготовлении ответственных судовых конструкций.

Работы последнего десятилетия обобщены в докторской диссертации В. В. Головкин «Взаимодействие металла со шлаком при сварке под агломерированными флюсами низколегированных сталей», успешно защищенной в 2006 г.

В 1970-х годах в отделе было предложено использовать порошковые проволоки для внепечной обработки металлических расплавов. Созданы новые типы проволок, содержащие высокоактивные элементы для микролегирования, модифицирования и десульфурации сталей и чугунов. В. Ф. Альтером, П. А. Косенко, П. И. Раком и В. А. Савенко разработаны технология, оборудование для изготовления порошковых проволок большого диаметра. Эти работы получили дальнейшее развитие в Институте проблем материаловедения им. И. Н. Францевича АН УССР, Донецком НИИ черной металлургии, на заводе «Универсальное оборудование» и других предприятиях. В настоящее время метод инжекционной металлургии широко применяется на металлургических заводах Украины и России. С его помощью обработаны десятки миллионов тонн стальных расплавов.

За разработку теоретических основ, широкое внедрение способа повышения свойств конструкционных сталей микролегированием порошковыми проволоками с высокоактивными элементами авторский коллектив в составе И. К. Походни, Л. А. Позняка, А. И. Троцана и других ученых и производственников в 1999 г. удостоен Государственной премии Украины в области науки и техники.

Для работ отдела характерно использование современных физических методов исследований, а также математического моделирования. При исследовании физико-химических, металлургических и электрофизических процессов дуговой сварки в отделе широко применяются рентгеновские флуоресцентный и дифракционный анализы, растровая электронная микроскопия, локальный рентгеноспектральный анализ, масс-спектрометрия вторичных ионов, газовая хроматография, скоростная рентгеновская и оптическая киносъемка, многоканальный анализ электрических характеристик дугового разряда и сварочных цепей. С помощью методов рентгеноспектрального анализа, растровой электронной микроскопии, масс-спектрометрии вторичных ионов исследованы особенности механизма образования прочного сцепления шлака с металлом при сварке и предложены пути улучшения делимости шлаковой корки (И. К. Походня, В. И. Карманов, В. Г. Устинов, В. Г. Войткевич).



Получены новые данные о распределении элементов в сварном соединении, составе неметаллических включений, ликвационных явлениях в сварных швах.

А. Е. Марченко, Н. В. Скорина и М. Ф. Гнатенко провели реологические исследования многокомпонентных систем электродных покрытий. Были предложены пути интенсификации изготовления, опрессовки обмазочных масс, повышения надежности технологии производства электродов, разработаны новые приборы для контроля обмазочных масс.

Большое внимание уделяется повышению качества сварочных материалов. Создаются автоматические аналитические системы для элементного анализа шихт электродов, порошковых проволок, агломерированных флюсов (В. И. Карманов, В. Г. Войткевич, В. В. Загородний, С. С. Пономарев, С. И. Селиверстенко).

Предложены новые методы анализа диффузионного водорода в сварных швах, которые позволили существенно повысить точность и экспрессность анализа. Они стандартизованы в СССР, включены в национальные стандарты США и Японии (А. П. Пальцевич).

В. Г. Устиновым разработана методика количественного определения содержания азота в системах железо–азот, железо–азот–титан, железо–азот–алюминий, позволяющая определять азот, который находится в твердом растворе и нитридных включениях. Предложена оригинальная методика электронно-микроскопических исследований неэлектропроводных материалов. Создана масс-спектрометрическая установка с двойной фокусировкой для изучения жидких металлов, установка для масс-спектральных исследований термоионной эмиссии сварочных материалов.

В ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР и Институте ядерных исследований АН УССР созданы информационно-измерительные системы, предназначенные для статистического анализа электрических и временных параметров процессов дуговой сварки, исследования, контроля технологических свойств сварочных материалов и источников питания (И. К. Походня, Р. Г. Офенгенден).

В. Н. Горпенюком, С. С. Миличенко, В. Е. Пономаревым, Л. В. Стародубцевым, В. И. Швачко, И. Р. Явдошиным, В. Н. Шлепаковым разработаны высокопроизводительные методики определения стабильности дуг переменного тока и переноса электродного металла. Реализация этих методик на информационно-измерительных системах позволила сократить время обработки экспериментальных данных. Получена статистически досто-



Ознакомление управляющего директора DVS Д. фон Хофе с работами отдела (1992 г.)

верная информация о влиянии рода, полярности и силы тока, состава электродного покрытия на стабильность дуги переменного тока и перенос электродного металла.

Результаты исследований обобщены в монографии «Металлургия дуговой сварки. Процессы в дуге и плавление электродов», изданной в 1990 г. Эта монография, удостоенная Премии им. Е. О. Патона НАН Украины (1996), получила мировое признание, была переведена на английский язык и издана в Кембридже (Великобритания).

Фундаментальные исследования механизмов испарения электродного металла, повторного зажигания дуги, взаимосвязи стабильности дуги, характера переноса электродного металла с составом электрода и режимом сварки были положены в основу создания низкотоксичных универсальных и высокопроизводительных электродов (И. Р. Явдошин, А. Е. Марченко, В. М. Бейниш, Н. В. Скорина, В. Н. Горпенюк, Г. Е. Коляда, Б. В. Юрлов, А. В. Булат, Г. Г. Корицкий, А. А. Алексеев, С. С. Миличенко, А. С. Бибики).

Созданы новые компьютерные системы, усовершенствованы методики исследований (А. С. Котельчук, В. Н. Шлепаков, Л. А. Тараборкин, С. А. Супрун).

В отделе широко используется математическое моделирование металлургических процессов дуговой сварки.

В 1978 г. на конгресс Международного института сварки автором совместно с В. Ф. Демченко и Л. И. Демченко был представлен доклад «Математическое моделирование поведения газов в сварных швах», который в 1979 г. вышел отдельным изданием в издательстве «Наукова думка». В отделе были выполнены исследования особенностей роста газового пузырька в кристаллизующейся сварочной ванне, взаимодействия расплавленного шлака с закристаллизовавшимся металлом, термодинамических свойств высокотем-



пературных процессов в системе металл–газ–шлак, кинетических свойств взаимодействий слабоионизированной плазмы с расплавленным металлом, прогнозирования структуры зоны термического влияния сварного соединения, а также кинетики твердофазного взаимодействия многокомпонентных систем и др. (В. И. Швачко, Л. А. Тараборкин, В. Н. Шлепаков, А. С. Котельчук, И. И. Цыбулько, В. А. Павлык, О. В. Глущенко, О. М. Портнов, А. В. Игнатенко). Результаты исследований регулярно представляются на международных семинарах по математическому моделированию сварочных явлений «Numeric Analysis of Weldability», а также международных семинарах «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах».

В отделе продолжается поиск эффективных путей улучшения санитарно-гигиенических характеристик сварочных материалов. Сотрудниками отдела ИЭС им. Е. О. Патона (В. Г. Войткевич, И. Р. Явдошин, Е. Н. Оноприенко, В. И. Карманов), Института гигиены труда и профессиональных заболеваний АМН Украины (Ю. И. Кундиев, И. Т. Брахнова, Л. Н. Горбань), Института фармакологии и токсикологии, Института физической химии им. Л. В. Писаржевского и других научных организаций проведен комплекс физико-химических и биологических исследований связи токсичности аэрозолей и состава сварочных материалов. Исследования структуры и фазового состава аэрозоля с использованием комплекса методов электронной и инфракрасной спектроскопии в сочетании с определением растворимости твердой составляющей сварочного аэрозоля и его биологической агрессивности позволили получить данные, необходимые для гигиенической оценки сварочных материалов. Разработаны методы экспресс-оценки токсичности сварочных аэрозолей, позволившие получить количественные показатели санитарно-гигиенических свойств сварочных материалов, а также выбирать те из них, которые имеют минимально вредный уровень воздействия на организм человека. Результаты исследований сварочных аэрозолей обобщены в монографии В. Г. Войткевич «Welding Fumes», изданной в 1995 г. в Англии, а также в докладе И. Р. Явдошина и И. К. Походни в 2002 г. на Международной научно-практической конференции «Защита окружающей среды в сварочном производстве» в Одессе. В последнее время с помощью рентген-электронной спектроскопии получены данные о наличии в аэрозоле четырехвалентного марганца Mn^{4+} и о дисперсности сварочных аэрозолей (И. Р. Явдошин, В. И. Карманов, И. П. Губеня).

Следует упомянуть исследования ликвации элементов в сварных швах и образование химической микронеоднородности, изучение условий

рационального легирования металла сварного шва и роли отдельных элементов (никеля, марганца, кремния, фосфора, меди, хрома, молибдена) в формировании структуры металла шва и изменении его хладостойкости (И. Р. Явдошин, В. Г. Войткевич, Б. В. Юрлов, А. А. Алексеев, В. В. Головкин, В. Н. Шлепаков, Г. А. Шевченко, Л. Н. Орлов, А. С. Котельчук, С. М. Наумейко).

По-прежнему уделяется большое внимание исследованию проблемы газов в сварных швах.

Результаты этих исследований обобщены в монографии «Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие металла с газами», изданной в 2004 г. издательством «Наукова думка» и удостоенной в 2006 г. Премии им. Н. Н. Доброхотова НАН Украины (И. К. Походня, И. Р. Явдошин, А. П. Пальцевич, В. И. Швачко, А. С. Котельчук).

При создании новых сварочных технологий и материалов учитываются последние достижения науки в смежных областях: физике плазмы, физике металлов, физике прочности, механике разрушения, металловедении, материаловедении и др. В качестве примера могут служить исследования по проблеме водорода в сварных соединениях.

При изучении образцов железа, насыщенных водородом, была обнаружена интенсивная эмиссия вторичных отрицательных ионов водорода. Этот эффект послужил основой для разработки новой модели водородного охрупчивания. В соответствии с ней атомарный водород, адсорбированный на поверхности железа в виде отрицательных ионов, изменяет энергетическое состояние субмикротрещины, которая возникает в дислокационном кластере во время деформации и в начальный период распространяется по классической схеме Гриффитса. Новая модель раскрывает физическую природу влияния водорода и позволяет объяснить качественно известные его особенности.

Новые представления о механизме влияния водорода позволили разработать методику экспериментального исследования чувствительности сталей к хрупкому разрушению в присутствии водорода.

Новая методика позволяет определять влияние таких факторов, как элементный состав и структура металла, значение напряжений, температура, скорость деформации, содержание и распределение водорода в металле.

Результаты комплексных исследований механизма обратимой водородной хрупкости металлов с ОЦК-решеткой обобщены в докторской диссертации В. И. Швачко и кандидатских диссертациях С. Н. Степанюка и А. В. Игнатенко.

Развитию исследований обратимой водородной хрупкости и механике образования индуцированных водородом трещин посвящены работы А. В. Игнатенко, В. С. Синюка, А. П. Пальцевича.



Разработана математическая модель переноса водорода краевыми дислокациями. Проанализировано влияние эффекта водородной локализации пластичности на взаимодействие дислокаций в железе. На основе дислокационной теории предложена физическая модель водородной хрупкости. Создана математическая модель зарождения и развития субмикродфекта в зерне металла с ОЦК-решеткой, содержащего водород. Созданы компьютерные программы и проведены расчеты влияния сложнапряженного состояния металла и эффекта водородной локализации пластичности. Установлена температурно-скоростная зависимость значения напряжения разрушения. Показано, что при прочих равных условиях уменьшение размеров зерна металла ведет к увеличению степени водородной хрупкости. Проведены расчеты напряженно-деформированного состояния образца с концентратором при трехточечном изгибе с учетом микродфектов. Наличие водорода в металле приводит к образованию микродфектов при меньшем значении локальной пластической деформации. На макроуровне это приводит к образованию трещины при меньшем прогибе образца. Предложена математическая модель, описывающая кинетику перераспределения водорода в сварном соединении с учетом энергетических ловушек. Выполнены исследования полей концентрации водорода в сварном соединении. Расчеты кинетики удаления остаточного водорода хорошо согласуются со спектрами термодесорбции водорода, полученными экспериментально (А. В. Игнатенко, В. С. Синюк, А. П. Пальцевич).

В отделе получили развитие исследования по управлению структурой и свойствами металла сварных швов с помощью мелкоразмерных неметаллических включений (В. В. Головки).

Изучено влияние окислительного потенциала сварочных материалов на состав и структуру твердого раствора, количество и состав включений. Повышению доли игольчатого феррита в структуре швов способствуют включения, состоящие из оксидов титана, алюминия и марганца размером 0,3...0,8 мкм. Разработана математическая модель формирования неметаллических включений в металле сварных швов (Л. А. Тараборкин, В. В. Головки, С. Н. Степанюк, Д. Ю. Ермоленко).

Исследования физико-химических свойств порошковых материалов и смесей, моделирующих сердечник порошковой проволоки, проведенные методами комплексного термического анализа и масс-спектропии газовой фазы при динамическом нагреве от 30 до 1500 °С, позволили установить температурные особенности протекания термохимических реакций, оценить степень их развития и тепловой баланс. Образование расплавов на стадии нагрева порошкового сердечника и выделение газообразных продуктов (H_2O , CO_2 , SiF_4) определяет защитные функции электродного материала и существенно влияет на ход реакций взаимодействия металла с газами на стадиях капли и ванны (В. Н. Шлепаков, С. А. Супрун, А. С. Котельчук).

Среди новых разработок отдела:

гамма универсальных электродов с хорошими сварочно-технологическими свойствами, а также ультранизководородные электроды для сварки высокопрочных низколегированных сталей (И. Р. Явдошин, Н. В. Скорина, П. А. Косенко, А. Е. Марченко, А. П. Пальцевич, О. И. Фольбоорт); современные универсальные порошковые проволоки малого диаметра (В. Н. Шлепаков, П. А. Косенко, Ю. А. Гаврилюк, В. Н. Игнатюк, А. С. Котельчук, С. М. Наумейко);



Сотрудники отдела в неформальной обстановке (2007 г.)



новые агломерированные флюсы (В. В. Головко);

технология изготовления электродов с двухслойным покрытием (А. Е. Марченко);

новые низкотоксичные электроды с использованием комбинированных жидких стекол, содержащих литий (Н. В. Скорина, М. О. Киселев, И. П. Губеня).

Большой вклад в работу отдела вносят сотрудник и инженерно-технических служб (В. А. Савенко, В. С. Власенко, Н. А. Варивода, В. П. Писаренко, Ю. В. Гобарев, Н. К. Сурмило, И. Г. Проскурин, З. Г. Куприянова, Л. М. Скуратовская, Д. Ю. Саранова). Опыт, знания и умение их высоко ценит весь коллектив отдела.

На протяжении всего времени существования отдела большое внимание уделяется подбору талантливой молодежи. Среди сотрудников отдела — выпускники Киевского политехнического и Московского физико-технического институтов, Киевского университета им. Т. Г. Шевченко, Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина, а также Донецкого, Запорожского и Приазовского технических университетов.

В отделе подготовлены 38 кандидатов наук, шесть из которых стали докторами наук. В настоящее время в отделе работают три доктора, 11 кандидатов наук и 15 инженерно-технических работников. Многие наши сотрудники стали руководителями предприятий, государственными служащими, преподают в вузах, работают на промышленных предприятиях. Некоторые занимают достойные позиции в зарубежных научных учреждениях.

Отдел исследований физико-химических процессов в сварочной дуге тесно сотрудничает с другими отделами ИЭС им. Е. О. Патона, возглавляемыми видными учеными: С. И. Кучуком-Яценко, К. А. Ющенко, В. И. Махненко, Л. М. Лобановым, Г. М. Григоренко, И. В. Кривцуном, В. И. Кирьяном, В. И. Галиничем, а также с Институтом проблем материаловедения, Институтом сверхтвердых материалов, Физико-технологическим институтом металлов и сплавов, Институтом черной металлургии, Физико-механическим институтом, НТК «Институт монокристаллов», Харьковским физико-техническим институтом, Институтом проблем прочности, Институтом металлофизики и Институтом ядерных исследований НАН Украины, НТУУ «Киевский политехнический институт», Национальным университетом им. Тараса Шевченко, многими вузами и НИИ США, ФРГ, Австрии, Китая, Словакии, Польши и др.

Отдел с момента его создания отличается тесной связью с производителями и потребителями сварочных материалов в нашей стране и за рубежом. Прог-

рессивные сварочные материалы и технологии, созданные в отделе, и сегодня применяются на предприятиях и стройках Украины, России, Беларуси, стран СНГ, в странах ближнего и дальнего зарубежья. Участие в проектировании оборудования, цехов и заводов для производства сварочных материалов, организация производства новых сырьевых материалов, организация конференций, школ, симпозиумов, консультаций, разработка прогнозов в области сварочных материалов и предложений по совершенствованию их производства — далеко не полный перечень работ отдела.

Направления дальнейших исследований. В первой половине XXI в. сталь останется основным конструкционным материалом. Опережающими темпами будут создаваться новые типы высокопрочных низколегированных сталей, в том числе с особо низким содержанием углерода, теплоустойчивых сталей, сталей для конструкций, работающих при низких климатических температурах, сталей для криогенной техники и высоколегированных различного назначения.

Дуговая сварка по-прежнему будет занимать важнейшее положение среди многочисленных способов сварки плавлением. Для создания новых сварочных материалов необходимы оптимизация систем легирования металла шва, поиск путей снижения содержания водорода, азота, серы, фосфора и других вредных примесей в металле шва.

Будут совершенствоваться сварочно-технологические свойства материалов, методы снижения пористости, предупреждения трещин, улучшения провара, формы швов, отделимости шлаковой корки, повышения стабильности горения дуги, снижения разбрызгивания и выделений сварочных аэрозолей.

Дальнейшее развитие получают физическое и математическое моделирование процессов дуговой сварки. Будут созданы компьютеризированные банки данных и банки знаний, экспертные системы по сварочным материалам различного назначения. Большое внимание необходимо уделить совершенствованию оборудования и технологии производства сварочных материалов, изысканию сырьевых материалов стабильного качества, автоматизации аналитического контроля и технологического сопровождения производства.

Для выполнения этих задач особенно необходимы высококвалифицированные специалисты с глубокими знаниями теории сварочных процессов, физики, химии, а также специалисты в области информационных технологий. Решение этих задач будет способствовать развитию производства сварных конструкций и сварочных материалов нового поколения.



УДК 621.791.72

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

В. М. КУЛИК, В. Д. ШЕЛЯГИН, кандидаты техн. наук, **М. М. САВИЦКИЙ**, д-р техн. наук,
В. П. ЕЛАГИН, А. В. СИОРА, И. В. ШУБА, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучены технологические особенности лазерной сварки Nd:YAG-лазера мощностью 4,4 кВт среднеуглеродистой стали системы легирования Fe–Cr–Mn–Si толщиной от 3 до 10,4 мм за один проход со сквозным проплавлением. По сравнению с аргонодуговой сваркой достигнуто сокращение машинного времени сварки в 6...12 раз, снижение расхода электроэнергии в 2,5...4,5 раза и присадочного металла в 12 раз.

Ключевые слова: лазерная сварка, среднеуглеродистая легированная сталь, проплавление, сварное соединение, твердость, производительность

Дуговую сварку А-ТИГ со сквозным проплавлением на весу успешно применяют для соединения стали толщиной до 6 мм, при большей толщине стали выполняют многопроходную сварку А-ТИГ + ТИГ со скошенными кромками путем заполнения стыка присадочным материалом. Однако аргонодуговая сварка является малопроизводительным процессом и характеризуется повышенным тепловложением в металл.

Для расширения номенклатуры свариваемых изделий и повышения качества их соединений рекомендуют применять лазерную сварку с более глубоким проплавлением [1]. По этой причине представляет интерес получение новых экспериментальных данных по оценке технологических особенностей лазерной сварки легированных сталей.

В работе исследованы особенности формирования стыковых соединений среднеуглеродистой стали системы легирования Fe–Cr–Mn–Si (ХГС) толщиной $S = 3; 6$ и $10,4$ мм при использовании Nd:YAG-лазера DY 044 («Рофин Синар», Германия) мощностью до 4,4 кВт, в том числе в комбинации со сваркой ТИГ. Излучение фокусировали линзой с фокусным расстоянием $F = 300$ мм. В качестве защитного газа использовали Ar, He, CO_2 , $\text{Ar} + 17\% \text{CO}_2 + 1\% \text{O}_2$ и N_2 .

Лазером приведенной мощности выполняют однопроходную сварку легированной стали толщиной 3 мм со скоростью $v_{\text{св}} \geq 150$ м/ч при погонном расходе электроэнергии $p/v_{\text{св}} \leq 29$ Вт·ч/м и погонной энергии сварки $q/v_{\text{св}} \leq 105$ Дж/мм (табл. 1, рис. 1). Уменьшение мощности лазерного излучения до 3 кВт (в 1,47 раза) вызывает необходимость пятикратного снижения скорости сварки и повышения в 3,4 раза $p/v_{\text{св}}$ и $q/v_{\text{св}}$. Для сквозного проплавления стали толщиной 6 мм

при мощности лазера 4,4 кВт в среде различных защитных газов [CO_2 , Ar и $(\text{Ar} + 17\% \text{CO}_2 + 1\% \text{O}_2)$] $v_{\text{св}}$ следует уменьшить до 60 и 48 м/ч и повысить $p/v_{\text{св}}$ до 73,3 и 91,6 Вт·ч/м, а $q/v_{\text{св}}$ до 264 и 330 Дж/мм. Сварка в углекислом газе со сквозным проплавлением на весу стали толщиной 10,4 мм выполняется с $v_{\text{св}} = 10,5...12,5$ м/ч, $p/v_{\text{св}} = 419...352$ Вт·ч/м и $q/v_{\text{св}} = 1509...1207$ Дж/мм. Значения последних параметров не характерны для лазерной сварки. Экстраполяция экспериментальных данных свидетельствует о возможности сквозного проплавления легированной стали толщиной 11,0...11,5 мм при снижении скорости сварки до 6...8 м/ч.

Для сварки стали толщиной до 6...7 мм целесообразно применять установку ДУ-044. По сравнению со способом А-ТИГ лазерную сварку легированной стали толщиной 3...6 мм выполняют с повышенной (в 8...12 раз) скоростью, меньшим (в 3,5...4,5 раза) расходом электроэнергии

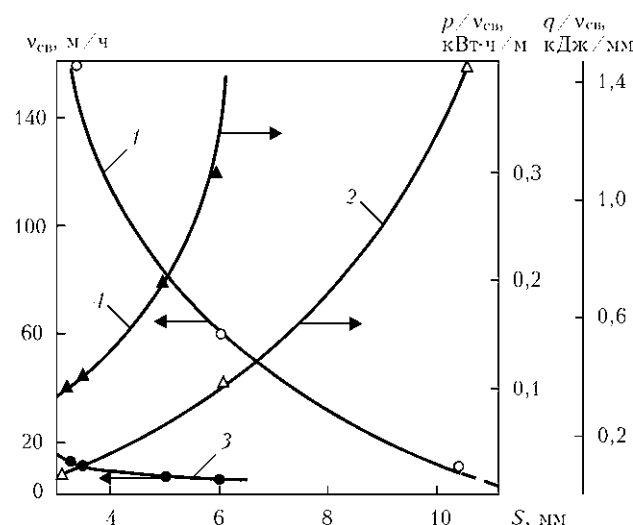


Рис. 1. Сопоставление скорости сварки, удельного расхода электроэнергии $p/v_{\text{св}}$ и погонной энергии $q/v_{\text{св}}$ при однопроходной сварке лазером мощностью 4,4 кВт (1, 2) и способе А-ТИГ (3, 4) от толщины свариваемой легированной стали

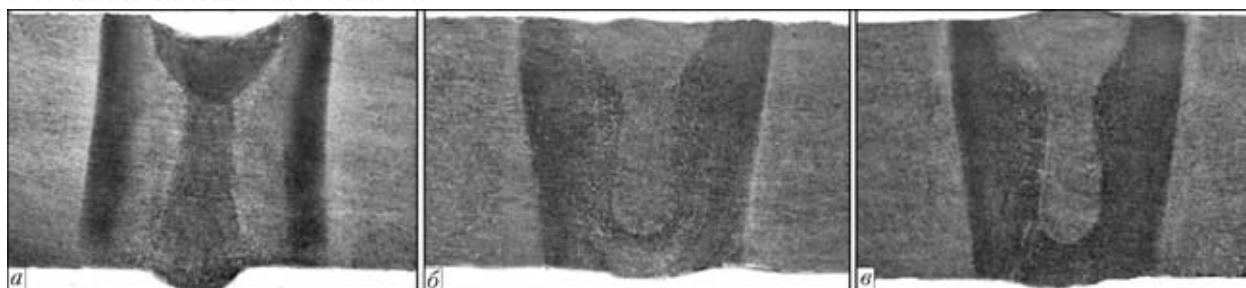


Рис. 2. Поперечные сечения стыковых соединений стали системы ХГС толщиной 10,4 мм с нескошенными кромками, полученных лазером мощностью 4,4 кВт за один (а) и несколько (б, в) проходов без (а, б) и с расплавлением (в) присадочной проволоки

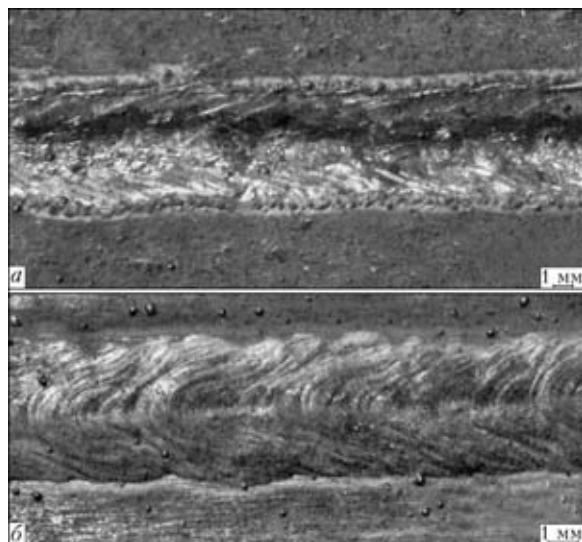


Рис. 3. Вид поверхности стыкового соединения легированной стали после лазерной сварки без (а) и с расплавлением (б) присадочной проволоки

и теплонасыщением металла, сниженным (в 4,5...7,5 раза) расходом защитного газа. Скорость сварки стали толщиной 10,4 мм с нескошенными кромками увеличивается приблизительно в 2 раза, а количество проходов сварки уменьшается в 3 раза по сравнению с аргонодуговой сваркой этой

же стали со скошенными кромками, что приводит к шестикратному сокращению машинного времени сварки. При этом суммарный расход защитного газа уменьшается в 3,0...3,5 раза, а электроэнергии — в 2,5...3,5 раза.

Швы, выполненные на стали толщиной 3, 6 и 10,4 мм лазером за один проход со сквозным проплавлением, имеют ширину соответственно 1,0...3,0; 1,5...3,5 и 3,5...6,0 мм. При этом большие значения относятся к лицевой стороне (рис. 2). В срединной части на глубине 0,3...0,8 толщины стали швы могут быть уже. Шов, выполненный на стали толщиной 10,4 мм, может иметь проседание до 2...3 мм и провисание на 1...2 мм, для уменьшения которых необходимо совместное повышение скорости и мощности лазерного излучения.

Целесообразно выполнение дополнительных проходов сварки с неполным проплавлением и автоопрессовкой сварного соединения. Улучшению формирования поверхности проплава способствует также использование защитных газов, в том числе в составе смеси с углекислым газом. Визуально определенная ширина зоны термического влияния (ЗТВ) по обе стороны стыков стали толщиной 3, 6 и 10,4 мм составляет 0,2...0,5 и 1,5...3,0 мм и находится в обратной зависимости от скорости сварки. На поверхности сварных соединений имеют место прилипания капли расплавленного металла (рис. 3), частота размещения которых увеличивается с возрастанием плотности мощности и энергии лазерного пятна.

Несквозные проплавления лазером стали толщиной 10,4 мм имеют грибовидную форму (рис. 4). Под действием реактивного давления, образующегося в лазерном пятне металлического пара, происходит выдавливание и перемещение расплава из-под лазерного луча в хвостовую и боковые части ванны, выбрасывание жидких и твердых частиц, формирование узкого газометаллического канала глубиной, равной глубине

Таблица 1. Возможности сквозного лазерного проплавления легированной стали

Толщина стали, мм	Р, кВт	Защитный газ	$v_{св}$, м/ч	$q/v_{св}$, Дж/мм	Ширина, мм	
					шва	ЗТВ
3	3,0	CO ₂	30	360	3,0/2,5	—
		Ar	30	360	2,6/2,8	—
		Ar + 17 % CO ₂ + 1 % O ₂	30	360	2,5/3,0	—
3	4,4	CO ₂	150	105,6	1,1/1,3	0,4...0,6
		Ar	150	105,6	1,1/1,3	0,4...0,5
		Ar + 17 % CO ₂ + 1 % O ₂	150	105,5	1,4/1,1	0,4...0,6
6	4,4	CO ₂	60	264,0	2,8/1,0	0,3...0,4
		Ar	48	330,0	3,6/3,3	0,4...0,8
		Ar + 17 % CO ₂ + 1 % O ₂	48	330,0	4,1/3,7	0,5...0,7
10,4	4,4	CO ₂	10,5	1267,2...	5,6/4,6	2,0...4,0
			12,5	1508,6		

Примечание. В числителе приведены значения ширины с лицевой стороны, а в знаменателе — с обратной.



Таблица 2. Химический состав металла после лазерного проплавления легированной стали в различных защитных газах

Защитный газ (смесь)	C	Si	Mn	Cr
Ar	0,33...0,34/0,33	1,05...1,10/1,07	0,75...0,87/0,82	0,85...0,97/0,91
CO ₂	0,33...0,34/0,33	1,02...1,10/1,05	0,71...0,77/0,74	0,81...0,90/0,87
Ar + 17 % CO ₂ + 1 % O ₂	0,27...0,32/0,30	0,97...1,04/1,01	0,70...0,73/0,72	0,80...0,86/0,81
He	0,31...0,33/0,32	0,92...1,05/1,01	0,68...0,77/0,74	0,84...0,93/0,87
N ₂	0,28...0,33/0,30	1,06...1,10/1,03	0,75...0,77/0,76	0,80...0,86/0,82

Примечания. 1. В числителе приведены данные пределов значения массовой доли химических элементов, полученные после четырех анализов по высоте проплавления, а в знаменателе — усредненные значения. 2. Основной металл содержит, мас. %: 0,33 C; 1,10 Si; 1,00 Mn; 0,98 Cr.

проплавления. Проплавление за пределами газометаллического канала происходит путем нагрева и расплавления перегретым расплавом и высокотемпературной парогазовой смесью.

Параметры проплавления зависят от используемых защитных газов (Ar, He, Ar + 17 % CO₂ + 1 % O₂, N₂ и CO₂). Ионизированный газометаллический поток (сварочный факел) является достаточно прозрачным для лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм [2]. В связи с этим при использовании таких инертных газов, как аргон и гелий с потенциалами ионизации U_p , отличающимися в 1,56 раза, имеет место практически одинаковая глубина проплавления (8,4...8,6 мм), которая увеличивается при использовании углекислого газа в отдельности или в составе смеси Ar + 17 % CO₂ + 1 % O₂.

Лазерная сварка стали 30ХГСА в защитных газах CO₂, Ar, He, Ar + 17 % CO₂ + 1 % O₂ и N₂ сопровождается снижением содержания углерода, кремния, хрома, марганца (табл. 2), которое остается (за исключением марганца) в пределах требований ГОСТ 4543–71, мас. %: 0,28...0,35 C; 0,90...1,20 Si; 0,80...1,10 Mn и Cr. При использовании инертных газов в швах могут образовываться поры, отсутствующие после сварки в CO₂ и N₂ (рис. 4). Сварку легированных сталей рекомендуется выполнять в углекислом газе.

Металл соединения легированной стали, сваренной лазером, имеет повышенную твердость по сравнению с основным металлом. У шва, выполненного на стали толщиной 3 мм, она возрастает от HV 0,2 — 375 до HV 0,2 — 450 при повышении

$v_{св}$ от 30 до 150 м/ч со снижением $q/v_{св}$ от 360 до 106 Дж/мм (рис. 5). Уменьшение скорости сварки и увеличение ее погонной энергии при выполнении шва на стали толщиной 10,4 мм обуславливает снижение твердости металла до HV 0,2 — 240...340/305 и HV 0,2 — 230...280/265 после одного и трех проходов. Несмотря на повышенную твердость металла соединения, появление холодных трещин после лазерной сварки среднеуглеродистой легированной стали не происходит.

Получение качественного стыкового соединения легированной стали повышенной толщины с большей скоростью характерно для вертикальной и двусторонней лазерной сварки. При вертикальной сварке легированной стали толщиной 10,4 мм с $v_{св} = 15,6$ м/ч ширина шва составляет 5...6 (с лицевой стороны), 2,5...3 мм (с обратной), а на глубине 2,0...2,1 мм — 1,6...1,8 мм (рис. 6, а). Форма и строение соединения после двухпроходной сварки сохраняются в целом такими, как и при односторонней сварке в нижнем положении. Для получения качественного соединения нет необходимости использовать сварочную проволоку и формирующие устройства.

Двустороннее лазерное проплавление стыка глубиной 6 мм с перекрытием слоев осуществимо при $v_{св} = 48$ м/ч, когда $q/v_{св}$ снижается до 330 Дж/мм. При этом машинное время сварки, суммарный расход электроэнергии и защитного газа сокращаются в 2,0...2,2 раза по сравнению со сваркой в нижнем положении. Полученное со-

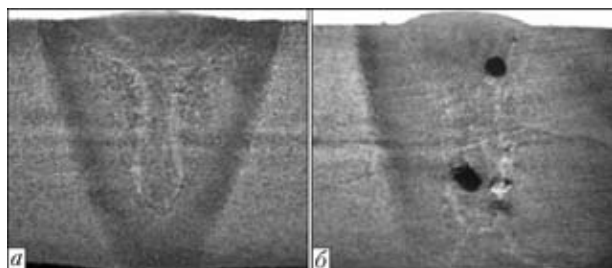


Рис. 4. Несквозные лазерные проплавления в углекислом газе (а) и аргоне (б) стали 30ХГСА толщиной 10,4 мм

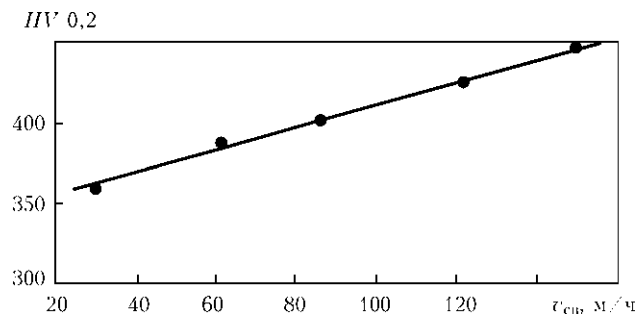


Рис. 5. Зависимость твердости металла шва, выполненного на стали 30ХГСА толщиной 3 мм, от скорости лазерной сварки

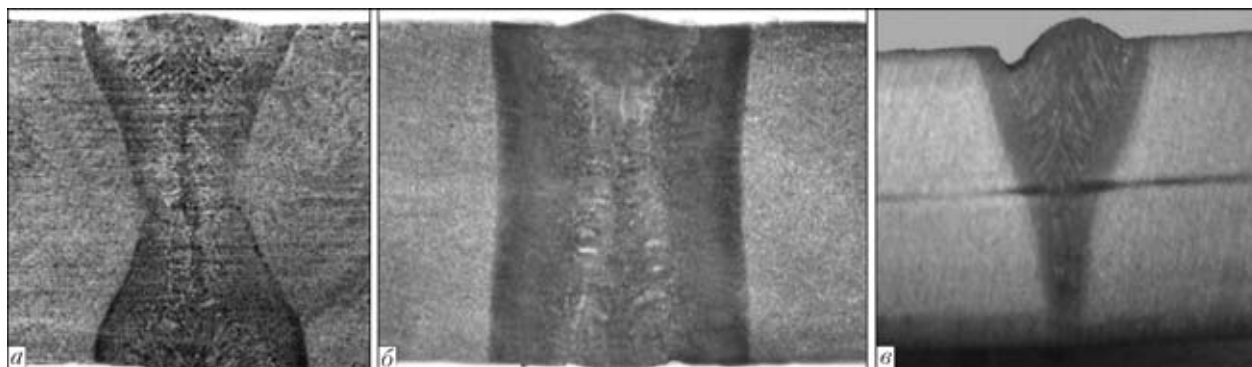


Рис. 6. Макрошлифы соединений термоупрочненной (а, б) и нетермообработанной (в) стали толщиной 10,4 мм, полученные лазерной вертикальной (а), двусторонней (б) и гибридной (в) сваркой

единение характеризуется отсутствием занижений, наличием небольших усиления и незначительной шириной шва (3,5 мм с обеих сторон и 1,2...2,0 мм в срединной части), уменьшенной шириной визуально выявляемой ЗТВ термоупрочненной стали (от 0,5...1,2 мм у поверхности до 1,4...1,6 мм на глубине 2...3 мм) (рис. 6, б).

В состоянии после сварки плоский образец легированной стали с $\sigma_{0,2} = 830...850$ МПа и $\sigma_B = 940...970$ МПа выдерживает 34900 циклов нагрузки растяжением до $\sigma_H = 550$ МПа, разрушаясь за пределами соединения в месте перехода от рабочей части к захватной.

Известно, что глубину проплавления и скорость сварки можно увеличивать, совмещая лазерный луч и дугу неплавящегося электрода [3]. Наибольший эффект достигается при сведении двух источников нагрева в одну сварочную ванну. Скорость гибридной сварки со сквозным проплавлением стали толщиной 10,4 мм может составлять 35...40 м/ч (рис. 6, в). При таких же параметрах режима сварки глубина проплавления этими источниками тепла в отдельности равна 2,5...3,0 и 5,0...5,5 мм, т. е. в сумме меньше 10 мм. Естественно, что при меньшей скорости гибридной сварки возможно сквозное проплавление стали и большей толщины.

Выводы

1. Установлено, что при мощности лазера 4,4 кВт стыковые соединения легированной стали толщиной до 10,4 мм выполнимы в нижнем положении со сквозным проплавлением нескошенных кромок.

2. Качество формирования соединения улучшают путем регулирования скорости и погонной энергии, выполнения дополнительных проходов и осуществления двусторонней и вертикальной сварки.

3. При использовании лазерного излучения мощностью до 4,4 кВт машинное время сварки сокращается в 6...12 раз, расход электроэнергии снижается в 2,5...4,5 раза, защитного газа в 3...7,5 раза и присадочной проволоки до 12...13 раз по сравнению с аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом. Содержание основных легирующих элементов и углерода остается на приемлемом уровне, а марганца снижается на 18...28 %.

1. Григорянц А. Г., Шиганов И. Н. Лазерная сварка металлов. — М.: Высш. шк., 1988. — 207 с.
2. Исследование сварочного факела при сварке мощными волоконными лазерами / П. Ю. Щеглов, А. В. Гуменюк, М. Ретмайер и др. // V Междунар. конф. «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов»: Программа и тез. докл. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2011. — С. 50–51.
3. Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов / И. В. Кривцун, В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин и др. // Автомат. сварка. — 2007. — № 5. — С. 49–53.

Technological peculiarities of 4.4 kW Nd: YAG-laser welding of medium-carbon steel of the Fe–Cr–Mn–Si alloying system, 3 to 10.4 mm thick, in one pass with through penetration have been studied. Compared with argon-arc welding, the present welding method provides 6...12 times reduction in machine welding time, 2.5...4.5 times decrease in power consumption, and 12 times decrease in consumption of filler metal.

Поступила в редакцию 16.02.2012



ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВОДОРОДА НА ЗАМЕДЛЕННОЕ РАЗРУШЕНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Н. Н. ХАРБИН, инж., **О. И. СЛЕПЦОВ**, д-р техн. наук,
М. Н. СИВЦЕВ, **Г. Г. ВИНОКУРОВ**, кандидаты техн. наук
(Ин-т физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, г. Якутск)

Исследовано влияние водорода на замедленное разрушение сварных соединений высокопрочных низколегированных сталей по методу имплант. На основе теории ползучести материалов предложена расчетная модель для оценки вклада водорода на процесс замедленного разрушения.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварные соединения, высокопрочные низколегированные стали, замедленное разрушение, расчетная модель

При сварке высокопрочных низколегированных сталей происходит образование холодных трещин, которые появляются при неблагоприятном сочетании структурных факторов (интенсивный рост зерна, высокий уровень напряжений и деформаций) и повышенном содержании водорода [1]. Причиной образования холодных трещин является инициирование водородом холодного растрескивания [2, 3]. Влияние водорода проявляется в замедленном характере процесса разрушения [4, 5]. В связи с этим актуальна разработка методов адекватной оценки влияния водорода на процесс разрушения сварных соединений.

Одним из путей определения склонности сварных соединений к замедленному разрушению является использование метода имплант, который сочетает определенные признаки прямых и косвенных методов испытания сварных соединений на чувствительность к образованию холодных трещин.

Целью настоящей работы является разработка на основе теории ползучести расчетной модели для оценки вклада водорода в процесс замедленного разрушения сварных соединений высокопрочных низколегированных сталей.

Испытывали образцы-вставки из сталей 14Х2ГМР и Т-1 (таблица) по форме и размерам соответствующих ГОСТ 26386–84.

Наплавку валика с образцом-вставкой выполняли электродами АНП-2 диаметром 4 мм на режиме: $I_{св} = 170$ А; $U_d = 25$ В; $v_{св} = 10$ см/мин. Содержание диффузионного водорода в валике определяли глицериновым методом. Фиксировали разрушающее напряжение в ослабленном се-

чении σ_p и время до разрушения τ_p . Результаты испытаний (рис. 1) подтвердили ведущую роль диффузионного водорода в процессе замедленного разрушения сварных соединений из низколегированных сталей, что согласуется с данными работы [6]. Склонность образцов-вставок, изготовленных из указанных сталей, к замедленному разрушению оказалась приблизительно одинаковой (рис. 1).

Механизм замедленного разрушения сварных соединений сталей характеризуется общими признаками разрушения материала при ползучести [2]. Так, в работе [7] при рассмотрении развития трещин при релаксации напряжений в качестве частного случая разрушения в условиях ползучести для оценки трещиностойкости материалов была предложена расчетная модель, в основе которой использовали принцип Ю. Н. Работнова.

В настоящей работе методика проводимых испытаний позволяет контролировать силовые параметры, поэтому значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в расчетной модели работы [7] целесообразно заменить на силовые параметры. При этом получена следующая модель:

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_b} = \frac{1}{1 + m\tilde{q}\tilde{\Gamma}(\tau)}, \quad (1)$$

где

Химический состав (мас. %) сталей 14Х2ГМР и Т-1

Марка стали	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Ti	B	S	P
14Х2ГМР	0,12	1,12	0,32	1,35	0,08	0,38	0,01	0,045	0,0050	0,045	0,023
Т-1	0,21	0,95	0,31	0,54	Не опр.	0,18	0,08	0,028	0,0035	0,017	0,010

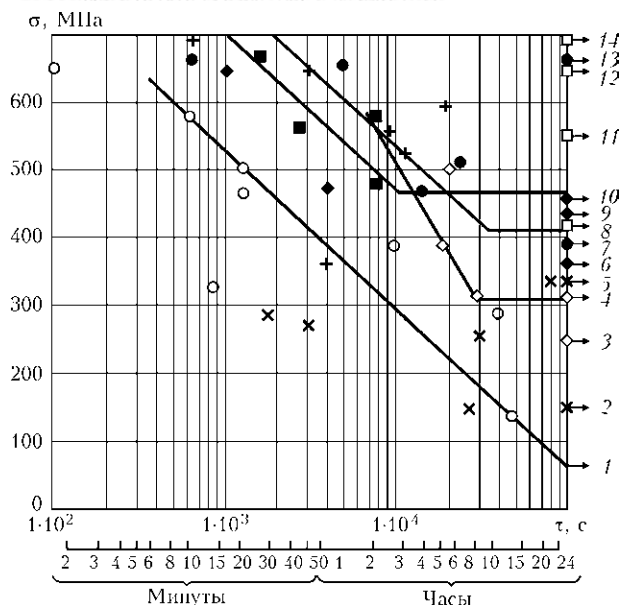


Рис. 1. Экспериментальные данные о влиянии диффузионного водорода $[H]_{\text{диф}}$ на склонность образцов-вставок к замедленному разрушению сталей 14Х2ГМР (1, 3, 4, 6, 7, 9, 11, 12, 14) и Т-1 (2, 5, 8, 10, 13): 1 — $[H]_{\text{диф}} = 14,8 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ($T_{\text{ср}} = -40^\circ \text{C}$); 2 — $[H]_{\text{диф}} = 15,0 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ($T_{\text{ср}} = -25^\circ \text{C}$); 3, 4 — $[H]_{\text{диф}} = 5,0 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ($T_{\text{ср}} = -40^\circ \text{C}$); 5 — $[H]_{\text{диф}} = 7,9 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ($T_{\text{ср}} = 20^\circ \text{C}$); 6, 9 — $[H]_{\text{диф}} = 5,0 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ($T_{\text{ср}} = 20^\circ \text{C}$); 7 — $[H]_{\text{диф}} = 7,9 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ($T_{\text{ср}} = 20^\circ \text{C}$); 8, 10 — $[H]_{\text{диф}} = 5,0 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ($T_{\text{ср}} = 20^\circ \text{C}$); 11, 12, 14 — $[H]_{\text{диф}} = 0,6 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ($T_{\text{ср}} = -40^\circ \text{C}$); 13 — $[H]_{\text{диф}} = 0,6 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ($T_{\text{ср}} = 20^\circ \text{C}$)

$$\tilde{\Gamma}(\tau) = \int_0^{\tau} \Gamma(\tau - S) dS; \quad m = \frac{1}{1+p};$$

σ_v — временное сопротивление; σ_p — напряжение, при котором образец разрушился; q — структурный параметр, связанный с КИН; $\Gamma(\tau - S)$ — ядро последствия; $p = p([H])$ — энергетический параметр системы (образца) [7], в данном случае функция, зависящая от содержания водорода.

Рассмотрим предельные случаи модели (1).

Когда система незамкнута, $p = p([H]) \rightarrow \infty$ ($m = 0$), т. е. содержание водорода достаточно мало и сопротивление системы разрушению не зависит от концентрации водорода. При пресыщении водородом, когда $p = p([H]) \rightarrow 0$ ($m = 1$), влияние водорода максимальное, также трещиностойкость системы зависит от структурного параметра q ($0 < q < 1$ [7]). Следовательно, параметр m предлагаемой модели (1) изменяется в интервале $[0...1]$.

Результаты расчетов по формуле (1) в сопоставлении с экспериментальными данными представлены на рис. 2. Расчеты проводили при различных значениях параметра p ($q = \text{const}$) и со следующими видами ядра интегрального оператора, описывающего последствие [7]:

1) постоянное ядро (тело Максвелла)

$$\Gamma(\tau - S) = \lambda, \quad (2)$$

где λ — постоянная материала;

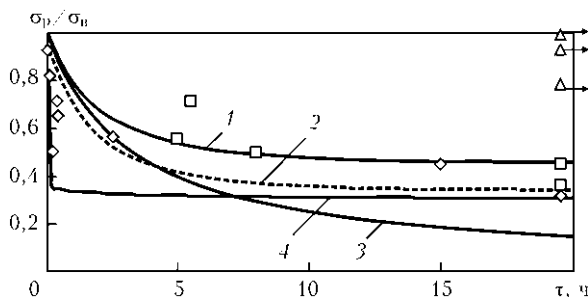


Рис. 2. Расчетные (кривые 1–4) и экспериментальные данные (значки) с разными ядрами последствия: 1, 2 — ядро последствия тела Кельвина при соответственно содержании в образце $[H]_0 = 5,0$ и $15 \text{ мл}/100 \text{ г}$; 3 — ядро Максвелла при $[H]_0 = 5,0 \text{ мл}/100 \text{ г}$; 4 — степенное ядро при $[H]_0 = 15 \text{ мл}/100 \text{ г}$

2) экспоненциальное ядро (стандартное линейное тело Кельвина)

$$\Gamma(\tau - S) = \lambda_1 e^{-\beta(\tau - S)}, \quad (3)$$

где λ_1 , β — реологические постоянные;

3) степенное ядро

$$\Gamma(\tau - S) = \frac{\lambda}{(\tau - S)^{1-\beta}}, \quad (4)$$

где $0 < \beta < 1$.

Как видно из этих формул, первый член ряда в разложении экспоненциального ядра (3) и степенное ядро (4) при $\beta \rightarrow 1$ дают ядро тела Максвелла (2).

Расчеты по модели (1) с использованием указанных ядер последствия показали, что лучше всего экспериментальные данные описываются экспоненциальным ядром (3) тела Кельвина (рис. 2). Ядро максвелловского типа (2) при максимальном содержании водорода приводит к несколько заниженным результатам, но при его умеренном содержании удовлетворительно описывает экспериментальные данные. Степенное ядро (4) неудовлетворительно описывает начальные участки, но его можно использовать при более продолжительных испытаниях (рис. 2).

Анализ расчетных кривых показал, что существует возможность оценивать влияние соответственно водородного и структурного факторов на разрушение параметрами m и q . Причем пределом

функции $\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{\sigma_p}{\sigma_v}(\tau)$ при использовании экспонен-

циального и степенного ядер последствия можно оценить минимальное значение разрушающего напряжения $\sigma_{p_{\min}}$ при различном содержании водорода. Так, при максимальном содержании водорода ($p = 0$) данная величина при использовании тела Кельвина (3) оценивается на уровне $\sigma_{p_{\min}} \approx 231 \text{ МПа}$ ($\sigma_p/\sigma_v \approx 0,33$ при $\tau \rightarrow \infty$), а в случае использования степенного ядра последствия (4)

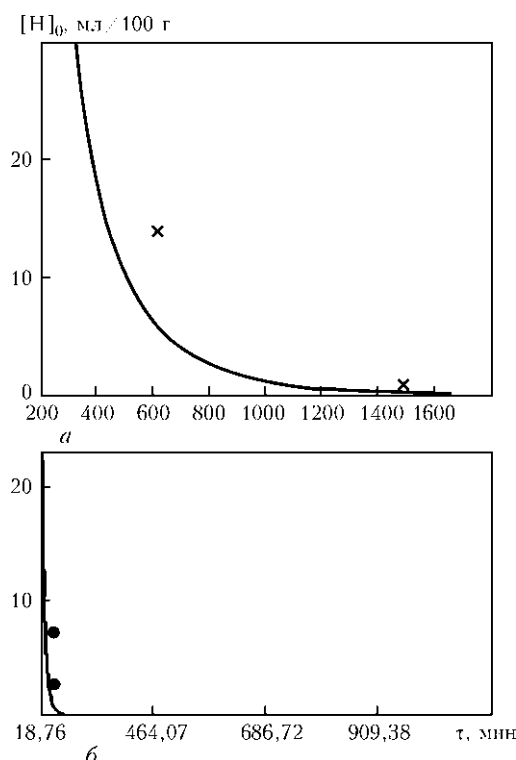


Рис. 3. Влияние содержания водорода в образцах на замедленное разрушение при нагрузках $\sigma_p = 300$ (x) и 650 МПа (•) (x, • — экспериментальные точки)

имеем $\sigma_{p_{\min}} = 210$ МПа ($\sigma_p / \sigma_B = 0,3$ при $\tau \rightarrow \infty$).

Поскольку оценки были получены для случая с максимально возможным содержанием водорода в образце, то следует ожидать, что при реальном содержании водорода минимальное значение разрушающего напряжения близко к экспериментальному результату (для стали 14Х2ГМР) $\sigma_{p_{\min}} = 240$ МПа [2].

Удовлетворительное описание расчетными кривыми экспериментальных результатов позволяет проводить оценку времени до разрушения в зависимости от содержания водорода. В первом приближении для качественной оценки влияния водорода на время разрушения использовали простейшее ядро Максвелла (2). Подставив (2) в (1), получим оценку времени до разрушения

$$\tau = (p + 1) \frac{1 - k}{k\lambda q}, \quad (5)$$

где $k = \sigma_p / \sigma_B$.

На основе анализа эмпирических данных, а также с учетом экспоненциального характера термоактивационной зависимости, описывающей энергетические взаимодействия, параметр p определяли с помощью соотношения:

Hydrogen influence on delayed fracture of welded joints of high-strength low-alloyed steels was studied by the implant method. A calculation model based on material creep theory was proposed for assessment of hydrogen contribution to delayed fracture process.

$$p([H]) = \ln \left(1 + \frac{[H]_{\max} - [H]_0}{[H]_0} \right), \quad (6)$$

где $[H]_{\max}$ — максимальное содержание водорода (зависит от марки стали и определяется эмпирически); $[H]_0$ — содержание водорода в образце, определенное глицериновым методом.

Влияние содержания водорода на замедленное разрушение образца, полученное по формулам (5), (6), показано на рис. 3. Как видно из рисунка, характер кривых при различных нагрузках не меняется. Однако при понижении содержания водорода кривая смещается в сторону увеличения времени до разрушения, что соответствует росту сопротивления образцов замедленному разрушению. Результаты расчетов времени до разрушения образца в зависимости от содержания водорода на основе простейшего ядра тела Максвелла дают основания полагать, что при использовании более сложных ядер можно более точно описать этот процесс, но качественная картина при этом не изменится. Таким образом, расчеты, проведенные по предложенной модели, показали, что при снижении содержания водорода увеличивается сопротивление сварных соединений замедленному разрушению. Расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными.

Предлагаемая расчетная модель может использоваться для оценки влияния водорода на технологическую прочность сварных соединений высокопрочных низколегированных сталей. Сравнительная простота расчетов по этой модели позволяет значительно облегчить исследование механизмов замедленного разрушения сварных соединений под воздействием водорода.

1. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 248 с.
2. Походня И. К., Швачко В. И. Физическая природа обусловленных водородом холодных трещин в сварных соединениях конструкционных сталей // Автомат. сварка. — 1997. — № 5. — С. 3–12.
3. Graville B. A short review of weld metal hydrogen cracking // Weld. World. — 1986. — 24, № 9/10. — P. 190–198.
4. Повышение прочности сварных конструкций для Севера / О. И. Слепцов, В. Е. Михайлов, В. Г. Петушков и др. — Новосибирск: Наука, 1989. — 223 с.
5. Замедленное разрушение металлоконструкций / В. Е. Михайлов, В. В. Лепов, В. Т. Алымов, В. П. Ларионов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. — 224 с.
6. Касаткин Б. С., Бреднев В. И. Особенности механизма образования холодных трещин в сварных соединениях низколегированных высокопрочных сталей // Автомат. сварка. — 1985. — № 8. — С. 1–6, 18.
7. Чижик А. А., Ланин А. А. Трещиностойкость материалов в условиях релаксации напряжений // Оценка трещиностойкости материалов и сварных соединений: Тр. ЦКТИ. — 1985. — 218. — С. 39–50.



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ДУГИ И ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ E6013

А. ГАРСИЯ-РОДРИГЕС, К. Р. ГОМЕС ПЕРЕС, Р. КУИНТАТА ПУЧОЛ, инженеры
(Центральный ун-т «Марта Абрэ», провинция Лас-Вильяс, Санта Клара, Вилья Клара, Куба)

Дана оценка характеристик продолжительности и частоты коротких замыканий, а также электропроводимости при повторном зажигании дуги при сварке двумя типами покрытых электродов E6013. Определены режимы, при которых гарантируется наибольшая стабильность процесса дуговой сварки и влияние на него состава покрытия.

Ключевые слова: дуговая сварка, покрытый электрод, электрический заряд, перенос металла, зажигание дуги, стабильность процесса

Использование неорганических компонентов покрытий, которые при высоких температурах образуют тонкие поверхностные оксидные слои полупроводниковых элементов, позволяет выполнять сварку на прямой полярности и переменном токе, поскольку эти слои постоянно обеспечивают новые участки эмиссии заряженных частиц на конце электрода [1].

Тепловая энергия от прохождения электронов по металлическому сердечнику в электрическом поле расходуется на разложение компонентов покрытия. Она также приводит к испарению металлических и неметаллических компонентов и обеспечивает взаимодействие химических элементов в газообразном состоянии, частично ионизируя их и создавая плазму для зажигания сварочной дуги и дает необходимую энергию для надлежащего хода процесса [2].

Электрическая функция покрытия позволяет инициировать зажигание дуги и ее повторное зажигание, а также поддерживать горение дуги, сначала снижая работу выхода электронов из металла проволоки-электрода, а затем вводя элементы, которые распадаются в газообразном состоянии с низкой энергией ионизации. Поскольку распад и ионизация представляют собой эндотермические процессы, для газовой фазы, образующейся при распаде покрытия, с большим потенциалом ионизации требуется больше энергии для того, чтобы перевести ее в состояние плазмы.

Энтальпии элементов, вовлеченных в реакции рекомбинации, будут больше в составах, которые содержат элементы с большим потенциалом ионизации, необходимые для создания условий, гарантирующих надлежащее зажигание и поддержание горения дуги, и, в свою очередь, высокую эф-

фективность процесса переноса тепла. Химический и минералогический состав покрытия, содержание составляющих элементов и методики, методы и технологии изготовления электродов определяют их электрические характеристики.

Классификация электродов E6013 согласно спецификации ANSI/AWS A5.1 относит покрытие электрода как композицию с высоким содержанием оксида титана, а для стабилизации дуги в основном используется калий. Такие электроды демонстрируют хорошие рабочие характеристики и могут использоваться для сварки как на переменном, так и постоянном токе прямой и обратной полярности во всех положениях [3]. Электроды разных классификаций удовлетворяют определенным требованиям спецификаций в отношении химического состава наплавленного металла и механических свойств, уровней содержания влаги в покрытии, положений сварки, типа и полярности сварочного тока и т. д.

Целью настоящей работы является оценка характеристик электропроводимости при повторных зажиганиях, продолжительности и частоты коротких замыканий как показателей процессов переноса металла и электрического заряда, которые создаются при гравитационной сварке двумя типами покрытых электродов E6013 с различным химическим составом покрытия на переменном токе 160 А с одним и тем же углом наклона по отношению к свариваемой пластине.

Различия электрических характеристик покрытых электродов при различном химическом составе покрытия позволяют оценить влияние компонентов покрытия на работоспособность электрода и согласовать соответствующие методы для оценки электрических свойств электродов при разработке, изготовлении и тестировании этих сварочных расходных материалов, а также определить соотношение их цены и свойств.

Материалы и методы. Рассмотрим два типа электродов E6013 со средним диаметром сердеч-



ника 3,9 мм: один испанского производства торговой марки WURTH с покрытием бело-серого цвета, средней толщиной 5,83 мм, который обозначим символом Е, и электрод Е6013 марки ACI-NOX, изготовленный на Кубе, с покрытием темно-серого цвета и средней толщиной 5,77 мм, который обозначим символом С. Оба типа электродов имеют среднюю длину 349,6 мм. Группы электродов измеряли посредством случайной выборки без замены по 18 образцов каждого типа, извлеченных из герметичной промышленной упаковки.

Состав покрытия определяли в соответствии с сертифицированными методиками [4, 5] и их результаты представлены в табл. 1.

Образцы электродов для определения характеристик произвольно выбирали из промышленной упаковки. Промышленные электроды выпускают сериями, а в упаковке запаковывают электроды одной серии, что гарантирует в установленных пределах практически одинаковый состав как покрытия электродов, так и металлического сердечника. Результаты химического анализа оцениваемых сварочных материалов показывают различия в химическом составе по некоторым компонентам покрытия, что определяет основную переменную для сравнительных испытаний. Во время сварочных экспериментов использовали устройство для гравитационной сварки, гарантирующее условия, при которых изменения стабильности горения дуги вызываются только характеристиками покрытого электрода [6]. Для цифрового отбора значений напряжения и тока использовали установку, состоящую из сварочного трансформатора, преобразователя сигналов сварочного тока и напряжения в диапазоне $-5...+5$ В для ввода в компьютер, где аналоговые сигналы оцифровываются 12-битовым аналого-цифровым преобразователем платы сбора данных типа Advantech PCI-1710 с частотой выборки до 100 кГц, запрограммированным на получение 5 тыс. образцов в секунду во время эксперимента [7, 8].

Последовательность операций при проведении эксперимента. Для исследования влияния режима сварки выбрали две группы по девять электродов типа Е и С соответственно (Е6013 [3] диаметром 4 мм) для сварки на переменном токе 125, 140 и 160 А. С помощью случайной выборки без замены отбирали 18 электродов. Все они подвергались идентификации, определению размеров и визуальной оценке, для того, чтобы гарантировать отсутствие таких дефектов, как трещины, отколы и недопустимые отклонения эксцентриситета покрытия, а также отличия в массе и размерах от средних, указанных производителем. Для определения размеров использовали прибор типа «Foot of King» с разрешением 0,05 мм, а для определения массы — сертифицированные цифровые ве-

сы марки SARTORIUS с точностью измерения 0,1 г.

Эксперимент включает две схемы: в первой схеме независимой переменной является значение сварочного тока, которое варьировалось на трех уровнях (125, 140 и 160 А) для определения наиболее стабильного режима сварки для обоих типов электродов; во второй схеме независимой переменной выступал химический состав покрытия, который варьировался на двух уровнях для сравнения поведения электродов этих двух типов при сварке на наиболее стабильном режиме. Для каждой отличной независимой экспериментальной единицы (электрода) и для каждого уровня тока были сделаны по два повторных испытания, всего было выполнено 18 наплавов при гравитационной сварке. Наплавки выполняли на пластины из углеродистой стали Ст3 размером $200 \times 50 \times 10$ мм в соответствии с российскими и украинскими нормами национальных стандартов.

Сравнительный статистический анализ выполняли между группами и внутри групп с учетом методов дисперсионного анализа (ANOVA) [9], но основываясь на непараметрических критериях проверки статистической гипотезы.

Все электроды, используемые в эксперименте, подвергали процессу просушки (в течение 1 ч при температуре до 120 °С) [10].

Определение наиболее стабильного режима. Базовая методика определения наиболее стабильного режима работы для обоих типов электродов описана в работах [6, 8]. Методика, примененная в этой работе, основывается на непараметрическом типе обработки, в котором для проведения анализа между группами (различные уровни тока)

Таблица 1. Химический состав покрытий электродов типа Е и С, мас. %

Объект определения	Е	С
SiO ₂	28,63	31,95
Al ₂ O ₃	0,63	0,63
Fe ₂ O ₃	3,3	3,32
TiO ₂	38,34	30,30
CaO	6,23	8,63
MgO	0,24	0,19
Na ₂ O	0,18	0,96
K ₂ O	4,37	5,52
P ₂ O ₅	0,04	0,03
MnO	5,34	3,07
SO ₃	0,13	0,13
PPI*	10,10	12,04
Всего	97,53	96,77

* Потеря зажигания при 1000 °С.



применяется критерий Муда. Этот критерий подтверждает гипотезу, что медиана (среднее значение) девяти распределений является одинаковой при выполнении подсчета количества наблюдений в каждом образце в любую сторону от «генеральной медианы» (общего среднего). Если для критерия Chi-квадрат $P \leq 0,05$, медиана образцов (среднее значение) значительно отличается с уровнем определенности (достоверности) 95 %, т. е. распределения чувствительны к изменениям режима.

Критерий Краскела–Уоллиса использовали для анализа внутри групп (повторные испытания на одном значении тока), подтверждая гипотезу, что медианы образцов, взятые при одинаковом значении тока, аналогичны. Данные объединяли и отсортировывали от меньшего к большему, показывая средний диапазон для каждого распределения. Если $P \geq 0,05$, можно утверждать, что между средними значениями любой из трех отобранных групп нет значительных различий, что указывает на то, что на заданном уровне тока получают статистически одинаковые распределения с достоверностью 95 %. По результатам анализа оценок отклонения абсолютного отклонения от медианы (АОМ) и интерквартильной широты IQR совпадение в обеих группах электродов представляет более стабильное поведение на режиме 160 А, что согласуется с результатами из [8], теоретическими расчетами и экспериментальными данными.

Поведение двух типов электродов при наиболее стабильном режиме (160 А). Перенос металла при коротких замыканиях. Определение продолжительности и частоты коротких замыканий [8, 11, 12], которое используется в данном исследовании, отличается от методологий, традиционно используемых при оценке стабильности переноса металла при коротких замыканиях [7, 13–16]. Используя специальные программы для выделения подобных параметров, начиная с напряжения и сварочного тока, с помощью статистической обработки можно получить вероятностные распределения каждого из них (рис. 1, 2).

С помощью критериев Шапиро–Вилка [17, 18] при определении степени отклонения от нормального распределения обоих параметров установлено, что данные распределения не могут считаться нормальными. Для определения показателей среднего значения и отклонения обоих параметров используют непараметрический метод. С помощью медианного критерия Муда [19] средние значения определяют в соответствии с гипотезой, что распространения одинаковы. Поскольку P — величина для критерия Chi-квадрат больше 0,05, медиана образцов статистически одинакова с достоверностью 95 %.

При определении частоты коротких замыканий критерий Муда применили к шести экспериментам в соответствии с P параметром, где медианы аналогичны при уровне определенности 95 %. В качестве показателя отклонения для каждого параметра X использовали оценку по абсолютному отклонению медиан (АОМ) [20]:

$$\text{АОМ} = \text{медиана} (\text{ABS} (X - \text{медиана}(X)))$$

Оценка продолжительности коротких замыканий электродов типа С1(22) по АОМ составляет 1,4 мс; С2(23) — 1,8; С3(33) — 1,6 (среднее значение 1,6), а для электродов типа Е1(22) и Е2(23) — 1,4; Е3(33) — 1,6 (среднее значение 1,46). Оценка периодичности коротких замыканий для электродов типа С1(22) составляет 48,4 мс; С2(23) — 42; С3(33) — 43 (среднее значение 44,46), а для электродов типа Е1(22) — 38,1; Е2(23) — 43,2; Е3(33) — 39,7 (среднее значение 40,33).

При оценке продолжительности коротких замыканий для электродов типа С наблюдается большое отклонение (на 8,33 %) по сравнению с электродами типа Е. В случае с периодичностью коротких замыканий наблюдается разница на 9,28 % при сравнении обоих параметров. Большая нестабильность при переносе металла при коротких замыканиях наблюдается при сварке электродами типа С.



Рис. 1. Вероятностное распределение продолжительности коротких замыканий для шести экспериментов

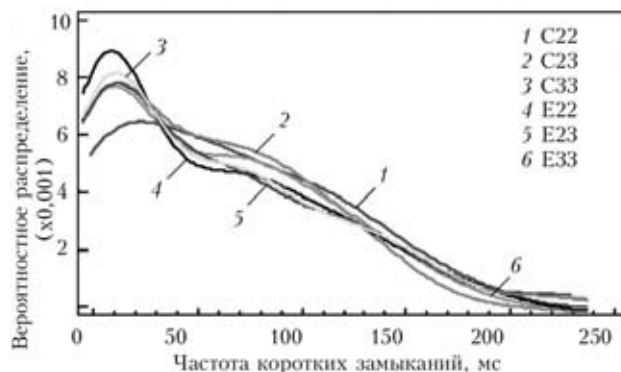


Рис. 2. Вероятностное распределение частоты коротких замыканий

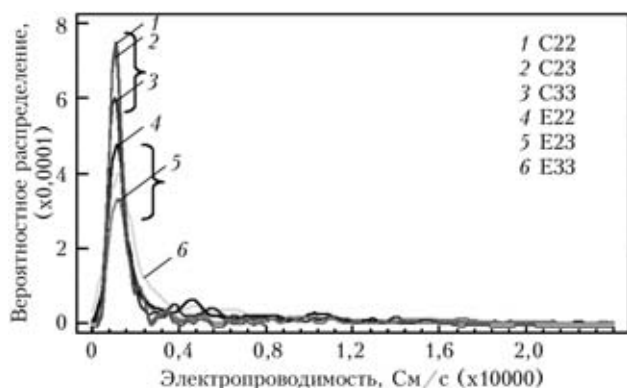


Рис. 3. Вероятностное распределение электропроводимости при пиках повторного зажигания дуги для шести экспериментов при 160 А

Перенос электрического заряда. Для оценки стабильности процесса переноса электрического заряда используют значения удельной электропроводимости во время пиков повторного зажигания дуги [21]. Применяют программы для определения возникновения пиков [17], их продолжительности и средней электропроводимости и исследуют вероятностное распределение параметров (рис. 3). Степень регулярности электропроводимости определяли путем расчета медианного критерия Муда.

Значение параметра P указывает, что распределения статистически различны, средние медианы отличаются на 14,32 %. Коэффициент Краскела–Уоллиса использовали для определения различия между группами или внутри распределений при испытании электродов одного типа [20] (табл. 2).

Коэффициент Краскела–Уоллиса поддерживает гипотезу о том, что распределения внутри групп одинаковы. Если $P > 0,05$, предполагается, что распределения каждого типа электрода статистически не различаются, т. е. различия в характере проводимости отсутствуют при повторном зажигании внутри групп электродов, которые оцениваются, и следовательно, имеют место различия между такими группами. Для оценки дисперсии использовали АОМ. Видно, что для электродов типа С этот параметр имеет большое отклонение.

Оценка проводимости по АОМ при токе 160 А для электродов типа С1(22) составляет 1022,75 См/с; С2(23) — 979,5; С3(33) — 812,4 (среднее значение 938,22); а для электродов типа Е1(22) — 683,5; Е2(23) — 515; Е3(33) — 739,2 (среднее значение 645,9), разница составляет 31,16%.

Сварочный ток и напряжение. Для сравнения электродов были взяты 84 тыс. зафиксированных значений напряжения и тока, синхронизированных во времени при расчете среднеквадратического значения (СКЗ).

Установлено, что стандартное отклонение тока и напряжения составляет не больше 1 % среднего

Таблица 2. Результаты определения коэффициента Краскела–Уоллиса для межгруппового анализа проводимости для электродов типа С и Е

Эксперименты	Категория	Статистическая проверка E-Test	P значение
C1(22)	321,67	1,23874	0,538283
C2(23)	324,62		
C3(33)	306,00		
E1(22)	375,00	2,9751	0,225925
E2(23)	344,17		
E3(33)	370,40		

значения трех экспериментов, тогда как различие в 5,65 % обнаружено для СКЗ напряжения электродов типа Е и С. Это связано с различием измеренной глубины козырька H_c на конце огарка электрода по окончании наплавки. Для электрода типа Е1 $H_c = 2$ мм; Е2 — 2,05; Е3 — 1,95 (среднее значение 2 мм), а для электродов типа С1 $H_c = 1,2$ мм; С2 — 1,05; С3 — 1,15 (среднее значение 1,13).

Глубина козырька при сварке электродами типа Е больше, чем при сварке электродами типа С, что изменяет длину дуги и напряжение при гравитационной сварке, поддерживаемое на кромке образованного козырька на конце использованного электрода.

Обсуждение результатов. При дуговой сварке металлов покрытыми электродами наблюдаются различные виды переноса металла: перенос металла при коротких замыканиях, каплями (глобулярный перенос), струйный и перенос при взрыве перемычки расплавленного металла, образующейся при коротких замыканиях [1, 19]. Такие параметры, как продолжительность и частота коротких замыканий дают информацию только о процессе переноса металла в этом режиме. В экспериментах, проведенных ранее [13, 22], как и в данном исследовании, рассматривали только короткие замыкания продолжительностью более 2 мс. При обработке эмпирических данных установлено, что короткие замыкания занимают приблизительно 10 % средней продолжительности наплавки (58 с), т. е. не весь металл наплавляется таким образом.

Процессы переноса электрического заряда проявляются как во время пиков повторного зажигания, так и в периоды горения дуги. Однако, как правило, проводимость за единицу времени учитывается только во время пиков повторного зажигания. Из-за условий, накладываемых использованием переменного тока, температура дуги понижается, снижая степень ионизации и проводимость дуги. При таких условиях увеличивается падение напряжения и имеют место пики повторного зажигания. Повторное зажигание дуги



возможно, если градиент напряжения на поверхности конца электрода обеспечивает достаточное количество энергии для разблокировки электронной эмиссии и тогда восстанавливается электрическая стабильность процесса сварки.

Можно предположить, что для стабильного процесса необходимо меньшее количество пиков повторного зажигания и они должны быть меньшей амплитуды. Однако в электрической цепи проявляются и другие типы пиков в периоды горения дуги, в начале и в конце коротких замыканий, в соответствии с развитием процессов переноса металла и электрического заряда.

Наплавки были представлены экспертам, которые признали их более показательными, чем те, которые получают при ручной дуговой сварке. Они были получены с помощью устройства гравитационной сварки, которое позволяет избежать влияние оператора или системы принудительной подачи на электрические характеристики процесса для оценки определенной реакции электрода при заданных условиях эксперимента.

Результаты анализа переноса металла. Вероятностные распределения продолжительности коротких замыканий (см. рис. 1) для всех экспериментов представляют собой кривые, близкие по форме для всех случаев. Это указывает на то, что исследуемый процесс переноса металла короткими замыканиями, который оценивали при сварке на токе 160 А, происходит одинаково у электродов обоих типов. Критерий Муда для этих параметров показывает, что медианы не имеют статистического различия. Однако среднее значение медианы указывает на наличие разницы в 7,5 % для продолжительности коротких замыканий у электродов типа С по сравнению с электродами типа Е, что вызвано меньшей глубиной козырька на конце электродов типа С по сравнению с электродами типа Е. Такое различие в глубине козырька для режима и угла подачи в основном объясняется различием физических и химических свойств покрытия (см. табл. 1).

Важными компонентами покрытия электродов типа С и Е являются оксиды TiO_2 , SiO_2 и CaO . Изучено распределение температуры плавления в системе $CaO-SiO_2-TiO_2$ как функции состава системы [23]. Систему оксидов, входящую в состав покрытия, в первом приближении можно оценивать по хорошо известной системе для анализа тенденции некоторых важных свойств.

Трехкомпонентная диаграмма состояния демонстрирует различные фазы, образовавшиеся из составов различных концентраций исследуемых компонентов при разных температурах. Принимая во внимание, что покрытие состоит только из CaO , SiO_2 и TiO_2 , и основываясь на составах покрытия (см. табл. 1), в диаграмме для покрытия электрода типа С при 1550 °С определена кристаллитная

фаза, состоящая, %: 12,8 CaO , 45,07 SiO_2 , 42,75 TiO_2 , и рутиловая фаза при 1600 °С для покрытия электрода типа Е 8,50 CaO , 39,16 SiO_2 , 52,34 TiO_2 %.

Поскольку температура плавления покрытия электродов типа С меньше температуры плавления покрытия электродов типа Е, наличие наименьшей глубины козырька подтверждается у электродов типа С, так как для них требуется меньше энергии для расплавления при более низкой температуре в одинаковых тепловых условиях.

Отклонение продолжительности коротких замыканий выше у электродов типа С, что указывает на более стабильный (8,33 %) процесс переноса металла, чем у электродов типа Е.

Продолжительность и частота коротких замыканий являются параметрами, которые описывают один и тот же процесс переноса металла. Вероятностное распределение периодов коротких замыканий (см. рис. 2) имеет одинаковую характеристику для шести экспериментов при 160 А, указывая на высокую степень повторяемости и воспроизводимости полученных результатов, как и с продолжительностью коротких замыканий.

Результаты оценки по критерию Муда показывают, что все шесть экспериментов имеют статистически одинаковые медианы, поэтому между ними нет значительных различий. Средние значения соотносятся с реальными значениями измерений частоты коротких замыканий для этих типов электродов при 160 А, полученных с помощью оптических методик. Это указывает на то, что полученные результаты имеют важное физическое значение, подтверждая возможность использования процесса.

Отклонение периодичности коротких замыканий больше у электродов типа С, чем у электродов типа Е (9,28 %), что еще раз подтверждает результаты оценки стабильности процессов переноса металла при коротких замыканиях при сварке электродами этих типов.

Результаты оценки переноса электрического заряда. Распределения проводимости для всех шести экспериментов при сварке на токе 160 А (рис. 3) различны, хотя природа их вариаций отвечает типичной феноменологии процесса. Характерные статистические различия были обнаружены в медианных значениях всех шести экспериментов согласно критериям Муда. Коэффициент Краскела–Уоллиса (см. табл. 2) определяет различия, имеющие место между электродами обоих типов, что указывает на то, что статистические модели для каждого типа электродов можно легко распознать с помощью этого параметра.

Факт того, что средние значения у электродов типа С были выше (на 14,32 %), чем у электродов типа Е, можно объяснить, если учесть, что вза-



имосвязь между пиками тока и напряжения повторного зажигания дуги для одного момента времени при заданных различиях в указанной глубине козырька и необходимом большем времени для зажигания дуги при сварке электродами типа С увеличивает значение параметра, если сравнивать с другим типом электрода.

Исходя из степени отклонения параметра проводимости, можно утверждать, что он более нестабильный (на 31,16 %) при сварке электродами типа С, что связано с очевидно большей сложностью процессов зажигания и повторного зажигания дуги при проведении испытаний электродов этого типа.

Согласно оценке экспертов практически электрические характеристики электродов Е типа намного лучше, чем у типа С. Наблюдаются меньшие потери покрытия в процессе зажигания и установления дуги и меньшие потери на разбрызгивание.

Количество энергии за единицу времени, затрачиваемое на ионизацию покрытия электродов типа Е, согласно выполненным расчетам, составило 149,64 Дж, тогда как энергия, необходимая для ионизации покрытия электродов С типа, составила 149,89 Дж, т. е. не существует никакой разницы в энергии, поглощаемой обоими составами. Ионизационная энтальпия газов не является основанием энергетических различий между обоими процессами, однако энергия, поглощенная атомами кальция, натрия и калия для ионизации покрытия электродов типа Е, составила 39,98 Дж, тогда как та же энергия для покрытия электродов типа С составила 56,50 Дж при заданных концентрациях атомов и степенях ионизации при температуре 6000 К. Энергия, поглощенная при ионизации этих элементов с низким потенциалом ионизации, у электродов типа С была больше на 70,7 %, что указывает на большую затрудненность процесса зажигания, который происходит при сварке электродами типа С. Соответственно элементы с низким потенциалом ионизации имеют значительный атомный радиус, что приводит к увеличению вероятности соударения с последующими энергетическими потерями, что может способствовать дестабилизации переноса заряда в процессе горения дуги.

Выводы

1. Сравнимые типы электродов не демонстрируют значительной статистической разницы в отношении средних значений характерных параметров процесса переноса металла при коротких замыканиях. Однако точный расчет степени отклонений указывает на большую нестабильность процесса сварки электродами типа С по сравнению с электродами типа Е.

2. Отклонение параметра электрической проводимости во время пиков повторного зажигания демонстрирует высокую репрезентативность при различии в 31,16 % в электрическом поведении обоих типов электродов, однако, оно указывает только на стабильность процесса переноса электрического заряда во время пиков повторного зажигания.

3. Электроды типа С показывают большую неопределенность при зажигании дуги и поддержании процесса горения дуги в сравнении с электродами типа Е. Это экспериментально проверено и еще раз подтверждено характером поведения проводимости и тем фактом, что для электродов типа С энергия, необходимая для ионизации элементов покрытия с более низким потенциалом ионизации, согласно расчетам, была больше на 29,24 %.

1. Lancaster J. F. et al. The physics of welding. — [1986]. — 340 p. — Intern. Inst. of Welding. Second ed.
2. Schellhase M. Der Schweißlichtbogen ein technologisches Werkzeug. — Berlin: Editora Tecnica de Berlin, 1985. — 236 S.
3. ANSI/AWS. Specification for carbon steel electrodes for shielded metal arc welding, Standard 5.1-91. American National Standards Institute/American Welding Society. — Miami, Florida: AWS, 1991.
4. Geotecnologia. Reporte de resultados. Certificado de Ensayo No 54. Laboratorio de analisis quimicos. — Geominera del Centro. — Santa Clara, 2006.
5. Geotecnologia. Reporte de resultados. Certificado de Ensayo, No.6M Laboratorio de analisis mineralogico. Geominera del Centro. — Santa Clara, 2006.
6. Garcia-Rodriguez A. et al. Valoracion del desempenio de un dispositivo de autoalimentacion diseñado para la evaluacion operativa de electrodos revestidos // Soldagem & Inspeção. — 2009. — 14, № 1. — P. 68–73.
7. Sanchez-Roca A., Carvajal F. H. Nuevo criterio para el analisis de estabilidad del proceso de soldadura GMAW, empleando tecnicas de Emision Acustica e Inteligencia Artificial. Tesis doctoral. — Santiago de Cuba, 2006. — 105 p.
8. Garcia-Rodriguez A. Comportamiento del tiempo de duracion, la frecuencia de los cortocircuitos y la conductividad electrica durante el pico de reencendido del arco // Soldagem & Inspeção. — 2009. — 14, № 1. — P. 58–65.
9. Guerra C. W., Menendez E., Barreras R. Estadística. — Habana: Felix Varela, 2003. — 376 S.
10. Colectivo. Guia de autopreparacion para la clase practica No 4. Asignatura de tecnologia de soldadura. Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, 2006.
11. Garcia-Rodriguez A. Procesamiento digital de las secas del arco electrico en la soldadura SMAW. [CD-ROM. COMEC. Conf. intern. de ingenieria mecanica]. — Feijoo, 2008.
12. Garcia-Rodriguez A., Gomez Perez CR. Criterios sobre algunas metodologias de caracterizacion operativa de electrodos revestidos en la soldadura en modo de transferencia metalica por cortocircuitos // Soldadura & Inspeção. — 2008. — 13, № 2. — P. 141.
13. Farias J. P. Metallic Mg as a coating component in C–Mn–Ni electrode. — Tesis Doctoral. — Universidad Federal de Santa Catarina, 1993. — 225 p.
14. Souza M. Validacion de un sistema computarizado para el control de la calidad de electrodos revestidos. — Tesis de Maestria. — Universidad Federal de Uberlandia, 1995.
15. Rissone N.M.R. et al. ANSI/AWS A5.1-91 E6013 Rutile electrodes: The Effect of calcite // Welding J. Supplement. — 2002. — P. 113–124.
16. Farias J. P., Scotti A., Surian E. The effect of wollastonite on operational characteristics of AWS E6013 electrodes // J.



- of the Brazilian Society of Mechanical Sci. and Eng. — 2004. — 26, № 3. — P. 17.
17. *Molinero L. M.* Y si los datos no siguen una distribucion normal? Asociacion de la sociedad esapakola de hipertension arterial, 2003.
18. *Shapiro S. S., Wilk M. B.* An analysis of variance test for normality (complete samples) // *Biometrika*. — 1965. — 52, № 3, 4. — P. 591–611.
19. *Mood A. M.* Introduction to the theory of statistics. — 3-d ed. — McGraw-Hill, 1974. — 540–541 p.
20. *Ripley B. D.* Robust Statistics. — Springer-Verlang, 2004. — 11 p.
21. *Ponomarev V.* Arc welding process statistical analysis. Methodical approaches, analysis conceptions, experiences, 1997.
22. *Sanchez-Roca A., Carvajal F. H.* New stability index for short circuit transfer mode in GMAW process using acoustic emission signals // *Sci. and Technology of Welding and J.* — 2007. — 12, № 5. — P. 460–466.
23. *Metallurgy.* Slag atlas. Verein Deutscher Eisenhutenleute: Verlag Stahleisen M.B.H. Duesseldorf, 1981. — 282 S.

The paper gives an assessment of the characteristics of duration and frequency of short-circuiting, as well as electrical conductivity at arc re-ignition in welding with two types of coated electrodes E6013. Modes, in which the highest stability of the process is guaranteed, and influence of coating composition on it are determined

Поступила в редакцию 24.01.2012

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ И МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ ГИБРИДНЫХ И КОМБИНИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

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

Для проведения исследований созданы лазерно-плазменные экспериментальные стенды с соосным и перекрестным взаимодействием плазменной струи и лазерного луча, оснащенные дуговым плазмотроном МП-4 (2,5 кВт), интегрированным лазерно-дуговым плазмотроном ИЛДП-01 (5 т) и СО₂-лазером (10 кВт). Калориметрическими измерениями установлено, что в случае соосного взаимодействия луча СО₂-лазера и Ar-плазменной струи в плазмотроне ИЛДП-01 степень поглощения струей энергии лазера достигает 15 %, при перекрестном пересечении Ar-плазменной струи лазерным лучом она оставляет 20...30 %. Это приводит к образованию зоны оптического разряда и повышению температуры струи Ar-плазмы до (15...25)·10³ К. Показано, что в их условиях создается возможность протекания газофазных (CVD) процессов нанесения покрытий. Установлено, что при подаче в Ar-плазменную струю газовой смеси 96Н₂ + 4СН₄ на поверхности подложек из молибдена и кремния, нагретых до 700...800 °С, по данным рамановской спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии формируются алмазные структуры. Установлено, что при обработке такой струей образцов из стали и Ti-сплава, нагретых до 200...300 °С, на поверхности формируется слой алмазоподобного углерода толщиной 0,3...3 мкм с твердостью на стали — до 35 ГПа, на Ti-сплаве — до 20 ГПа.

Исследованы процессы, происходящие в условиях активированного лазерно-микроплазменного напыления покрытий из порошка титана и продуктов распыления Ti-проволоки при использовании в качестве активных газов N₂, СН₄, 96Н₂ + 4СН₄. Установлено, что в процессе напыления в результате активации реакций взаимодействия поверхности Ti-частиц с газовой фазой идет образование TiC, TiN, TiCN, которые формируют в покрытии дисперсные упрочняющие фазы, повышающие его твердость до 13...17 ГПа.

Выполнены эксперименты по плазменному нанесению тонких оксидных покрытий из TiO₂ и Al₂O₃ с использованием нанодисперсных суспензий и продуктов разложения прекурсоров — металлоорганических соединений.

Исследован процесс гибридного лазерно-плазменного нанесения покрытий, формирующихся из продуктов лазерной абляции мишени материала покрытия (Ni, Al₂O₃), переносимых на подложку ламинарной струей Ar-плазмы. Установлена возможность получения таким путем покрытий Al₂O₃ толщиной 10...20 мкм при исключении образования парокapельной фазы.

Проведен анализ областей практического применения разработанных процессов, к основным из которых относятся лазерно-плазменное упрочнение деталей ДВС (в частности, работы ИЭС с заводом им. Малышева), оборудования полиграфической и деревообрабатывающей промышленности, металлургического оборудования, штамповой оснастки; нанесение алмазоподобных покрытий на литейные и прессформы пластиковой промышленности, детали холодильных компрессоров, плунжера ДВС, инструмент и приборную технику.



МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДЕГАЗАЦИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ПРИ ПОДВОДНОЙ СВАРКЕ

О. Ю. ГОРОБЕЦ, д-р физ.-мат. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»),
С. Ю. МАКСИМОВ, д-р техн. наук, **Е. А. ПРИЛИПКО**, инж.
 (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрен неконвективный механизм дегазации жидкого расплава в условиях внешнего электромагнитного воздействия при подводной сварке. Установлено, что образующаяся выталкивающая электромагнитная сила, действующая на газовые пузырьки и способствующая их удалению из расплава, в несколько раз больше силы Архимеда. По своему значению и влиянию на дегазацию сварочной ванны она сравнима с центробежной силой, создаваемой во вращающемся расплаве под действием внешнего электромагнитного поля.

Ключевые слова: подводная сварка, сварочная ванна, внешнее электромагнитное воздействие, неконвективный механизм дегазации

Одним из возможных путей повышения качества сварных соединений, полученных под водой, является применение внешнего электромагнитного воздействия на сварочную ванну. Этот подход достаточно хорошо зарекомендовал себя при сварке на воздухе [1]. Однако из-за специфических особенностей дуговой сварки в водной среде указанный процесс нуждается в адаптации к этим условиям. Для определения диапазона эффективных режимов внешнего электромагнитного воздействия разработана математическая модель, базирующаяся на уравнениях магнитной гидродинамики [2]. Она учитывает взаимодействие сил, которые образуются в жидкометаллической ванне в результате взаимодействия внешнего магнитного поля и собственного электрического тока сварочной дуги. Полученные экспериментальные данные [3, 4] показали, что при подводной сварке порошковой проволокой с напряженностью внешнего электромагнитного поля в установленном диапазоне содержание водорода в наплавленном металле снижается в 2,5 раза, а максимальный размер пор уменьшится в 5...15 раз. Как следствие, прочностные свойства металла шва увеличиваются на 20, а его пластичность (относительное удлинение) — на 40 %.

Механизм дегазации жидкого расплава в условиях внешнего электромагнитного воздействия при подводной сварке описан в работе [2]. Для объяснения указанных явлений рассмотрены силы, которые действуют при сварке на движущиеся относительно расплава пузырьки газов в сварочной ванне, включая силу Архимеда, центробежную (в случае вращающегося расплава), а также силу Стокса. Определено, что во вращающемся расплаве с радиальным распределением плотности тока меха-

низм дегазации является чисто конвективным, и центробежная сила дает вклад в дегазацию такой же или больший, чем сила Архимеда [2].

В настоящей работе рассмотрен неконвективный механизм дегазации жидкого расплава в условиях внешнего электромагнитного воздействия при подводной сварке. В работах [5, 6] установлено, что если в жидкость поместить частичку с отличающейся по значению электропроводностью, то при наложении электрического и магнитного полей она будет перемещаться.

Для исследования возможности неконвективного механизма дегазации сварочной ванны во внешнем магнитном поле нами рассмотрено действие на сферический пузырек выталкивающей электромагнитной силы [6–8]:

$$F_B = \frac{3}{2} j B V \frac{\sigma_p - \sigma}{2\sigma_p + \sigma},$$

где j — плотность тока в расплаве, А/м²; B — индукция внешнего магнитного поля, Тл; $V = 4\pi b_0^3/3$ — объем пузырька радиусом b_0 , м³;

σ_p , σ — удельная электропроводность соответственно пузырька и расплава, Ом⁻¹/м.

Если удельная электропроводность пузырька намного меньше удельной электропроводности расплава, то абсолютная величина электромагнитной выталкивающей силы имеет вид

$$|F_B| = \frac{3}{2} j B V.$$

Ниже приведены значения физических параметров системы в системе единиц СИ, используемых для рассмотрения механизма дегазации расплава под воздействием выталкивающей электромагнитной силы:

Ток сварки $I_{св}$, А	150...200
Вектор напряженности внешнего магнитного поля $\vec{H}_0$, А/м.....	796...1592



Вектор индукции внешнего магнитного поля B_0 , мТл	10...20
Температура расплава $T_{рас}$, °C	(2...3)·10 ³
Диаметр ванны $d_{ван}$, м	5·10 ⁻³
Динамическая вязкость расплава η , Па·с	3,3·10 ⁻³
Плотность расплава ρ , кг/м ³	7000
Кинематическая вязкость расплава $\nu = \eta/\rho$, м ² /с	0,47·10 ⁻⁶
Оценочная плотность тока в ванне $ j = I/d^2$, А/м ²	(6...8)·10 ⁶
Удельная электропроводимость расплава σ , Ом ⁻¹ ·м, при $T = 2500$ °C	3,5·10 ⁶
Глубина ванны l , м	0,0025
Радиус пузырьков (пор) в режиме влияния внешнего магнитного поля b , м	4·10 ⁻⁶
Радиус пузырьков (пор) без влияния внешнего магнитного поля b_0 , м	12·10 ⁻⁶
Скорость сварки $v_{св}$, м/с	0,13
Поверхностное натяжение расплавленного железа, σ_0 , мДж/м ²	1,76·10 ³

Предыдущую формулу удобнее записать в виде

$$F_b = 2\pi j B b_0^3.$$

Оценим скорость отвода пузырьков v_b (т. е. скорость дегазации расплава) под действием выталкивающей электромагнитной силы и сравним ее с расчетными скоростями дегазации под действием силы Архимеда и центробежной (во вращающемся расплаве) из работы [2]. Для этого приравняем сначала выталкивающую электромагнитную силу к силе Стокса, которая тормозит отвод пузырьков:

$$2\pi j B b_0^3 = 6\pi \eta b_0 v_b,$$

откуда

$$v_b = \frac{j B b_0^3}{3\eta}.$$

Таким образом, для неконвективного механизма дегазации сварного шва справедливы выводы, сделанные в работе [2] применительно к конвективному механизму: скорость отвода пузырьков пропорциональна квадрату их диаметра.

Отношение выталкивающей электромагнитной силы F_b к силе Архимеда F_A , действующей на пузырек, можно выразить как

$$\frac{F_b}{F_A} = \frac{3jB}{2\rho g} \approx 2,5.$$

В результате выталкивающая электромагнитная сила приблизительно в 2,5 раза больше силы Архимеда. Согласно результатам работы [2] центробежная сила в движущемся расплаве почти в 2 раза больше, чем сила Архимеда, т. е. выталкивающая электромагнитная сила имеет такой же порядок значений и сравнимое влияние на дегазацию расплава, что и центробежная сила. Поэтому при анализе количества пузырьков в расплаве, их пространственного распределения и времени отвода (всплывания) необходимо учитывать совместное воздействие выталкивающей электромагнитной и центробежной сил. Особенно важен

неконвективный механизм дегазации, основанный на действии на пузырьки выталкивающей электромагнитной силы, при приложении внешнего магнитного поля не вдоль нормали к поверхности ванны, а вдоль указанной поверхности, когда круговое вращение расплава отсутствует.

Существует также нижнее критическое значение магнитного поля, при достижении которого его воздействие на процесс дегазации отсутствует. Это критическое поле

$$B_{\min} = \frac{2\rho g}{3j} \approx 8 \text{ [мТл]}$$

соответствует превышению скорости отвода пузырьков под действием выталкивающей электромагнитной силы над скоростью всплывания пузырьков под действием силы Архимеда. Примерно такое же значение критического поля (около 6 мТл) получено и для условия превышения скорости отвода пузырьков под действием центробежной силы над скоростью всплывания пузырьков под действием силы Архимеда в работе [2]. Можно также оценить нижнее значение внешнего магнитного поля исходя из предположения, что оно должно быть больше вихревого магнитного поля, создаваемого током индуктора:

$$H_i = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \approx 6 \text{ [мТл]},$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Все три оценки, выполненные для нижней границы диапазона прикладываемого магнитного поля в целях улучшения качества сварного шва на основе разных физических критериев, дают практически одно и то же значение напряженности магнитного поля — около 6...8 мТл.

Из изложенного выше можно заключить, что выталкивающая электромагнитная сила в несколько раз больше силы Архимеда и обеспечивает неконвективный механизм дегазации сварного шва при приложении внешнего магнитного поля в плоскости сварочной ванны с радиальным распределением плотности тока, когда отсутствует конвективное вращение ванны.

Если внешнее магнитное поле ортогонально поверхности ванны с радиальным распределением плотности тока, расплав вращается как целое вокруг направления внешнего магнитного поля, и тогда неконвективный механизм дегазации расплава под действием выталкивающей электромагнитной силы имеет тот же порядок значений, что и конвективный механизм дегазации под действием центробежной силы [2].

1. Рижов Р. М., Кузнецов В. Д. Магнітне керування якістю зварних з'єднань. — К.: Екотехнологія, 2010. — 287 с.



2. Горобец О. Ю., Максимов С. Ю., Прилипко Е. А. Анализ гидродинамических процессов при сварке под водой с электромагнитным воздействием // Сб. тр. Четвертой междун. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (27–30 мая 2008 г., пос. Кацивели, Крым): Киев, 2008. — С. 9–12.
3. Рыжов Р. Н., Максимов С. Ю., Прилипко Е. А. Влияние внешних электромагнитных воздействий на пористость швов при подводной мокрой сварке // Вест. НТУУ «КПИ». — 2006. — № 48. — С. 226–229.
4. Применение внешних электромагнитных воздействий для улучшения механических свойств швов при подводной мокрой сварке / Р. Н. Рыжов, В. А. Кожухарь, С. Ю. Максимов, Е. А. Прилипко // Автомат. сварка. — 2004. — № 11. — С. 53–54.
5. Kolin A. An electromagnetokinetic phenomenon involving migration of neutral particles // Science. — 1953. — **117**. — P. 134–137.
6. Leenov D., Kolin A. Theory of electromagnetophoresis. Magnetohydrodynamic forces experienced by spherical and symmetrically oriented cylindrical particles // Chemical Physics. — 1954. — № 22. — P. 683–688.
7. Andres U. Ts. Measurements of the ejecting electromagnetic force in a conducting liquid // Izmeritel'naya Tekhnika. — 1963. — № 5. — P. 29–31.
8. Warczok A., Riverous G. Effect of electric and magnetic fields on metallic inclusions in a liquid slag // Proc. TMS annual meeting (March 2–6, 2003, San Diego). — San Diego, 2003. — P. 224–229.

A non-convective mechanism of liquid melt degassing under the conditions of external electromagnetic impact in underwater welding is considered. It is established that the generated buoyancy electromagnetic force acting on gas bubbles and promoting their removal from the melt, is several times larger than the Archimedean force. By its magnitude and influence on weld pool degassing, it is comparable with the centrifugal force generated in the melt rotating under the impact of an external electromagnetic field

Поступила в редакцию 16.11.2011

СОЗДАНИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ СОЕДИНЕНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ И ТИТАНА, РАЗРАБОТКА ПРИПОВ И ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ

Научно-исследовательская работа по указанной теме была завершена в 2011 г. в Институте электросварки им.Е.О.Патона (руководитель темы — чл.-кор. НАН Украины В.Ф.Хорунов).

Проведены систематические исследования сплавов системы Ti–Zr–Fe (Mn) в широком интервале концентраций, изучена их структура и интервалы плавления. Построены объемные поверхности ликвидуса данных систем, а также метастабильный политемрический разрез Ti₆₀Mn₄₀–Zr_{67,5}Mn_{32,5}, образующийся при скоростях охлаждения более 0,1 К/с. На основе проведенных исследований установлены области существования эвтектических сплавов с низкой температурой солидуса и ликвидуса. Выбраны оптимальные составы эвтектических припоев с приемлемой температурой плавления для их использования в качестве припоев для пайки алюминидов титана. Показано, что применение адгезионно-активных припоев на базе систем Ti–Zr–Fe и Ti–Zr–Mn для пайки алюминидов титана, обеспечивает формирование двухфазной структуры паяных швов (TiAl и Ti₃Al), близкой к структуре основного материала, кратковременную прочность (651...693 МПа) при комнатной (284...316 МПа) и при повышенной (700 °С) температуре, близкую к прочности основного материала. Основным показателем жаропрочности является длительная прочность, которая при температуре 700 °С и напряжении 200 МПа составляет соответственно 483 и 500 ч без нарушения структурной целостности образцов.

Проведенные комплексные исследования паяных соединений перспективных материалов на основе алюминидов титана позволяют расширить область их применения во многих отраслях промышленности при изготовлении ряда деталей горячего тракта газотурбинных двигателей высокотемпературного назначения, включая авиационную и энергетическую промышленность, где необходимо обеспечить высокую жаропрочность создаваемым конструкциям и отдельным узлам.

Проведенные исследования по растеканию припоев различных систем по алюминидам никеля и изучение формирования структуры паяных соединений алюминидов никеля при использовании литых припоев с кристаллической структурой, а также припоев в виде многослойных микрокристаллических фольг Ni/Al, полученных методом электронно-лучевого осаждения, показали перспективность данного направления и возможность получения плотных однородных паяных швов без проведения специальной термической обработки соединений.



МОДИФИЦИРОВАНИЕ БОРОМ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ТИПА БЕЛОГО ЧУГУНА

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

Рассмотрено влияние малых добавок бора на свойства наплавленного металла типа белого чугуна доэвтектического состава при широкослойной дуговой наплавке порошковой проволокой. Установлено, что бор в количестве 0,07...0,14 мас. % существенно повышает трещиностойкость наплавленного металла типа белого чугуна. Показано, что рост трещиностойкости обусловлен модифицирующим воздействием бора на размеры и строение структурных составляющих наплавленного чугуна и упрочнением межзеренных границ.

Ключевые слова: дуговая наплавка, наплавленный чугун, порошковая проволока, структура, модифицирование и микролегирование бором, трещиностойкость, твердость

При дуговой наплавке деталей, изготовленных из серых чугунов, главной проблемой является образование кристаллизационных и холодных трещин как в наплавленном металле, так и в зоне сплавления. При наплавке деталей, работающих в условиях циклического и знакопеременного нагружения (например, коленчатые валы двигателей автомобилей, компрессоров, дизель-генераторов и т. п.), подобные дефекты могут являться причиной их усталостного разрушения.

Предотвращение образования трещин достигается различными способами металлургического и технологического характера: применением высоколегированных наплавочных материалов аустенитного класса, предварительной наплавкой буферного подслоя для снижения содержания углерода в рабочем наплавленном слое, предварительного и сопутствующего подогрева наплавляемой детали и ее замедленного охлаждения после наплавки и др. Однако для получения тонкого слоя износостойкого наплавленного металла на деталях с относительно малым (0,5...1,5 мм) износом, отличающегося комплексом трудносочетаемых свойств (высокой твердостью, износостойкостью и трещиностойкостью), такие способы борьбы с трещинами оказываются либо малоэффективными, либо неприемлемыми.

Одним из направлений повышения физико-механических свойств железоуглеродистых сплавов является модифицирование и микролегирование их небольшими добавками поверхностно-активных элементов (ПАЭ), оказывающих влияние на процессы структурообразования кристаллизующихся сплавов [1]. Рафинирующее и упрочняющее воздействие ПАЭ на межкристаллитные сочленения (границы), представляющие собой сильно разветвленную сеть, которая пронизывает весь объем металла, приводит к межзеренному

армированию матрицы сплава [2]. В свою очередь границы зерен являются энергетическими барьерами на пути распространения трещины [3]. Таким образом, можно предположить, что использование ПАЭ может оказаться эффективным способом повышения трещиностойкости сплавов, кристаллизующихся в неравновесных условиях реального сварочного процесса.

К ПАЭ относится бор, отличительным свойством которого является его модифицирующая способность — воздействие на размер зерен и состояние межзеренных границ [1, 2, 4, 5]. Легирование бором также широко используется при сварке порошковыми проволоками и лентами для получения абразивностойкого наплавленного металла, при этом он выступает в роли основного легирующего элемента, принимающего участие в образовании твердых и износостойких карбидов и карбоборидов переходных металлов. Как правило, содержание бора в таком типе наплавленного металла составляет 1,5...3,5 мас. %. В то же время сведений о влиянии сравнительно малых добавок бора на свойства низколегированного чугуна, наплавленного порошковой проволокой, недостаточно.

Целью настоящей работы явилось экспериментальное исследование влияния малых добавок бора на свойства наплавленного металла типа белого чугуна при широкослойной наплавке порошковой проволокой деталей, изготовленных из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. В качестве объекта исследования выбрали разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона состав наплавленного металла, стойкий в условиях трения-скольжения при высоких контактных нагрузках [6], но кристаллизующийся при наплавке с образованием трещин. Химический состав исследуемого наплавленного металла следующий, мас. %: 2,4...2,6 C; 1,0...1,2 Si; 1,2...1,4 Mn; 0,5...0,6 Cr. Для получения и исследования образцов наплавленного металла указанного химического состава изготовили опытные порошковые проволоки диаметром 2 мм с разным содержанием бора. Однослойную ши-



рокослойную наплавку цилиндрических образцов из чугуна с шаровидным графитом проводили на постоянном токе обратной полярности на режиме: ток наплавки 150...160 А, напряжение дуги 19...21 В, размах колебаний электрода 35 мм, скорость наплавки 5,5 м/ч, толщина наплавленного слоя 1,8...2,2 мм.

Визуальным осмотром наплавленных образцов установлено, что на поверхности наплавленного слоя, не содержащего бор, имеются макротрещины, а в микрошлифах — микротрещины различной протяженности и степени раскрытия, расположенные как в наплавленном металле, так и в зоне сплавления. Микротрещины зарождаются, как правило, в зоне сплавления в местах залегания графитовых включений основного металла и прилегающих к ним участках ледебуритных колоний. В дальнейшем они беспрепятственно распространяются по объему наплавленного металла. В то же время наплавленный металл, содержащий 0,05...0,07 мас. % бора, кристаллизуется без образования макротрещин, а количество микротрещин существенно уменьшается. Увеличение содержания бора приводит к дальнейшему снижению количества микротрещин, при концентрации бора 0,18...0,20 % имеют место единичные микротрещины. Микролегирование бором более 0,2 мас. % не оказывает заметного влияния на трещиностойкость наплавленного металла. В ходе металлографических исследований установлено, что микроструктура наплавленного металла состоит из двух основных фаз: продуктов распада аустенита (ферритно-перлитная смесь) и карбидно-цементитной фазы. Присутствуют также участки ледебуритной эвтектики, расположенной в зоне сплавления и имеющей сотовое строение, что характерно для низколегированного литейного чугуна доэвтектического состава. При отсутствии бора карбидно-цементитная фаза образуется не во всех межосных пространствах дендритов твердого раствора, поэтому в плоскости шлифа она имеет вид разорванной (неплотной) сетки.

Микролегирование бором оказывает существенное влияние на все структурные составляющие наплавленного чугуна. Это влияние становится уже заметным при содержании бора 0,03 мас. %, а наиболее интенсивные изменения имеют место в интервале концентраций бора 0,07...0,15 мас. %. При содержании бора более 0,2 мас. % структура наплавленного чугуна меняется незначительно. Плотность дендритной структуры увеличивается, что проявляется в уменьшении размеров зерен твердого раствора со 100...112 (для наплавленного образца без бора) до 80...100, 64...80 и 32...48 мкм для образцов, содержащих 0,07, 0,13 и 0,21 мас. % бора соответственно (рис. 1). Карбидно-цементитная фаза, выделяющаяся по межосным пространствам дендритов, также претер-

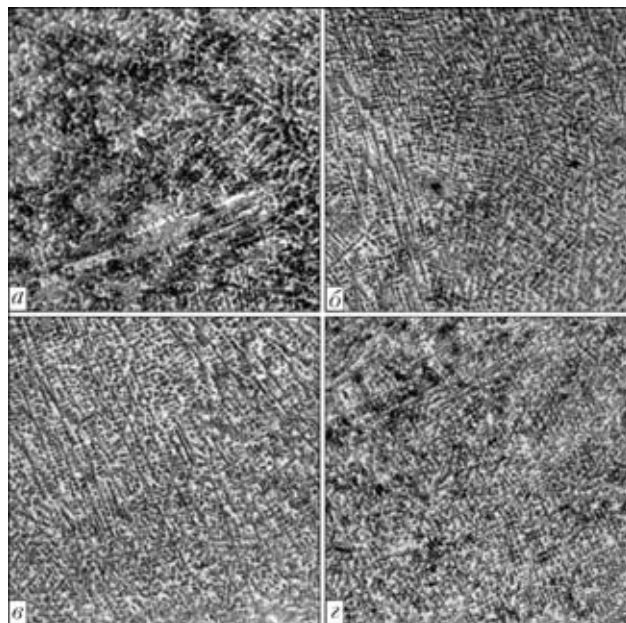


Рис. 1. Микроструктуры ($\times 80$) наплавленного металла с разным содержанием бора: а — без бора; б — 0,07; в — 0,13; з — 0,21 мас. %

певает значительные изменения: она становится менее разорванной и кристаллизуется в виде сплошной сетки с утонченными и уширенными участками (рис. 2). Ширина участков карбидно-цементитной сетки в наплавленном образце без бора составляет 48...96 мкм. При содержании бора 0,07; 0,13 и 0,21% ширина утонченных участков соответственно равна 16...32, 8...16 и 3,2...2,4 мкм, а уширенных — 64...82, 48...64 и 32...40 мкм.

Зона сплавления в исследуемых наплавках представляет собой структуру перекристаллизованного металла из твердожидкого состояния с

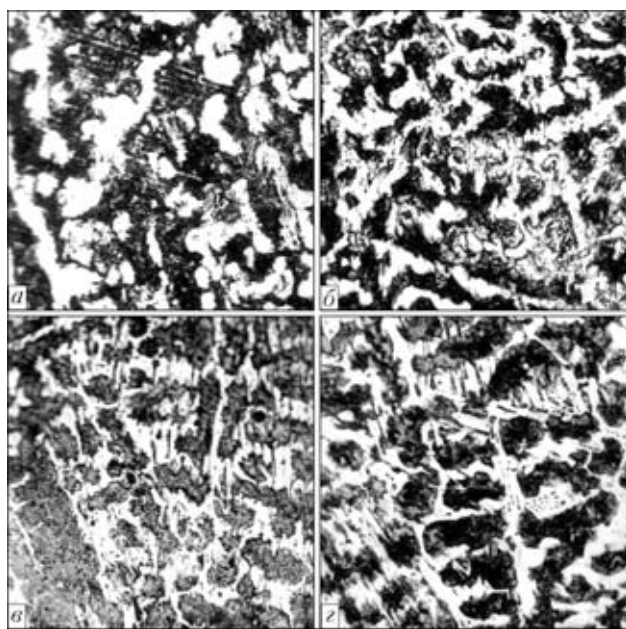


Рис. 2. Микроструктуры ($\times 640$), иллюстрирующие влияние бора на морфологию карбидно-цементитной фазы: а — без бора; б — 0,07; в — 0,13; з — 0,21 мас. %

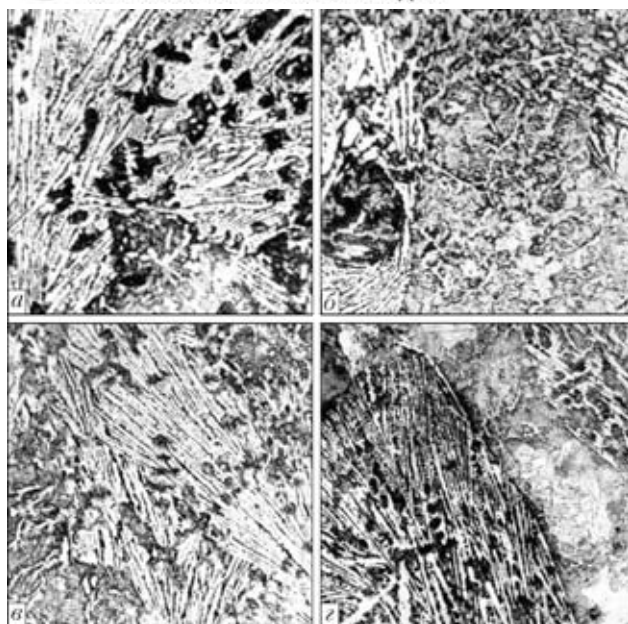


Рис. 3. Микроструктуры ($\times 200$) наплавленного металла с различными дисперсностью ледебуритных колоний и содержанием бора: а — без бора; б — 0,07; в — 0,13; г — 0,21 мас. %

характерным для дуговой наплавки чугуна наличием ледебуритных колоний. При отсутствии бора ледебуритные колонии в плоскости шлифа сливаются в сплошную полосу отбела. В отдельных местах зоны сплавления глубина участков ледебуритных областей достигает 600...800 мкм. С введением бора количество областей, занятых ледебуритом, уменьшается, а характер их распределения становится прерывистым. Максимальный эффект достигается при содержании бора 0,18...0,20 мас. %. При этом размеры ледебуритных колоний по глубине снижаются до 300 мкм, а степень их дисперсности возрастает (рис. 3).

Следует отметить, что участки структуры наплавленного металла, непосредственно прилегающие к зоне полного расплавления, имеют более

дифференцированное строение, чем центральные области наплавленного слоя. В этих участках кристаллизующиеся дендриты твердого раствора имеют оси третьего порядка, межосные расстояния которых находятся в следующей зависимости от содержания бора (средние значения): без бора — 80 мкм; 0,07 % В — 64; 0,13 % В — 48; 0,21 % В — 32 мкм.

Помимо структурных изменений, модифицирование бором оказывает влияние на твердость наплавленного металла HV^A и микротвердость зерен твердого раствора HV^K , в то время как микротвердость карбидной фазы HV остается практически без изменения (рис. 4). Увеличение твердости наплавленного металла при незначительном снижении твердости продуктов распада аустенита по всей видимости связано с повышением плотности и разветвленности упрочненных бором межзеренных границ, что не противоречит теории модифицирования чугуна с использованием ПАЭ [2, 4]. Снижается также анизотропность значений твердости Δ (разность между наибольшим и наименьшим значениями твердости): значения ΔHV и ΔHV^A с 640 и 700 (в наплавке без бора) снижаются соответственно до 140 и 210 МПа (в наплавке, содержащей 0,21 % бора). В то же время независимо от содержания бора ΔHV^K остается практически на одном уровне и составляет 140...158 МПа. В зоне сплавления микротвердость ледебуритных колоний возрастает с увеличением содержания бора с 6600...7300 (без бора) до 8500...9300 МПа (0,21 % бора), что обусловлено его влиянием на степень дисперсности ледебурита.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что малые добавки бора оказывают значительное модифицирующее воздействие на все структурные составляющие наплавленного чугуна и однородность значений их твердости.

Установленное существенное воздействие бора на увеличение трещиностойкости наплавленного чугуна можно объяснить двойственным характером его влияния на процессы первичной кристаллизации. С одной стороны, наличие бора приводит к значительному уменьшению размеров зерен, увеличению плотности, однородности и разветвленности кристаллизующихся дендритов твердого раствора и карбидно-цементитной фазы, т. е. образованию тонкодифференцированной структуры с развитой сетью межзеренных границ, армирующих сплав высокопрочным замкнутым каркасом. С другой стороны, малые добавки ПАЭ, особенно бора, адсорбируются на границах или разделах кристаллитов, где наиболее высокая концентрация вакансий и искажений кристаллической решетки [2–4 и др.]. При этом после выхода микротрещины из зоны сплавления в прилегаю-

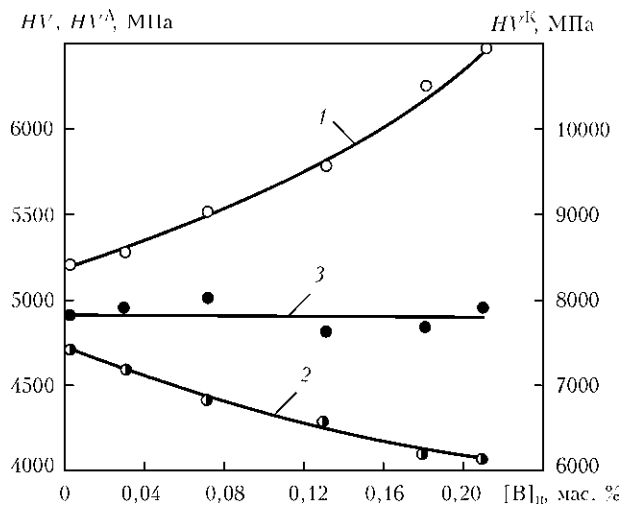


Рис. 4. Влияние содержания бора на макротвердость наплавленного металла HV (1), микротвердость зерен твердого раствора HV^K (2) и карбидно-цементитной сетки (3)



щие участки наплавленного металла с мелкозернистой, дифференцированной структурой и упороченными бором межзеренными границами, дальнейший их рост прекращается.

1. Сильман Г. И. Термодинамика и термокинетика структурообразования в чугунах и сталях. — М.: Машиностроение, 2007. — 302 с.
2. Гольдштейн Я. Е., Мизин В. Г. Модифицирование и микрولةгирование чугуна и стали. — М.: Металлургия, 1986. — 270 с.

3. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов. — М.: Машиностроение, 1964. — 276 с.
4. Архаров В. И. Теория микрولةгирования сплавов. — М.: Машиностроение, 1975. — 61 с.
5. Винаров С. М. Бор, кальций, ниобий и цирконий в чугуне и стали. — М.: Металлургиздат, 1961. — 459 с.
6. Кривчиков С. Ю. Повышение треботехнических характеристик наплавленных чугунных коленчатых валов автомобилей // Автомат. сварка. — 2008. — № 12. — С. 41–45.

The paper considers the effect of minor additions of boron on properties of hypoeutectic composition deposited metal of the white cast iron type provided by wide-layer hardfacing using flux-cored wire. It has been established that boron in an amount of 0.07...0.14 wt. % leads to a substantial improvement of crack resistance of the deposited cast iron. It has been shown that growth of crack resistance is caused by the modifying effect of boron on sizes and structure of components of the deposited cast iron and strengthening of grain boundaries

Поступила в редакцию 01.03.2012

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В СОЕДИНЕНИЯХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПРОКАТКИ, И СПЛАВОВ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И НИКЕЛЯ, ПОЛУЧЕННЫХ СОВРЕМЕННЫМИ МЕТОДАМИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ, ПРИ ПРИМЕНЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ, УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Научно-исследовательская работа по указанной теме была завершена в 2011 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона (руководитель темы — академик НАН Украины С. И. Кучук-Яценко).

В работе использован системный подход, который включал комплексное исследование объекта, а именно термодиформационных процессов прессовой сварки конструкционных материалов с имеющейся структурной неоднородностью с использованием экспериментального метода получения информации.

В работе приведены результаты исследований влияния структуры основного металла высокопрочных низколегированных сталей нового поколения и сплавов со специальными свойствами на основе алюминия и никеля на формирование структурной неоднородности и механические свойства соединений, которые получены разнообразными способами сварки давлением. Получены данные о природе образования квазиметаллических тонких структур в зоне соединения при сварке давлением, исследована связь между образованием таких структур с макро- и микроструктурой основного металла, термическим циклом и деформационным влиянием при различных способах сварки давлением.

Разработаны рекомендации по оптимизации термодиформационного цикла сварки давлением высокопрочных низколегированных сталей и специальных сплавов на основе алюминия и никеля. Результаты проведенных работ являются базой для создания научных основ разработки алгоритмов качества сварных соединений современных конструкционных материалов и технологий их сварки давлением.

Определены критерии дифференциальной оценки структурной неоднородности и дефектов сварки в соединениях, которые получены различными способами сварки давлением. Это позволяет создать перспективные методики применения неразрушающих методов контроля существующим автоматизированным оборудованием и обеспечит получение достоверной информации о качестве соединений, полученных способами сварки давлением.

Сделаны прогнозные предположения относительно дальнейшего развития технологий прессовой сварки современных и перспективных конструкционных материалов.



ТЕХНОЛОГИЯ И НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ РЕЛЬСОВ СОВРЕМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И РЕКОНСТРУКЦИИ СКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

Академик НАН Украины С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, В. Г. КРИВЕНКО, канд. техн. наук,
А. В. ДИДКОВСКИЙ, Ю. В. ШВЕЦ, А. К. ХАРЧЕНКО, А. Н. ЛЕВЧУК, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлена технология и новое поколение оборудования для контактной стыковой сварки высокопрочных рельсов при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей, которые базируются на процессе контактной сварки пульсирующим оплавлением.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, пульсирующее оплавление, компьютеризированная система управления, технология и оборудование, рельсовая плетть, бесстыковой путь

В последнее десятилетие в большинстве развитых стран мира наблюдается интенсивная реконструкция железных дорог, что обусловлено увеличением их грузонапряженности и скорости движения. При этом используются рельсы повышенной прочности с более высокой износостойкостью. Значительно возросли нормативные требования к точности рельсовой колеи, определяемой допустимыми отклонениями от заданных ее размеров. Выполнение этих требований в значительной степени определило разработки, направленные на совершенствование технологии сварки рельсов, которые проводятся в ведущих странах мира.

Сварка рельсов, укладываемых в главных путях, преимущественно выполняется контактной сваркой при изготовлении длинномерных рельсовых плетей (200...800 м) оплавлением в стационарных условиях, а также в полевых условиях при их укладке и ремонте бесстыковых путей.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона в течение более 50 лет проводятся разработки технологии и оборудования для контактной сварки рельсов в стационарных и полевых условиях. В мировой практике первые мобильные машины типа К155 для контактной сварки рельсов были разработаны ИЭС им. Е. О. Патона и успешно внедрены на железных дорогах СССР еще в начале 1960-х годов. Промышленное производство этих машин по разработкам института освоил Каховский завод электросварочного оборудования

(КЗЭСО). Это сотрудничество успешно продолжается и поныне. До 2000 г. КЗЭСО освоил выпуск нескольких поколений мобильных рельсосварочных машин типа К255Л, К355А-1, К900, а также стационарных рельсосварочных машин К190, К190ПА. В основу конструкции этих машин положено использование технологии сварки непрерывным оплавлением с программным регулированием основных параметров [1].

Разработанная в институте технология базируется на новых принципах управления процессом оплавления при контактной сварке, которые позволили в 2...3 раза снизить мощность, потребляемую при сварке, уменьшить время сварки в 1,5...2 раза по сравнению с процессом сварки с подогревом сопротивлением, а также обеспечить стабильный и равномерный нагрев рельсов по всему сечению. Несколько сотен таких машин, изготовленных КЗЭСО, успешно эксплуатируются до настоящего времени не только в СНГ, но и во многих странах мира.

По мере использования на железных дорогах высокопрочных рельсов КФ (комбинат «Азовсталь», Украина), Э76Ф, К76Т (ОАО «Нижнетагильский (НТМК) и Новокузнецкий металлургический (НКМК) комбинаты», РФ), U75V (компания «PIETC», КНР), BS113A («Corus British Steel», Великобритания) возникла необходимость существенного совершенствования технологии сварки и оборудования для ее осуществления. Прочностные показатели металла возросли в 1,3...1,5 раза (рис. 1, 2), а требования к пластичным свойствам в соответствии с нормативными показателями сохранились на прежнем уровне.

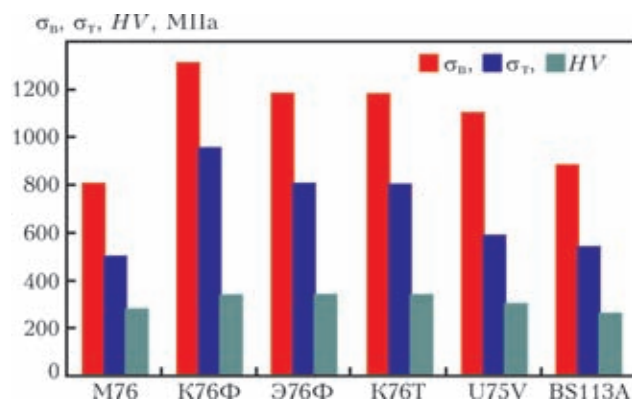


Рис. 1. Прочностные показатели новых рельсов

В ходе проведенных в Институте исследований установлено [2], что требуемое качество сварных соединений высокопрочных рельсов можно обеспечить при условии использования высококонцентрированного нагрева при сварке и строго дозированном энерговложении (рис. 3). При этом сравнительно небольшие отклонения при нагреве от оптимального распределения температуры приводят к снижению показателей при механических испытаниях.

Уменьшение энерговложения и соответственно температуры в приконтактных участках шва (рис. 3, фрагмент 1) приводит к появлению тонких оксидных структур по линии сварки. При увеличенном энерговложении (рис. 3, фрагмент 2) происходит укрупнение зерна и образование сплошной ферритной сетки по его границам.

Для получения оптимальных термических циклов в институте разработана технология сварки, получившая название пульсирующего оплавления, которая запатентована в Украине [3] и ведущих странах мира, в частности, РФ, США, Великобритании и Китае. За счет многофакторного регулирования искрового зазора, существующего между контактирующими деталями в процессе оплавления, а также мгновенных значений напряжения обеспечивается интенсификация контактного нагрева, при котором сокращаются потери металла на оплавление и повышается КПД по сравнению с каноническими процессами непрерывного оплавления или прерывистого подогрева сопротивлением. Длительность нагрева и припуски на оплавление сокращаются в 1,5...2 раза. Получение качественных соединений обеспечивается при меньшей ширине металла ЗТВ (рис. 4).

Разработана автоматическая система и определены алгоритмы многофакторного регулирования основных параметров процесса оплавления, позволяющего поддерживать заданный уровень энерговложения при сварке практически независимо от изменения условий эксплуатации машин (качества подготовки рельсов перед сваркой, колебания напряжения сети, температуры окружающей среды и др.). При этом заданная программа

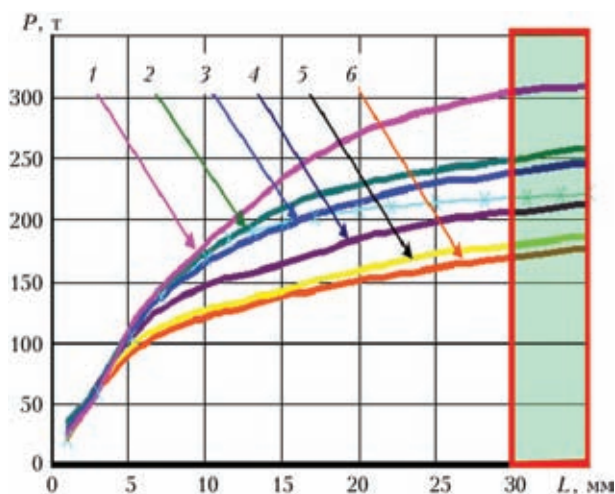


Рис. 2. Зависимость нагрузки при испытаниях на статический изгиб от прогиба рельса (минимальное допустимое значение стрелы прогиба — 30 мм): 1 — НКМК, НТМК Э78ХСФ (РФ, 2006–2012); 2 — НКМК, НТМК Э76Ф, К76Ф (РФ, 2006–2012); 3 — НКМК, НТМК Э76Ф, К76Ф (РФ, 2003); 4 — Азовсталь КФ 2011–2012 (Украина); 5 — U75 V (КНР, 2003–2012); 6 — Азовсталь М76 (Украина, 1985)

регулирования параметров автоматически корректируется (адаптируется) при изменении условий работы машины. Как видно из рис. 5, на оптимальном режиме (рис. 5, I) и автоматически откорректированном режиме (рис. 5, II) при изменении напряжения сети обеспечивается получение заданного температурного поля и требуемое качество сварных соединений.

При разработке систем автоматического управления процессом пульсирующего оплавления была решена также задача автоматизации некоторых вспомогательных операций, сопровождающих сварку бесстыковых путей. При ремонте бесстыковых путей часто необходимо сваривать две закрепленные плети неограниченной длины. При этом возникает необходимость сварки рельсовой вставки между плетями. В соответствии с при-

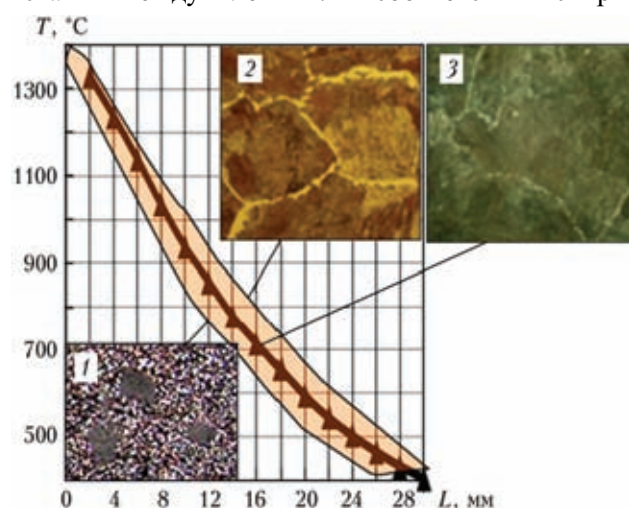


Рис. 3. Распределение температуры при сварке рельсов Р65: 1 — зона формирования оксидных включений по линии сварки; 2 — зона перегрева (крупное зерно с выделениями феррита по его границам); 3 — оптимальная структура

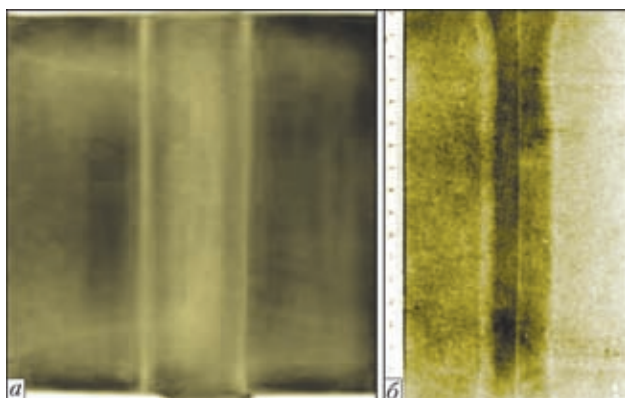


Рис. 4. Макроструктура сварных соединений рельсов Э76Ф: а — непрерывное; б — пульсирующее оплавление

нятой технологией вставку достаточно большой длины (не менее 6 м) приваривали к плетям с предварительным изгибом, необходимым для компенсации укорочения при сварке. Эта операция достаточно трудоемкая, после нее требуется восстановление заданного температурного напряженного состояния плети и геометрических размеров колеи. В большинстве регионов мира при строительстве бесстыковых путей принят расчетный диапазон изменения температуры окружающей среды (60...90°C) на период эксплуатации путей. Соответственно в жесткозакрепленных рельсовых плетях возникают внутренние напряжения (растяжения или сжатия в зависимости от периода эксплуатации). Многолетний опыт свидетельствует о том, что наибольшую опасность представляют напряжения сжатия, вызывающие нарушение геометрических размеров рельсовой колеи или ее повреждение.

С участием института была апробирована новая технология сварки вставки без ее изгиба. Необходимое укорочение при сварке обеспечивается за счет натяжения привариваемой плети, освобожденной от шпал на ограниченном участке (не более 50 м). После сварки в плети создаются напряжения растяжения. Варьируя значения предварительного зазора между концами свариваемых плетей перед сваркой, можно точно задавать значение этих напряжений. Сварка с натяжением длинномерных плетей бесстыкового пути позволяет установить наиболее оптимальный режим их работы при изменении температуры окружающей среды в процессе эксплуатации рельсов. Если при ремонте или строительстве бесстыковых путей задать уровень растягивающих напряжений после сварки на уровне, превышающем уровень возможных сжимающих напряжений, то в рельсах в течение всего интервала их службы не будут возникать сжимающие напряжения. Аналогичная задача возникает и при сварке плетей бесконечной длины в процессе строительства новых бесстыковых путей. Решение этих задач стало возможным благодаря разработке системы автоматичес-

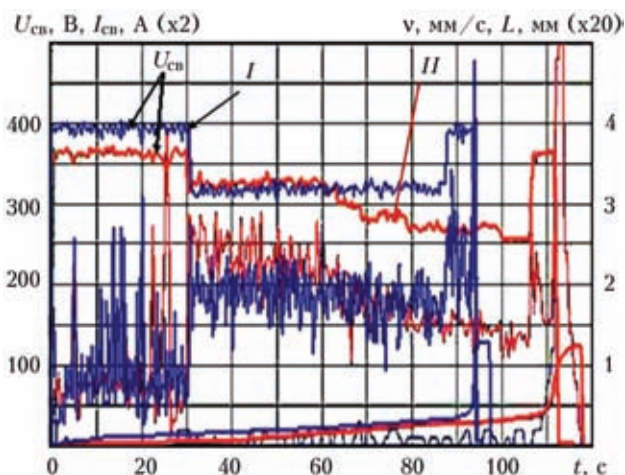


Рис. 5. Запись основных параметров сварки при пульсирующем оплавлении: I — оптимальный режим (синий); II — адаптивный режим (красный)

кого многофакторного регулирования всех параметров процесса пульсирующего оплавления с учетом выполнения вспомогательной операции по натяжению свариваемых рельсовых плетей. При сварке, кроме параметров, определяющих режим сварки, в компьютер вводят данные о температуре окружающей среды и необходимом уровне задаваемых растягивающих напряжений в свариваемой плети.

Применение новой технологии сварки высокопрочных рельсов, совмещенной с их натяжением, потребовало создания новых поколений рельсосварочных машин, отличающихся значительно большими усилиями осадки, оснащенными встроенными механизмами для удаления усиления сварного шва в горячем состоянии. Все упомянутые выше инновации новой технологии сварки высокопрочных рельсов и систем многофакторного регулирования были положены в основу создания нового поколения мобильных и стационарных рельсосварочных машин. При этом использованы современные системы вычислительной техники, быстродействующие гидроприводы и мощные системы электронного управления параметрами сварки.

Мобильные машины новых поколений имеют привод осадки, развивающий усилия в 2...2,5 раза больше, чем машины предыдущих поколений (типа К900) (таблица) и оборудованы устройствами автоматической срезки грата в горячем состоянии. При этом свариваемые рельсы удерживаются после сварки в зажатом состоянии, что предотвращает возможность повреждения сварного шва от воздействия растягивающих напряжений, создаваемых в плети после сварки в зоне нагретого металла. Несмотря на значительное увеличение мощности гидроприводов зажатия и осадки масса новых машин и габариты увеличились незначительно, что позволило их использовать в имею-

Технические характеристики стационарных и мобильных рельсосварочных машин ОАО «КЗЭСО»

Параметр	K900	K920	K921	K922-1	K922-2	K930	K1000	K1100
Номинальное напряжение питающей сети, В	380	380	380	380	380	380	380	380
Наибольший вторичный ток, не менее кА	18	67	67	67	67	67	84	84
Номинальная мощность (ПВ 50 %), кВт	150	211	236	210	210	210	300	300
Рабочее давление в гидросистеме, МПа	100	125	210	210	210	210	160	160
Усилие осадки, кН	450	1000	1500	1200	1200	1200	900	900
Усилие зажатия, кН	1350	2500	2900	2900	2900	2900	2000	2000
Ход подвижной колонны машины, мм	70	100	150	100	150	200	100	115
Масса машины, кг	2700	3000	4100	3100	3100	3450	8800	8800
Время сварки рельсов непрерывным оплавлением Р65, с	180...220	—	180...220	—	180...220	180...220	180...220	180...220
Время сварки рельсов пульсирующим оплавлением Р65, с	60...120	60...100	60...120	60...120	60...120	60...120	60...120	60...120

щихся передвижных рельсосварочных комплексах без существенной реконструкции.

Первая машина K921 для сварки рельсов пульсирующим оплавлением с натяжением разработана в ИЭС им. Е. О. Патона в 2001 г. и изготовлена КЗЭСО в кооперации с фирмой «Norfolk Southern» (США). Ее внедрение и доводку технологии сварки рельсов выполняли с участием ИЭС на железных дорогах, принадлежащих этой фирме. Технология была успешно внедрена и апробированы различные варианты осуществления сварки с натяжением. В настоящее время работают и эффективно используются более десяти таких машин. Впервые в мировой практике была выполнена контактная сварка рельсовых плетей бесконечной длины, протяженностью до нескольких сотен километров, без болтовых соединений. По имеющимся данным общая протяженность сваренных фирмой бесстыковых путей бесконечной длины превышает 10 тыс. км.

Последнее десятилетие в институте продолжают разработки, направленные на совершенствование оборудования для сварки рельсов в полевых и стационарных условиях применительно к использованию их в различных регионах мира.

В 2001–2005 гг. разработаны машины типа K920 (рис. 6) и K922 двух модификаций (рис. 7) для сварки рельсов в условиях стран СНГ. Показатели этих машин (усилия осадки, зажатия, габариты машины) оптимизированы с учетом применяемых технологий ремонта и строительства, а также имеющихся передвижных рельсосварочных комплексов. В частности, удалось значительно (в 1,5 раза) снизить массу и габариты машин по сравнению с первым опытно-промышленным образцом K921. Они нашли широкое применение при ремонте и реконструкции железнодорожных путей в Украине и России. Нормативными документами железных дорог Украины и России технология сварки пульсирующим оплавлением принята как базовая при сварке высокопрочных рельсов. В Украине работает 18 машин K922-1, а также 12 машин K1000. В Россию поставлено более 50 машин K922. Достаточно эффективно используются машины K922, поставленные в Китай (15 шт.), которые главным образом применяли при строительстве скоростных железнодорожных линий. За последнее пятилетие область применения этих машин значительно расширилась. Специалисты института оказывают необходимую консультационную помощь при отработке техно-

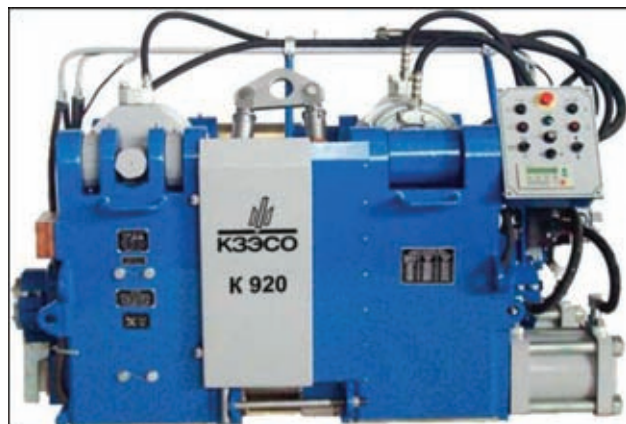


Рис. 6. Машина K920



Рис. 7. Машина K922-1



Рис. 8. Машина K930 для сварки рельсов с натяжением бесконечной длины



Рис. 9. Комплекс KPC5

логии сварки различных рельсов и наладке оборудования. При этом используются различные схемы организации работ при сварке рельсов в монтажных условиях. Для более полной стабилизации температурно-напряженного состояния в рельсовых участках бесконечной длины разработанная машина K930 (рис. 8), обеспечивающая большую длину натяжения плетей.

Современные мобильные рельсосварочные комплексы, выпускаемые КЗЭСО, представляют собой самоходные установки, которые могут передвигаться на рельсовом ходу KPC5 (рис. 9) или на комбинированном КСМ 005 (рис. 10), позволяющим перемещаться как по рельсам, так и по шоссейным и грунтовым дорогам.

На передвижных комплексах, кроме рельсосварочных машин, установлены дизель-генераторные установки мощностью 200...300 кВт, гидроподъемники, вспомогательное оборудование для подготовки рельсов для сварки, система неразрушающего контроля. Подобного типа мобильные комплексы, где используются машины K920, K922, применяют на железных дорогах Европы, фирмой «Holland» в США, фирмой «Network Rail» в Великобритании, а также Китае, Австралии, Бразилии, Тайване, Малайзии, Индии, Турции, Саудовской Аравии, Таиланде.

Для повышения производительности труда при реконструкции и строительстве железнодорожных путей рельсы предварительно сваривают в



Рис. 10. Комплекс КСМ 005



Рис. 11. Машина K1100

длинномерные плети длиной от 200 до 800 м, которые затем транспортируют к месту укладки. Сварку проводят в стационарных или полустационарных цехах с использованием стационарных сварочных машин. В последнее десятилетие в институте разработано новое поколение стационарных машин K1000, K1100, предназначенных для сварки высокопрочных рельсов (рис. 11), в которых используется технология сварки пульсирующим оплавлением. Машины отличаются высокой производительностью (время сварки рельсов максимального сечения не превышает 70...120 с) при мощности 250 кВт·А, что почти вдвое меньше мощности известных зарубежных стационарных рельсосварочных машин. Машины обеспечивают высокую точность центровки свариваемых рельсов, особенно необходимую для рельсовых плетей, которые укладываются в скоростные пути. Машина производит автоматическую срезку усиления шва в месте сварки, а гидروпривод машины обеспечивает повышенные усилия осадки, необходимые при сварке высокопрочных рельсов.

Компьютеризированная система управления машиной обеспечивает стабильное воспроизведение заданных режимов сварки пульсирующим оп-

лавлением и выполняет операционный контроль качества соединений, она дает его оценку сразу же после выполнения сварки. По сравнению с известными машинами К1000 имеет меньшую массу, габариты, что позволяет ее использовать при организации полустационарных цехов для сварки рельсовых плетей.

1. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением / Под ред. В. К. Лебедева. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.
2. Кучук-Яценко С. И. Влияние наследственности структуры низколегированных и углеродистых сталей на свариваемость в твердой фазе // Актуальные проблемы современного материаловедения: В 2 т. — Киев: ИД «Академперіодика», 2008. — Т. 1. — С. 148–165.
3. Пат. UA 46820, 6 В 23К 11/04, С2 Украина. Спосіб контактного стикового зварювання оплавленням / С. І. Кучук-Яценко, О. В. Дідковський, М. В. Богорський та ін. — Опубл. 17.06.2002.

Presented are the technology and a new generation of equipment for flash butt welding of high-strength rails for construction and re-construction of high-speed railway lines, based on the use of the pulsed-flash butt welding process

Поступила в редакцию 21.03.2011

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВЫХ, МАССООБМЕННЫХ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В СИСТЕМЕ «ЭЛЕКТРОДНАЯ ПРОВОЛОКА-КАПЛЯ-СТОЛБ ДУГИ» С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ И ПЕРЕНОСА КАПЕЛЬ ЭЛЕКТРОДНОГО МАТЕРИАЛА И ЕГО СВОЙСТВ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Научно-исследовательская работа по указанной теме была завершена в 2011 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона (руководитель темы — академик НАН Украины И. В. Кривцун).

Получены новые результаты теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия тепловых, массообменных, электромагнитных и магнитогидродинамических явлений в системе «электродная проволока — капля — анодный слой — столб дуги» при дуговой сварке плавящимся электродом и распылении электродного металла. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса формирования капли электродного металла в зависимости от диаметра электродной проволоки, скорости ее подачи при дуговой сварке конструкционных материалов и алюминиевых сплавов на постоянном токе и в импульсном режиме. Экспериментально установлен и теоретически проанализирован эффект «взрыва» капли при плавлении AlMg проволоки. Впервые получены данные о термодинамических и транспортных свойствах многокомпонентной (Ar–Al, Ar–Fe, He–Al, He–Fe) плазмы столба дуги, а также дуги, которая горит в среде водяного пара (применительно к «мокрой» сварки на глубинах до 200 м). Описаны результаты исследований тепловых и газодинамических процессов при взаимодействии высокотемпературного плазменного потока с металлическими материалами, установлены закономерности изменения структуры, физико-механических и физико-химических свойств материалов при их обработке плазменными потоками, определены основные технологические факторы, обеспечивающие комплекс повышенных физико-механических характеристик нанесенных покрытий. Разработаны конструкции высокоресурсных плазмотронов для переработки отходов и резки металлов, созданы образцы плазменно-дуговых установок для реализации технологий обработки материалов. Научно-технические результаты: математические модели и программное обеспечение, технология и опытно-промышленные установки пароплазменной переработки твердых бытовых отходов, технология и испытательное оборудование для плазменного нанесения покрытий из жаропрочных материалов, технология и опытно-промышленные установки плазменной резки металлов повышенной толщины. Потребность отечественного рынка в таких установках составляет 30–40 комплектов в год, экономический эффект от внедрения одной установки составляет не менее 1 млн грн. в год. Прогнозируемые предположения о развитии объекта исследования — поиск новых технологических возможностей дуговых и плазменно-дуговых методов обработки, соединения и нанесения покрытий применительно к новым конструкционным материалам.



ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ (Обзор)

Т. В. ЦЫМБАЛИСТАЯ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Обобщены литературные данные о применении теплозащитных покрытий для защиты деталей двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрены методы нанесения теплозащитных покрытий и материалы, которые используются для их нанесения.

Ключевые слова: теплозащитные покрытия, двигатели внутреннего сгорания, детали цилиндропоршневой группы, плазменное напыление, частично стабилизированный диоксид циркония

В настоящее время основным видом двигателей, используемых в приводах автомобильного, судового и железнодорожного транспорта, сельскохозяйственной техники и целого ряда других машин и агрегатов, являются двигатели внутреннего сгорания (ДВС) [1].

Основными причинами снижения и потери работоспособности ДВС являются абразивный износ в парах трения (поршневые кольца и гильзы, подшипники скольжения коленчатых валов, кулачки распределительных валов и т. п.), кавитационный износ (гильзы цилиндров) и коррозионно-механический износ (тарелка и седло клапана) [1]. Кроме того, немаловажное значение имеет эффективная изоляция камеры сгорания теплозащитным покрытием (ТЗП), которая позволяет перераспределить рассеянное тепло таким образом, чтобы свести его потери к минимуму через охлаждающую систему и систему удаления выхлопных газов. Коррозия на поршне вызывается отложениями оксидов и сульфидов ванадия, весьма агрессивными при температурах поверхности деталей камеры сгорания (400...500 °С). Улучшение антифрикционных свойств контактирующих поверхностей деталей позволяет снизить потери на трение, которые составляют в указанных узлах около 50 % общих механических потерь в двигателе, и, таким образом, повысить экономичность его работы. Наиболее перспективным способом снижения температуры деталей ДВС, повышения износостойкости трущихся пар, защиты от коррозии является создание теплозащитных, износостойких, коррозионностойких покрытий поверхности деталей. На рис. 1 представлены детали автомобилей с ТЗП.

«SULZER METCO» — наиболее известная за рубежом фирма, занимающаяся разработкой и продажей оборудования и изготовлением матери-

алов (порошков, проволок) для нанесения покрытий различного назначения. Ниже приведены сведения о наиболее часто применяемых фирмой материалах для покрытий, используемых для ремонта деталей автомобиля. При ремонте деталей тормозной системы (тормозные диски, колодки тормозные) для улучшения процесса торможения, снижения массы, увеличения срока эксплуатации дисков и колодок применяют плазменные покрытия из порошков $Al_2O_3 \cdot 3TiO_2$, $Ni_5Mo_5,5Al$, молибдена. Для деталей системы двигателя, которые работают в условиях износа (поршневые кольца, форсунка дизеля, распределительный вал, коленчатый вал), применяют плазменные покрытия из порошков молибдена и $Mo-NiCrBSi$, газопламенные покрытия из проволок $Fe38Ni10Al$ и $Fe13Cr$, покрытия, напыленные с помощью электродуговой металлизации из проволоки $(WC-12Co)38,8Ni6Cr$, и покрытия, напыленные сверхзвуковым газопламенным напылением из порошков Cr_3C_2 и Cr_3C_2-NiCr , которые обеспечивают высокое сопротивление заеданию, высокую износостойкость, уменьшение трения, экономию средств, увеличение срока службы компонентов. При коррозии (стержни клапанов, датчик выхлопа) применяют плазменные покрытия из порошков шпинели и покрытия, напыленные с помощью электродуговой металлизации из алюминиевой проволоки, которые увеличивают срок службы клапанов и обеспечивают контроль кислорода. При окислении (датчики кислорода) для защиты от эрозии применяют плазменные покрытия из порошков керамики, а при высоких температурах (днище поршня) — плазменные покрытия из порошков $ZrO_2-Y_2O_3$, которые обеспечивают уменьшение разгара поверхности и потери тепла, теплоизоляцию, повышение эффективности работы двигателя, увеличение срока эксплуатации поршня. Для избежания увеличения массы за счет тяжелых чугунов вставок на цилиндрах двигателя применяют плазменные покрытия из порошков Mo , $MoFe$, Fe и др., которые снижают размеры двигателя и потребление масла и топлива. При проблеме сцепления на границе раздела между гильзой цилиндра

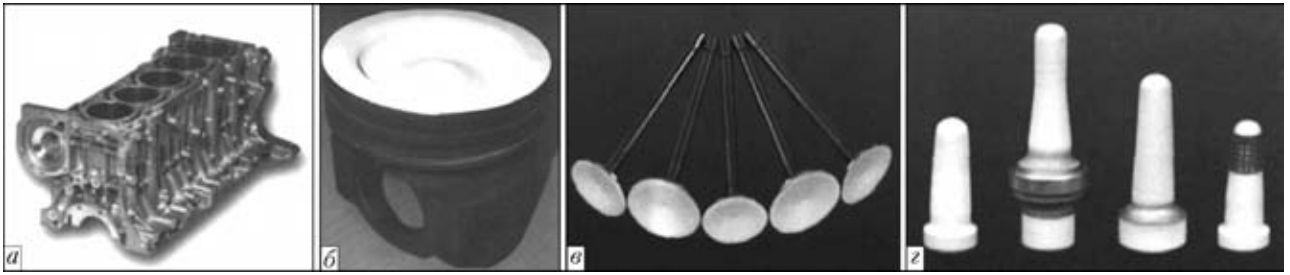


Рис. 1. Детали ДВС с ТЗП: а — цилиндры двигателя; б — поршень; в — выпускные клапаны; г — датчики выхлопа и датчики кислорода

и литым алюминиевым блоком цилиндра применяют покрытия, напыленные с помощью электродуговой металлизации из проволоки AlSi, и газопламенные покрытия из проволоки NiAl, которые улучшают поверхности алюминиевой отливки и функциональность. При диэлектрической изоляции (крышка генератора) применяют плазменные покрытия из порошков Al_2O_3 . Для компонентов выпускной системы при увеличенном тепловом излучении и повышенной температуре выхлопных газов применяют плазменные покрытия из порошков керамики, газопламенные покрытия из алюминиевой проволоки для теплоизоляции, тепловой защиты, снижения температуры, сокращения расходов, а в условиях коррозии на выпускном глушителе применяют газопламенные покрытия из алюминиевой проволоки для увеличения более длительного срока службы при низкой стоимости.

Основным направлением увеличения мощности ДВС является повышение температуры и степени сжатия рабочего газа при сжигании топлива [2]. Поэтому актуальной становится проблема повышения рабочей температуры в камере сгорания за счет снижения потерь тепла в системе охлаждения. Наиболее перспективным способом решения этой задачи является применение ТЗП, при нанесении которых оптимизируется режим работы двигателей, повышается их КПД, сокращается расход топлива и смазочных материалов.

Разработке ТЗП для двигателестроения уделяется большое внимание в США, Японии, Великобритании, Германии и Норвегии. В странах СНГ (Россия, Украина и Республика Беларусь) ведутся исследования по разработке различных покрытий (в том числе ТЗП) для повышения эффективности и надежности ДВС. В настоящее время в Украине ТЗП нашли широкое применение для защиты лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) [3] и практически отсутствует разработка ТЗП для деталей ДВС.

Основное назначение ТЗП в ДВС — снижение потерь тепла в камере сгорания и защита металлической основы от воздействия высоких температур. Как правило, ТЗП состоит из изолирующего внешнего керамического слоя (верхний) и металлического подслоя (связующий слой) между

керамикой и основой (рис. 2) [4, 5]. Теплозащитные функции выполняет внешний керамический слой. Основной функцией подслоя является пластическая релаксация напряжений в покрытии, возникающих из-за несогласованного изменения объемов керамических и металлических материалов при нагреве и охлаждении изделия.

В качестве керамических материалов для ТЗП в основном используют диоксид циркония, частично стабилизированный оксидами (7...8 % Y_2O_3 , 22 % MgO, 25 % MgO, 5 % CaO), оксид алюминия, оксид хрома [5, 6]. Наибольшее распространение получил диоксид циркония, частично стабилизированный оксидом иттрия [4, 5]. Широкое применение ZrO_2 обусловлено его низким коэффициентом теплопроводности ($1,95 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$), высоким коэффициентом линейного расширения ($\alpha = 5...5,6 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$), жаростойкостью и высокой вязкостью разрушения.

В качестве материала подслоя используют жаростойкие сплавы на основе $MeCrAlY$ ($Me = Ni, Co, Ni-Co, Fe$), а также NiCr. Наиболее применяемым для этой цели является NiCrAlY, что обусловлено его высокой стойкостью к окислению (до $900...1000^\circ\text{C}$) и хорошей способностью релаксировать напряжения в покрытии.

Для напыления функциональных защитных покрытий деталей ДВС применяют такие методы напыления, как плазменный метод (на открытом воздухе [1, 2, 4, 5, 7–13], при низком давлении или в атмосфере инертного газа [5, 8]).

Основным методом нанесения керамического слоя ТЗП является плазменное напыление в воз-

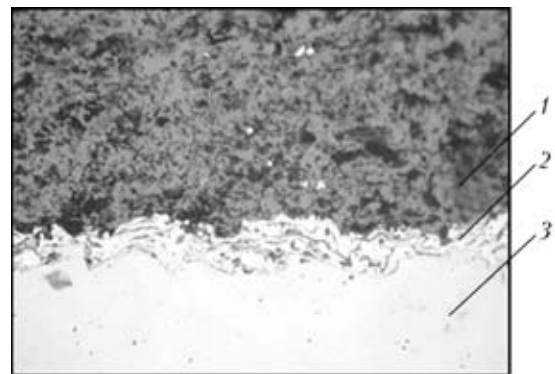


Рис. 2. Микроструктура ($\times 200$) двухслойного ТЗП: 1 — керамический слой; 2 — металлический подслоя; 3 — основа



душной среде (до 90 % разработок) [5]. Преимущественное распространение плазменного напыления ТЗП обусловлено его высокой производительностью и универсальностью, что позволяет наносить металлические и керамические материалы заданного химического и фазового состава в виде покрытий значительной толщины.

Для нанесения жаростойкого подслоя применяются методы плазменного напыления в инертной среде или динамическом вакууме, вакуумное электронно-лучевое осаждение для предотвращения окисления материала подслоя в процессе напыления.

К настоящему времени наибольшее количество разработок по покрытиям деталей ДВС приходится на долю поршневой группы (более 90 %, в том числе на поршневые кольца около 70 %) [2, 5, 7, 8, 10–13].

Установлено [2], что одним из важных факторов служебных свойств покрытий из ZrO_2 является толщина напыленного слоя. Покрытия из ZrO_2 толщиной 0,1...0,5 мм на чугунных поршнях снижают температуру «горячих» точек поршня на 45...50, температуру днища поршня на 25, а в районе верхнего поршневого кольца на 10 °С, оказывают выравнивающее действие на температурное поле головки поршня, что способствует снижению термических напряжений, являющихся причинами возникновения трещин в поршнях из чугуна. Эффективность применения покрытия тем существеннее, чем выше температура поршня при работе без покрытия. После 9490 ч работы покрытия из ZrO_2 с указанными толщинами (0,1...0,5 мм) не имели отколов, а после 12854 ч работы появились незначительные отколы на кромке днища, покрытия продолжали работать до 22548 ч (6 лет эксплуатации) [2]. При нанесении ZrO_2 покрытия на стальной поршень передача тепла в системе охлаждения снизилась на 26 %, что позволило в двигателе с пониженной отдачей тепла уменьшить на 21 % рабочую поверхность радиатора и снизить потребление на 3 кВт мощность вентилятора охлаждения [8]. В работе [12] установлено, что покрытие на алюминиевом поршне из ZrO_2 толщиной 1 мм после 50 ч работы не имеет никаких повреждений слоя, а при толщине покрытия 2 мм наблюдается крошение и скалывание керамического слоя. Покрытие на алюминиевом поршне судового двигателя из ZrO_2 , стабилизированного 5 % CaO , после 3,5 лет эксплуатации осталось невредимым, хотя и имело на себе слой углерода [7].

Плазменные покрытия на поршне из Al_2O_3 толщиной 0,45...0,5 мм снижают температуру в центре днища на 31, а в районе поршневого кольца на 12 °С. На поршнях ТЗП из Al_2O_3 после 500 ч работы показали хорошую работоспособность, разрушений покрытий внутри камеры не наблю-

дилось, а на чугунных поршнях только после 12854 ч работы в ТЗП появились незначительные отколы на кромке днища, но покрытия продолжали работать до 22548 ч (6 лет эксплуатации). Покрытие из Al_2O_3 толщиной более 1 мм на чугунном поршне оказалось неработоспособным, а при меньших толщинах оно работает без разрушения. На алюминиевых поршнях работоспособная толщина этого покрытия не превышает 0,4 мм при предварительном подогреве поршня перед нанесением покрытия. Без предварительного подогрева алюминиевой основы указанная толщина является неработоспособной вследствие значительных отрывных и растягивающих остаточных напряжений, а также циклических термических напряжений, возникающих при работе на дизеле [2].

Двухслойные покрытия с общей толщиной 1 мм на алюминиевом поршне из стабилизированного ZrO_2 –24 % MgO и подслоя $FeCrAlY$ после испытаний в течение 5000 ч не разрушились [10]. Испытания на термоциклирование при температуре от 0 до 950 °С двухслойных покрытий из ZrO_2 –20 % MgO + $NiCrAlY$, ZrO_2 –8 % Y_2O_3 + $NiCrAlY$, ZrO_2 –25 % MgO + $CoNiCrAlY$, ZrO_2 –20 % MgO + $NiCoCrAlY$ толщиной менее 1 мм на алюминиевых поршнях показали, что ТЗП имеют достаточную стойкость по отношению к циклическим изменениям температуры. Разрушение покрытия происходит по причине окисления нижнего слоя $MCrAlY$. Покрытие из стабилизированного ZrO_2 –7/8 % Y_2O_3 при температуре свыше 1000 °С проявило себя более стойким [9]. Двухслойное покрытие на алюминиевом поршне из стабилизированного ZrO_2 –5 % CaO с подслоем 20Ni80Cr толщиной 1,5 мм после 50 ч (2800 циклов нагрева-охлаждения) растрескивается и разрушается [12].

На чугунном поршне двухслойное покрытие из Al_2O_3 толщиной 0,6 мм с подслоем из $NiCr$ толщиной 0,1 мм обеспечивает снижение температуры наиболее «горячих» точек днища поршня в зоне воздействия факела пламени на 40...48, а в зоне верхней поршневой канавки на 8...10 °С. На алюминиевом поршне покрытие из Al_2O_3 с подслоем $NiCr$ снизило температуру на 15...20, а в зоне верхней канавки — на 5...7 °С [2].

Двухслойное покрытие из стабилизированного ZrO_2 –22 % MgO с подслоями $NiCoCrAlY$ и $NiCrAlY$ с толщиной примерно 0,4 мм на днище чугунного поршня после 500 ч испытаний осталось без изменений, а покрытие из ZrO_2 –8 % Y_2O_3 с подслоями $NiCoCrAlY$ и $NiCrAlY$ сохранилось даже после 9000 ч испытаний [11]. Покрытие из ZrO_2 на днище стального поршня толщиной до 2 мм уменьшает передачу тепла в систему охлаждения на 30,4, увеличивает эффективную мощность на 3,75, уменьшает удельный расход топлива на 3,58 % [8].



На головках поршней из жаростойкой стали 2Х13 покрытия из Al_2O_3 и ZrO_2 на подслое из NiCr с толщиной более 0,4 мм после пробега 163332 км имеют небольшие отколы, остальная поверхность покрытий сохраняет хорошее состояние и без трещин [2]. Двухслойное покрытие из ZrO_2 –7 % Y_2O_3 с подслоем NiCrAlY на головке алюминиевого поршня уменьшает удельный отвод тепла на 30 %, при этом экономия топлива составила 5...10 % [13].

Для снижения температур поршня и тепловых потоков через поршень применяют покрытия керметного состава [2]. Покрытие керметного состава ZrO_2 –Ni толщиной 0,7 мм с более высокой теплопроводностью имеет тепловое сопротивление меньше чем покрытие из Al_2O_3 толщиной 0,6 мм, поэтому и эффективность его меньше. При этом с увеличением толщины покрытия тепловое сопротивление повышается, но непропорционально толщине слоя. Длительные испытания в течение 917 ч работы керметных покрытий на поршнях показали, что покрытия не имеют разрушений [2].

Многослойные покрытия керметного состава с постепенно изменяющимся коэффициентом линейного расширения являются более работоспособными по сравнению с чисто керамическими и могут успешно применяться на чугунных, стальных и алюминиевых поршнях. Многослойные покрытия с поверхностным керамическим слоем ZrO_2 –Ni толщиной 0,3...0,4 мм с подслоем NiCr толщиной 0,1 мм на алюминиевых поршнях отработали на различных режимах в течение 397...1104 ч [2].

Покрытие из Al_2O_3 толщиной 0,25...0,35 мм на гильзе цилиндра под действием тепловых ударов отработало без разрушений, при толщине 0,5 мм в процессе испытаний отколов оно не имело, но на более нагретых участках наблюдалось растрескивание покрытий под действием растягивающих напряжений [2]. Проведенные испытания на термоциклирование при температурах от 50 до 1100 °С двухслойных ТЗП из ZrO_2 , стабилизированного оксидами MgO, Y_2O_3 и CaO, с подслоем CoNiCrAlY на гильзах цилиндров показали, что покрытие из ZrO_2 –7 % Y_2O_3 выдержало 20000 циклов, ZrO_2 –20 % Y_2O_3 — 2500, ZrO_2 –24 % MgO — 12000, ZrO_2 –5 % CaO — 3000 циклов. В покрытии из ZrO_2 –7 % Y_2O_3 с подслоем CoNiCrAlY после испытаний на термоциклирование присутствуют два типа растрескивания — перпендикулярное (сегментирование) и параллельное [7].

На головке цилиндра покрытие из ZrO_2 толщиной 2 мм и двухслойное покрытие из ZrO_2 –24 % MgO с подслоем FeCrAlY после испытаний в течение 5000 ч не имеют следов деградации и не разрушаются [10]. При использовании покрытия из ZrO_2 толщиной 3 мм на втулке цилиндра

после 50 ч работы крошения и скалывания покрытия не наблюдается [12].

Результаты испытаний плоской огневой поверхности крышки цилиндра с покрытиями из ZrO_2 толщиной 0,4...0,5 мм показали, что покрытие снижает температуру и незначительно повышает температуру поршня и втулки цилиндра и приводит к перераспределению тепловых потоков, проходящих через детали [2].

Анализ факторов, определяющих тепловую и механическую напряженность выпускных клапанов, показывает целесообразность применения ТЗП на тарелках выпускных клапанов [2]. ТЗП на клапанах снижают не только температуру клапана, но, что самое главное, температурные перепады в тарелке клапана, а следовательно, и термические напряжения в ней. С увеличением толщины ТЗП снижение температурных перепадов тарелки клапана при нанесении его не на всем диаметре, а на диаметре, меньшем полного на величину фасок. На центральной части тарелки клапана покрытие из ZrO_2 толщиной 0,5...0,6 мм снижает температуру в центре тарелки на 60 и повышает температуру кромки клапана на 15...20 °С [2].

Покрытие из ZrO_2 на выхлопном клапане после 180 ч функционирования было покрыто волосными трещинами, что ослабляет термические напряжения и ведет к прекращению дальнейшего разрушающего растрескивания вдоль поверхности раздела керамика/металл. Клапан продолжал работать без серьезных повреждений до появления коррозии при загрязнении топлива, которая привела к образованию кратеров и после 800 ч работы покрытие из ZrO_2 разрушилось [7]. Испытания клапанов в течение 4000 ч с покрытиями из ZrO_2 , стабилизированного оксидами 24 % MgO и 8 % Y_2O_3 , показали хорошую эксплуатационную долговечность обоих покрытий на поверхности клапанов. Скорость потери массы керамики вследствие эрозии была выше для ZrO_2 , стабилизированного MgO, чем для ZrO_2 , стабилизированного 8 % Y_2O_3 . При испытаниях в течение 5000 ч покрытия на клапанах не разрушились [10]. Для большего снижения температурных перепадов в клапане целесообразно применять анизотропные покрытия, характеризующиеся низкой теплопроводностью в осевом направлении слоя покрытия и большей теплопроводностью вдоль слоя покрытия. Такие свойства имеют многослойные покрытия, состоящие из чередующихся слоев керамики и металла. Керамические слои препятствуют прохождению теплового потока от газов к тарелке клапана, а металлические — передают теплоту из центра к кромкам тарелки клапана. При правильном подборе состава и толщины слоя покрытия можно добиться такого температурного поля кла-



пана, которое обеспечивает в нем наименьшие термические напряжения [2]. Трехслойные покрытия на выхлопных клапанах из $ZrO_2-24\% MgO$ с подслоями NiCr и NiCrAlY толщиной 0,7 мм снизили температуру металла на 50 °С, наименьшее понижение температуры было зарегистрировано в области седла клапана (из-за наличия водяного охлаждения кольцевого седла) [10].

На уплотнительной поверхности клапанов двухслойные покрытия из $ZrO_2-8\% Y_2O_3$ с подслоями NiCoCrAlY и NiCrAlY после 500 ч испытаний имеют локализованное мелкое отслоение в верхней части керамического покрытия. Покрытия из $ZrO_2-22\% MgO$ с подслоями NiCoCrAlY и NiCrAlY после 500 ч испытаний на уплотнительной поверхности клапанов почти полностью осыпались с поверхности клапана из-за дестабилизации ZrO_2 при протекании химической реакции между MgO и серой, а после 9000 ч испытаний поверхности клапанов разрушались, концентрация MgO в покрытии снизилась до 3 % [11].

Анализ результатов экспериментов показывает, что ТЗП на деталях камеры сгорания, уменьшая теплоотвод, позволяют лучше их использовать для организации процесса сгорания и повышения эффективных показателей двигателя [2]. При испытании покрытий на деталях камеры сгорания исследователи ставили задачу уменьшить теплоотвод в охлаждающую среду и улучшить за счет этого экономичность работы ДВС. ТЗП из ZrO_2 толщиной 2,5 мм на камере сгорания повышает эффективность двигателя примерно на 7,5 %, а при толщине 3 мм потери тепла через стенки камеры сгорания снижаются примерно на 50 % [12]. Двухслойное ТЗП из стабилизированного $ZrO_2-8\% Y_2O_3$ с подслоем NiCrAlY на камере сгорания толщиной от 2 до 2,5 мм уменьшает количество потребляемой энергии на нагрев охладителя и снижает потребление горючего двигателем до 10 г/л, покрытие выдерживает более 10000 термических ударов [12].

Анализ результатов работ, направленных на снижение температуры поршней ДВС при применении ТЗП в зависимости от уровня нагрузки, форсировки, частоты вращения, размерности дизеля и свойств покрытий, позволяет сделать вывод, что оно в основном определяется тепловым сопротивлением поршня и покрытия. Тепловое сопротивление поршня зависит от конструкции, диаметра и теплопроводности материала, а тепловое сопротивление покрытия — от его толщины и теплопроводности. В определенной мере на тепловое сопротивление поршня с покрытием оказывает влияние теплопроводность зоны контакта покрытия с поверхностью детали, а также шероховатость покрытия. Гладкая поверхность покрытия способствует большему снижению температуры поршня, что приводит к улучшению его эко-

номичности. Кроме перечисленных выше факторов, на снижение температуры поршня при применении ТЗП определенное влияние оказывает характер протекания рабочего процесса. Покрытие на днище поршня приводит также к перераспределению тепловых потоков через крышку и втулку цилиндра, увеличивает тепловой поток в крышку цилиндра и снижает тепловой поток через втулку (кроме ее верхнего пояса). Тепловая защита этих деталей не только снижает их температуру и термические напряжения, но и уменьшает теплоотвод в систему охлаждения, что должно положительно сказаться на экономичности двигателя и снижении масс и габаритов теплообменных устройств.

Основными причинами разрушений в покрытии являются термические напряжения, вызванные температурным режимом в камере сгорания, конструкцией днища поршня, а также толщиной и физико-механическими свойствами самих керамических покрытий. Разрушение двухслойного ТЗП наиболее часто происходит в межслойной зоне из-за высоких напряжений сжатия в покрытии. На разрушение также влияют перпендикулярные и параллельные трещины в покрытии. Перпендикулярное растрескивание, вызываемое полем растягивающих напряжений, считается благоприятным для долговечности покрытия, поскольку снимает напряжения, давая покрытию возможность расширяться и сжиматься, не испытывая значительных напряжений сдвига. Параллельное растрескивание, возникающее вследствие разрушительного сдвигового напряжения, приводит к разрушению покрытия.

На базе длительных эксплуатационных испытаний двигателей с покрытиями на поршнях установлено, что покрытия, снижая термические напряжения в поршне, в значительной степени позволяют повысить надежность и срок их эксплуатации. Уменьшая тепловой поток через поршень, покрытие обеспечивает лучшие условия работы смазочного масла, предотвращая закоксовывание поршневых колец. При снижении динамических нагрузок и температуры поршня покрытие значительно снижает износ деталей цилиндропоршневой группы. Все это способствует увеличению срока службы дизеля и смазочного масла. ТЗП повышают надежность и срок службы поршней не менее чем в 1,5 раза. Эти покрытия снижают температуру поршней и динамические нагрузки, а в соответствии с этим шум и вибрацию дизелей, токсичность их отработанных газов, износ и нагароотложения на деталях цилиндропоршневой группы, а также улучшают экономичность и условия работы смазочного масла и повышают надежность и срок службы поршней и всего дизеля в целом.

На головке поршня ТЗП предназначено также для обеспечения коррозионной стойкости его ма-

териала при высоких температурах, что снижает развитие процессов разгара.

ТЗП на головке цилиндра повышает температуру выхлопных газов примерно на 30 °С, понижает время запаздывания момента воспламенения топлива в цилиндре по сравнению с неизолированным двигателем примерно на 10 %.

На выхлопных клапанах ТЗП уменьшают теплоподвод к клапану, что позволяет поддерживать температуру поверхности седла ниже порогового значения высокотемпературной коррозии в агрессивных средах.

Данные испытаний показали, что при применении ТЗП может быть уменьшен тепловой поток через камеру сгорания к охладителю приблизительно на 30 %. Вследствие этого представляется возможность использования большего количества тепла от выхлопных газов, например, для нагнетания. В результате повышается общий тепловой КПД. Более высокая средняя температура будет положительно влиять на процесс сжигания и количество дымности выхлопа.

Использование ТЗП на деталях ДВС обеспечивает экономию топлива до 11 %; повышает долговечность двигателя до 20 %; уменьшает токсичность выхлопа $\text{NO}_x < 5$, $\text{CO} < 15,5$; $\text{HC} < 1,3$ и сажи $< 0,10$ г/л с.ч., количество твердых веществ в выхлопных газах на 52 %, дымление двигателя на 75 %, шумовые показатели на 3 дБ, температуру двигателя на 100 °С; повышает долговечность выхлопных клапанов на 30 %; снижает стоимость двигателя за счет использования при прочих равных параметрах более дешевых и менее дефицитных материалов.

Таким образом, ТЗП на поршне и других деталях камеры сгорания существенно улучшают работу дизеля. Снижаются «жесткость» процесса сгорания и максимальное давление при сгорании, что уменьшает шум, вибрации дизеля и токсичность отработавших газов. Повышение скорости сгорания в основной фазе горения увеличивает полноту сгорания и обеспечивает более экономичный рабочий процесс.

При применении ТЗП необходимо руководствоваться целью их назначения для каждого конкретного дизеля. В каждом случае, варьируя толщину и состав покрытий, можно достичь их максимальной эффективности.

1. Борисов Ю. С., Кулик А. Я., Гольник В. Ф. Газотермические покрытия в дизелестроении и энергетике // Газотермические и вакуумные покрытия в энергетике и двигателестроении. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1989. — С. 22–26.
2. Никитин М. Д., Кулик А. Я., Захаров Н. И. Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей дизеля. — Л.: Машиностроение, 1977. — 168 с.
3. Мовчан Б. А., Гречанюк И. М., Грабин В. В. Современное состояние и перспективы создания теплозащитных покрытий для лопаток авиационных ГТД // Электронно-лучевые и газотермические покрытия: Сб. науч. тр. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1988. — С. 5–12.
4. Ильющенко А. Ф., Оковитый В. А., Кундас С. П., Форманек Б. Формирование газотермических покрытий: теория и практика / Под общ. ред. А. Ф. Ильющенко. — Минск: Беспринт, 2002. — 480 с.
5. Теплозащитные покрытия на основе ZrO_2 / А. Ф. Ильющенко, В. С. Ивашко, В. А. Оковитый, С. Б. Соболевский. — Минск: НИИ ПМ с ОП, 1998. — 128 с.
6. Высокоогнеупорные материалы из диоксида циркония / Д. С. Рутман, Ю. С. Торопов, С. Ю. Плинер и др. — М.: Металлургия, 1985. — 137 с.
7. Moorhouse P., Johnson M. P. Development of tribological surfaces and insulation coatings for diesel engines // SAE Techn. Pap. Ser. — 1987. — № 870161. — P. 211–221.
8. Design study for a low heat loss version of the dover engine / N. Hay, P. M. Watt, M. J. Ormerod et al. // Proc. Inst. Mech. Eng. D. — 1986. — 200. — P. 53–60.
9. Kvernes I., Heel R. Advanced coating developments for internal combustion engine parts // SAE Techn. Pap. Ser. — 1987. — № 870160. — P. 187–209.
10. Kvernes I. Ceramic coatings as thermal barriers in diesel and gas turbine engine components // Proc. of the World Congr. High-Tech. Ceram. Techn. — 1987. — P. 2519–2536.
11. Levy A., Macadam S. The behavior of ceramic thermal barrier coatings on diesel engine combustion zone component // Surface and Coatings Technology. — 1987. — 30, № 1. — P. 51–61.
12. Guillemani J. M., Dehaudt P., Ducos M. Diesel engine combustion chamber insulation by ceramic plasma spraying // Advances in Thermal Spraying. — 1986. — 30, № 1. — P. 513–521.
13. Kamo R., Bryzik W. Adiabatic engine trends-worldwide // SAE Techn. Pap. Ser. — 1987. — № 870018. — P. 1–13.

Literature data on application of thermal barrier coatings for protection of internal combustion engines components have been generalised. The methods used to apply the thermal barrier coatings and the consumables used to deposit them are considered

Поступила в редакцию 19.12.2011



ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ НА РЫНКЕ СВАРОЧНОЙ ТЕХНИКИ В 2008–2011 гг. И ПРОГНОЗ ЕГО РАЗВИТИЯ (Обзор)

О. К. МАКОВЕЦКАЯ, канд. экон. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены данные о состоянии мирового производства, потребления и рынка сварочной техники в период 2008–2011 гг. и перспективы их дальнейшего развития.

Ключевые слова: сварочная техника, производство, потребление, рынок, экономика, статистика

Ситуация на мировом рынке сварочной техники в 2008–2011 гг. быстро менялась. На смену его росту (35 %) в период 2007 г. – I квартале 2008 г. пришел спад во II–IV кварталах 2008 г. (10 %), а еще больший — в 2009 г. (24 %). В 2010–2011 гг. рост продаж отмечен на всех региональных и отраслевых рынках сварочной техники. Однако при этом большинству ведущих товаропроизводителей сварочной техники достичь уровня продаж 2008 г. не удалось.

Как показал анализ данных, приведенных в годовых отчетах компаний ведущих товаропроизводителей сварочной техники, наибольшее сокращение продаж на мировом рынке сварочной техники было зафиксировано в 2009 г. Объем продаж уменьшился в среднем на 35...40 % по сравнению с 2008 г. Так, фирма ESAB во II квартале 2009 г. сократила продажи сварочного оборудования на 46, а сварочных материалов — на 38, фирма ITW в первой половине 2009 г. — на 37,5, «Thermadyne» в I квартале 2009 г. на 36, «Lincoln Electric» в первой половине 2009 г. на 41 % по сравнению с аналогичными периодами 2008 г.

Подъем рынка начался в I квартале 2010 г., когда объем продаж возрос в среднем на 0,7 %. Всего в течение 2010 г. объем продаж ведущих мировых товаропроизводителей сварочной техники по сравнению с 2009 г. вырос на 13 («Air Liquide»), 28 (Voestalpine AG — Boehler), 14 (ESAB), 20 («Lincoln Electric») и 14 % (ITW). В 2011 г. объем продаж на рынке сварочной техники возрос в первой половине года, а в III квартале замедлился. Таким образом, объем продаж компании «Lincoln Electric» за 9 месяцев 2011 г. вырос на 35, ESAB — на 18, «Thermadyne» — на 19 %. В IV квартале 2011 г. отмечено еще большее сокращение объема продаж. Предполагается, что снижение последнего на рынке сва-

рочной техники продолжится и в I квартале 2012 г. [1–4].

Оценить тенденции на мировом рынке сварочной техники за период 2008–2011 гг. позволяют данные о квартальных продажах ведущего мирового производителя сварочной техники — компании «Lincoln Electric» (рис. 1), 40 заводов которой расположены в 19 странах мира, а сеть дистрибьюторов охватывает более 160 стран. Объем продаж этой компании в 2011 г. достиг 2,7 млрд дол., что составило около 16 % объема продаж на мировом рынке сварочной техники [5].

Такие колебания на рынке сварочной техники за период 2008–2011 гг. отмечались во временном интервале, по регионам, а также по видам сварочной техники (материалам и оборудованию).

В региональном разрезе наибольший спад продаж в 2008–2009 гг. отмечен в Северной Америке и Европе. По оценке экспертов фирмы ESAB, спрос на американском рынке сварочной техники в 2008 г. уменьшился на 18, а к концу 2009 г. — более чем на 30, что в целом привело к сокращению рынка за этот период почти на 50 %. В 2008 г. европейский рынок сократился менее чем на 3, а в 2009 г. произошел обвал рынка на 26 %. Для сравнения спрос на рынках Азии в 2008 г. упал только на 1, а в 2009 г. — на 19 %. При этом рынки Китая, Индии, ряда стран Среднего Востока, Южной Америки и Африки оставались достаточно устойчивыми, хотя некоторые предп-

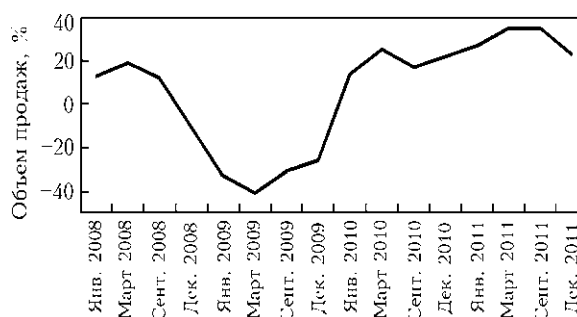


Рис. 1. Объем квартальных продаж компании «Lincoln Electric» за период 2008–2011 гг.

Таблица 1. Объем (в тыс. т) и структура потребления сварочных материалов на основных мировых рынках сварочных материалов

Регион (страна)	Покрытые электроды, %		Сплошная проволока, %		Порошковая проволока, %		Материалы для сварки под флюсом (проволока+флюс) и др., %		Всего, тыс. т	
	2008	2010	2008	2010	2008	2010	2008	2010	2008	2010
Китай	60	57	25	26	4	6	11	11	2600	2700
Европа	13	12	64	56	11	18	12	14	680	540
Северная Америка	15	15	58	54	21	22	6	9	520	410
Япония	12	11	47	42	30	35	11	12	365	289
Страны АСЕАН	51	51	38	35	6	8	5	6	320	260
Корея	14	14	37	34	39	40	10	12	260	210
РФ и страны СНГ	58	56	27	26	4	5	11	13	240	200
Индия	64	59	23	26	4	7	9	8	230	250
Центральная и Южная Америка	54	53	33	32	5	6	8	9	205	185
Средний Восток	58	59	27	26	5	5	10	10	130	160
Африка	68	62	22	25	4	5	6	8	85	130
Тайвань	30	29	48	46	17	18	5	7	80	70
Океания	49	49	36	36	6	6	9	9	50	50
Гонконг	59	58	26	26	5	6	10	10	20	20
									5 785	5 474

приятия вынуждены были сократить объем производства [1].

Достаточно полно оценить изменения объема продаж в основных регионах (странах) и сегментах мирового рынка сварочной техники за период 2008–2010 гг. позволяют данные японского издания «The Japan Welding News for the World». В табл. 1–3 приведены данные об объеме потребления основных видов сварочных материалов и сварочного оборудования в регионах и странах мира [6, 7].

Рост потребления сварочных материалов в последние годы впечатляет. Так, в 2004 г. в количественном выражении потребление сварочных материалов в мире составляло около 3 млн т [8]. По оценке японских экспертов, в 2008 г. потребление сварочных материалов в мире достигло очередного пика — 5,8 млн т, т. е. за четыре года возросло почти в два раза. В 2009 г. вследствие экономического кризиса потребление сварочных материалов значительно сократилось в большинстве стран и регионов мира — прежде всего в Европе и Северной Америке. Однако в странах с растущей экономикой (Китае, Индии, странах Африки, Среднего Востока, Турции, Иране) потребление сварочных материалов продолжало возрастать.

Рост мирового объема потребления сварочных материалов определяет Китай и развивающиеся страны Юго-Восточной Азии (Индия, Малайзия, Индонезия, Вьетнам). На Китай приходится почти

половина всего мирового объема потребления сварочных материалов — 49 %.

Структура потребления сварочных материалов развитых и развивающихся стран существенно отличается. В развитых странах Европы, Америки, Японии, Кореи 2/3 объема потребления сварочных материалов составляют сплошная и порошковая проволока. Так, в Европе, Америке и Японии доминирует потребление сплошной проволоки, а в Корее — порошковой проволоки. Потребление покрытых электродов в этих регионах и странах не превышает 15 % (в основном сварочные электроды специального назначения).

В развивающихся странах доля потребления покрытых электродов велика и колеблется от 50 до 60 %. Однако структура потребления сварочных материалов развивающихся стран быстро меняется. В последние годы растет потребление сплошной и порошковой проволоки при сокращении доли покрытых электродов. Эта тенденция сохранилась и в период кризиса 2009 г. Следует отметить, что и в развитых странах в период кризиса сокращение потребления сварочных материалов происходило преимущественно за счет снижения учета доли покрытых электродов и сплошной проволоки, тогда как, например в Европе, при общем (20 %) сокращении потребления сварочных материалов в 2010 г. по отношению к 2008 г. был отмечен рост потребления порошковой проволоки на 30 %.



Рис. 2. Структура мирового рынка сварочной техники 2010 г. (без защитных газов, средств защиты и абразивных материалов)

В 2010 г. несмотря на рост объема продаж мировой рынок сварочных материалов не достиг уровня 2008 г. В 2011 г. мировая экономика, особенно в Европе и некоторых странах Азии (Японии, Корее), замедлила темп своего развития, что негативно сказалось на рынке сварочной техники. Так, например, в Японии объем потребления сварочных материалов в 2011 г. сократился по сравнению с 2010 г. на 1,2 % и составил 285,6 тыс. т. В основном это произошло за счет снижения на 3,8 % спроса на покрытые электроды [9].

Мировой рынок сварочного оборудования после кризиса 2009 г. восстанавливается очень медленно. Потребление сварочного оборудования в развитых странах уменьшилось на 40... 60 % по сравнению с 2008 г. Структура мирового рынка сварочной техники представлена на рис. 2. Доля рынка материалов для сварки и наплавки в 2010 г. составила 57, а сварочного оборудования — 24 %. Лидирующие позиции на рынке сварочного

оборудования занимает техника для дуговой сварки в инертных газах (МИГ). На ее долю приходится 40 % всего рынка сварочного оборудования. Этот сегмент рынка имеет очень хорошую динамику развития, особенно автоматизированное сварочное оборудование для синергетической сварки МИГ. Данный вид оборудования по скорости сварки в 3-4 раза превосходит аппараты ТИГ и замещает их на рынке сварочного оборудования.

Оборудование для газовой сварки и резки составляет 5...10 % рынка. Его объем постоянно сокращается, а где возможно, заменяется электрической сваркой. Исключение составляет отрасль судостроения, в которой использование электрической сварки опасно [10]. Основную долю на рынке сварочного оборудования составляет оборудование для дуговой и контактной сварки. Как видно из данных табл. 2, 3, в 2010 г. мировое потребление сварочного оборудования для дуговой и контактной сварки составило в количественном выражении только 74 % уровня потребления 2008 г., а в стоимостном — 65 % [6, 7].

Доля Китая в общемировом количественном объеме потребления сварочного оборудования для дуговой и контактной сварки составляет около 37, стран Европы — 14, Северной Америки — 10 %. В стоимостном выражении доля потребления стран Европы — 25, Китая — 20, Северной Америки — 18 %. Приведенные выше данные позволяют оценить структуру потребления основных видов сварочного оборудования в этих регионах. Так, в Китае и развивающихся странах преобладает спрос на недорогое оборудование для

Таблица 2. Количественный объем (шт.) потребления оборудования для дуговой и контактной сварки в 2008 и 2010 гг.

Регион (страна)	Дуговая сварка		Контактная сварка		Всего	
	2008	2010	2008	2010	2008	2010
Китай	477 000	430 000	8 000	8 500	485 000	438 500
Европа	216 000	150 000	18 000	11 000	234 000	161 000
Северная Америка	170 000	108 500	11 500	6 500	181 500	115 000
Япония	120 500	53 150	8 900	3 560	129 400	56 710
Страны АСЕАН	101 900	67 000	3 400	2 500	105 300	69 500
РФ и страны СНГ	83 400	55 000	2 000	1 400	85 400	56 400
Индия	78 800	65 000	2 100	2 300	80 900	67 300
Корея	72 300	45 000	4 300	2 600	76 600	47 600
Центральная и Южная Америка	69 900	56 000	5 100	4 000	75 000	60 000
Средний Восток	40 400	36 000	1 000	900	41 400	36 900
Африка	32 000	31 000	700	750	32 700	31 750
Тайвань	26 700	19 500	450	450	27 150	19 950
Океания	19 000	17 500	500	500	19 500	18 000
Всего	1 507 900	1 133 650	65 950	44 960	1 573 850	1 178 610

Таблица 3. Стоимостный объем (млн дол.) потребления оборудования для дуговой и контактной сварки в 2008 и 2010 гг.

Регион (страна)	Дуговая сварка		Контактная сварка		Всего	
	2008	2010	2008	2010	2008	2010
Европа	900	589	364	207	1264	796
Северная Америка	752	465	242	131	994	596
Китай	702	589	57	57	759	646
Япония	580	262	156	56	736	318
Корея	163	96	88	50	251	146
Страны АСЕАН	186	115	31	21	217	136
Центральная и Южная Америка	110	87	47	31	157	118
РФ и страны СНГ	136	85	15	11	151	96
Индия	126	100	17	17	143	117
Средний Восток	106	90	13	11	119	101
Африка	58	54	6	7	64	61
Океания	57	50	7	7	64	57
Тайвань	41	29	4	4	45	33
Всего	3 917	2 611	1 047	610	4 964	3 221

дуговой сварки. В структуре потребления сварочного оборудования (см. табл. 2) доля оборудования для дуговой сварки составляет в Китае и развивающихся странах в количественном выражении около 98, а в стоимостном (табл. 3) — около 90 %. В развитых странах доля оборудования для контактной сварки существенно выше и составляет соответственно 6...8 и 26...34 %.

В 2010–2011 гг. отмечены следующие тенденции на региональных рынках сварочной техники. Ситуация на рынке сварочной техники европейских стран была неоднозначной. Одним из первых рост рынка сварочной техники имел место в Германии, которая производит треть всей сварочной продукции Европы. По данным Немецкого общества сварщиков, в 2010 г. в этой стране произведено сварочной техники на 2,2 млрд евро, что превысило уровень 2009 г. на 7,5 %. Большую часть произведенной продукции (на 1,8 млрд евро) составляют машины и аппараты, однако рост их производства достиг всего 2,7 %. Стоимостный объем производства сварочных и присадочных материалов был всего 459 млн евро, но рост производства превысил 31 %. В 2010 г. выросли также объемы экспорта сварочной техники после спада в 2009 г. на 25,5 %. Германия экспортировала в 2010 г. сварочных машин и аппаратов стоимостью 1,4 млрд евро (+13,9 % к показателям 2009 г.) и сварочных материалов стоимостью 269 млн евро (+24 % к показателям 2009 г.). Отмечается незначительный рост продаж на рынке сварочной техники в странах Северной Европы, Нидерландах и Великобритании [11].

По оценке компании «Lincoln Electric», в странах Южной Европы (Португалии, Италии, Испании) объемы продаж сварочной техники в IV квартале 2011 г. сократились и перспектива их роста в I квартале 2012 г. не прогнозируется, что связано со значительным падением промышленного производства и ростом безработицы, которая достигла 22 % [4].

Эксперты таких фирм, как «Frost&Sullivan», ESAB, «Lincoln Electric», отмечают значительный рост продаж на рынке сварочной техники РФ. По прогнозу фирмы «Frost&Sullivan», объем продаж на внутреннем рынке этой страны к 2017 г. возрастет по сравнению с 2010 г. почти в два раза — с 445,4 до 941,2 млн дол. Следует отметить, что 80 % сварочного оборудования, которое поставляется на рынок РФ, составляет низкоценовая группа товаров, а рост объема рынка происходит вследствие увеличения импорта сварочной техники, а не внутреннего производства [12].

На рынке сварочной техники Северной Америки в июле 2009 г. после заметного спада начался подъем. Оценивая динамику рынка в 2009 г., эксперты прогнозировали, что уровень продаж 2008 г. будет достигнут только в 2013 г. Однако продажи крупных компаний (годовой объем продаж составлял 2,0...1,5 млрд дол.), таких как «Lincoln Electric», ITW уже в 2010 г. превысили уровень 2008 г. В 2011 г. менее крупные компании, например «Thermadyne» (годовой объем продаж около 500 млн дол.) также вышли на уровень продаж 2008 г. В 2011 г. рынок сварочной техники этого региона развивался очень динамично. Например, продажи компании «Lincoln Electric», ко-



торая занимает 50 % рынка Северной Америки, возросли в этом сегменте мирового рынка в 2011 г. на 29 % и достигли 1,3 млрд дол. По оценке экспертов, средний ежегодный рост рынка сварочной техники США в период за 2011–2015 гг. составит 6,4 %, а объем рынка достигнет 7,1 млрд дол. [13].

Рынок сварочной техники Азиатского региона продолжает активно развиваться. Доля этого региона в 2010 г. на мировом рынке сварочной техники возросла на 11% по сравнению с 2008 г. в основном за счет рынков Китая и Индии. Сегодня Китай является ведущим мировым производителем и потребителем сварочной техники. По данным фирмы «Frost&Sullivan», в 2010 г. объем рынка оборудования для сварки и резки Китая достиг 3,5 млрд дол., из которых 1,1 млрд (около 28 %) составили инверторные источники питания для сварки и резки. Доля производства инверторных источников питания все еще очень мала — приблизительно 60...70 % уровня развитых стран. По оценке китайских экспертов, доля инверторных источников питания в 2010 г. составляла около 47 % всего выпускаемого оборудования, а в 2012 г. она возрастет до 63 %. При этом в 2012 г. стоимостный объем производства сварочного оборудования превысит 4,2 млрд дол. [14].

Ведущие производители товаров отмечают значительный рост продаж на рынке сварочной техники в странах Южной Америки (Бразилии, Венесуэле и Аргентине). Продажи компании «Lincoln Electric» в этом регионе в 2011 г. увеличились на 33 % (до 157 млн дол.), также растет рынок сварочной техники в странах Северной и Южной Африки.

Региональное распределение мирового рынка сварочной техники представлено на рис. 3. По оценке специалистов ESAB, стоимостный объем мирового рынка сварочной техники, за исключением рынка сварочных роботов и средств автоматизации, в 2010 г. составил 13,6 млрд дол. [15].

В 2009–2011 гг. продолжился процесс регионального перераспределения производственных мощностей по производству сварочной техники крупных транснациональных компаний. Инвестиции в строительство новых и покупку существующих производств ведущими мировыми компаниями-производителями сварочной техники в Индии, Китае, Южной Америке, Восточной Европе и на Среднем Востоке стало закономерным явлением, что способствовало росту, модернизации и концентрации производственных мощностей в этих регионах. Так, например, в 2010 г. фирма ESAB приобрела 60 % акций компании «Condor Equipamentos Industriais Ltd.», ведущей бразильской компании по производству оборудования для газовой сварки и резки, а в 2011 г. — Сычевский электродный завод (Смоленская обл.),



Рис. 3. Мировой рынок сварочной техники (распределение по регионам в 2010 г.)

занимающий ведущую позицию на рынке сварочных материалов РФ. Компания «Lincoln Electric» вложила 20 млн дол. инвестиций в развитие мощностей по производству сварочных материалов в «Chennai» (Китай). При этом производственная мощность предприятия возросла с 10...15 до 70 тыс. т сварочных материалов в год. Компания «Lincoln Electric» также приобрела 100 % акций китайской компании «Jinzhhou Jin Tai Welding and Metal Co.», производящей сварочную проволоку. В 2011 г. компания «Lincoln Electric» приобрела два предприятия по производству сварочной проволоки в РФ — «ООО Северсталь-метиз» и «ОАО Межгосметиз-Мценск» [1, 4].

Экономический кризис дал также толчок процессу диверсификации деятельности ряда компаний. Например, в ноябре 2011 г. было объявлено о покупке компании «Charter International plc.», в состав которой входит фирма ESAB, британской компанией «Colfax Corporation», мирового лидера по разработке, конструированию, производству, продажам и обслуживанию систем транспортировки жидкостей [16].

Заметно активизировался процесс укрупнения (слияния) предприятий по производству сварочной техники. Особенно активно он идет в Китае, Индии и странах Юго-Восточной Азии, где очень велика доля малого и среднего бизнеса. В сентябре 2011 г. компания «Thermadyne» анонсировала объединение своих предприятий по производству сварочной техники в Малайзии и Китае, а также производств по выпуску оборудования для плазменной резки в Северной Америке. Компания «Lincoln Electric» объединила два предприятия, которые размещаются в США и Канаде [3, 4].

По оценке специалистов компании «Boston Strategies International», согласно индексу концентрации производства Херфиндалю – Хиршмана, рынок сварочной техники в настоящий период оценивается как умеренно концентрированный с индексом в IV квартале 2009 г. 1281. По прогнозу индекс концентрации в IV квартале 2012 г. превысит уровень 1400. Такой показатель концентрации уже вызывает тревогу и рассматривается

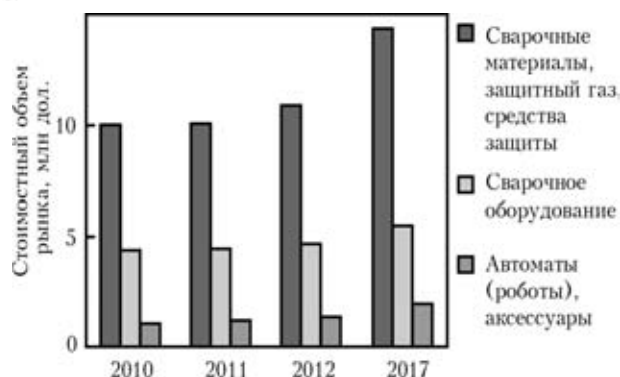


Рис. 4. Оценка и прогноз развития мирового сварочного рынка в 2010–2017 гг.

как некий предупредительный сигнал, указывающий на высокую вероятность монополизации рынка [17].

Как видно из изложенного выше, период 2008–2011 гг. был достаточно сложным для производителей сварочной техники. Очень быстрая смена тенденций на рынке требовала адекватной реакции от производителей товаров в сфере производства и управления. Как отмечает руководитель крупнейшей японской компании «Kobe Steel, Ltd.», только быстрое реагирование на запросы потребителя позволяет сегодня добиться успеха. Слоган компании — Качественный продукт/Техническая поддержка/Быстрая поставка — вот формула успеха на современном рынке сварочной техники [18].

Согласно данным исследования, проведенного маркетинговой компанией «BCC Research» (США), мировой рынок сварочной продукции в 2011 г. составил 16,3 млрд дол. (рис. 4).

Ожидается, что в 2012 г. мировой сварочный рынок достигнет 17, а в 2017 г. — 22 млрд дол. Ежегодный темп роста рынка до 2017 г. составит 5,2 %. При этом стоимостный объем рынка сварочных материалов, защитного газа и средств защиты достигнет в 2012 г. 10,9 млрд дол., к 2017 г. увеличится до 14,4 млрд дол. Ежегодный рост этого сегмента рынка составит в среднем 5,7 %; рынок сварочного оборудования в 2011 г. достиг 4,5 млрд дол. Согласно прогнозу «BCC Research», его объем возрастет в 2012 г. до 4,7 млрд дол., а к 2017 г. — до 5,5 млрд дол. и более. Ежегодный рост этого сегмента рынка составит в среднем 3,3 % [19]. Основными отраслями-потребителями сварочной техники являются строительство, транспорт, энергетика (включая нефте- и газодобывающую промышленность, электроэнергетику, нефтехимическую промышленность, производство труб и строительство трубопроводов), ремонт и восстановительные работы. На рис. 5 представлены средние мировые показатели распределения рынка сварочной техники между основными отраслями-потребителями [10].

В отличие от большинства металлообрабатывающих отраслей промышленности, сокративших



Рис. 5. Мировой рынок сварочной техники (распределение по основным отраслям промышленности в 2010 г.)

производство, а соответственно и потребление сварочной техники в период кризиса 2008–2009 гг. такие отрасли, как энергетика (ветро-, ядерная, гидро- и солнечная энергетика, строительство трубопроводов) и ремонт/техническое обслуживание увеличили потребление сварочного оборудования и материалов.

По оценкам экспертов фирмы «Frost&Sullivan», в энергетике до 2015 г. ожидается ежегодный рост рынка сварочной техники на 7 %. Прогнозируется, что объем рынка сварочной техники в этой отрасли промышленности возрастет с 1,9 (2008 г.) до 3,0 млрд дол. (2015 г.) [20]. По оценкам экспертов фирм ESAB, «Frost&Sullivan» наиболее перспективным сегментом рынка сварочной техники является ветроэнергетика. В настоящее время доля мирового производства энергии с использованием ветро- энергетических установок не превышает 2 %. Однако темп роста мощностей постоянно возрастает. Так, мощность ветровой энергетики в мире в 2007 г. составляла 27 тыс. МВт, а в 2012 г. прогнозируют ее увеличение до 60 тыс. МВт. Инвестиции в сварочное оборудование этого сегмента рынка постоянно возрастают. По оценке специалистов фирмы ESAB, на каждый вновь вводимый 1 МВт мощности потребляется 700 кг сварочных материалов и 600 кг сварочного флюса. Данный сегмент рынка имеет хорошие перспективы для дальнейшего роста [1]. Однако при этом существуют и более осторожные оценки развития рынка ветроэнергетики. Президент компании ITW Д. Спир считает, что не следует ожидать слишком многого от ветроэнергетики, стремительный рост рынка может оказаться всего лишь всплеском [2].

Несмотря на аварию на японской атомной электростанции и протестные настроения относительно развития атомной энергетики в Европе и Северной Америке (США) в 2012 г. будет начато строительство двух новых атомных станций в штате Южная Каролина и Джорджия. Саудовская Аравия в течение следующих 20 лет планирует соорудить 16 атомных реакторов. Реализация этих и ряда других проектов дает основание говорить



ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

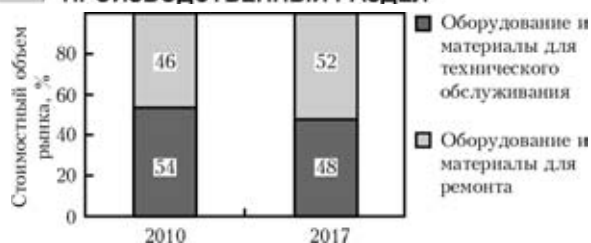


Рис. 6. Структура рынка сварочного оборудования в секторах ремонта и технического обслуживания в 2010 и 2017 гг. (прогноз)

о хорошей перспективе роста рынка сварочной техники в этом сегменте рынка.

Рост строительства новых магистральных наземных и подводных транснациональных и трансконтинентальных нефте- и газопроводов в большинстве регионов мира определил увеличение спроса на сварочную технику в данном сегменте рынка. Многие компании, например «Lincoln Electric», фокусируют свои усилия на разработке новых видов сварочного оборудования, предназначенного для орбитальной сварки, а также сварочных материалов для сварки спиральношовных труб. По результатам исследований фирмы «Frost&Sullivan», мировой рынок сварочной техники в этом сегменте с 2009 по 2016 гг. возрастет на 45 % и достигнет 547,7 млн дол. [21]. Отличные перспективы роста на рынке сварочной техники и услуг исследователи прогнозируют в секторе ремонта и технического обслуживания [22].

Сварка, пайка и поверхностное упрочнение (наплавка), а также различные виды термического напыления (плазменное, газопламенное, дуговое, высокоскоростное газопламенное) являются основными технологиями из числа тех, которые применяют в секторе ремонта и технического обслуживания. Доля рынка сварочного оборудования и расходных материалов в 2010 г., а также прогноз на 2017 г. в секторе ремонта и технического обслуживания приведены на рис. 6.

По данным исследований, проведенным фирмой «Frost&Sullivan», стоимостный объем мирового рынка сварочного оборудования для ремонта и технического обслуживания в 2010 г. составил 650,3 млн дол. Специалисты прогнозируют, что в 2017 г. объем рынка достигнет 859,6 млн дол., а его среднегодовой прирост составит 4 %.

Оборудование для дуговой сварки занимает доминирующее положение на рынке ремонта и технического обслуживания. Его доля в 2010 г. равнялась 82,5, доля оборудования для газовой сварки — 15,8, другие — 1,7 %. В период до 2017 г. в структуре рынка доля оборудования для дуговой сварки вырастет до 84,8, а оборудования для газовой сварки снизится до 12,8 %.

Data on the state of world production, consumption and market of welding equipment in the period of 2008-2011 and prospects for their further development are presented

Стоимостный объем мирового рынка сварочных материалов для ремонта и технического обслуживания в 2010 г. составил 1755,6 млн дол. За период 2010–2017 гг. ожидается ежегодный рост рынка на 4 %, при этом прогнозируют, что стоимостный объем рынка в 2017 г. достигнет 2450 млн дол., т. е. рынок сварочной техники для ремонта и технического обслуживания в 2017 г. превысит 3 млрд дол.

Таким образом, несмотря на периодические спады во время экономических кризисов мировой сварочный рынок продолжает расти, развиваться и трансформироваться.

1. Charter International plc //www.charter.ie.
2. ILLINOIS TOOL WORKS INC.2010. Annual Report//http://www.itw.com/.
3. THERMADYNE Moderator: Debbie bockius//www.thermadyne.com.
4. Lincoln Electric Holdings, Inc. 4Q 2011 Financial Results Conf. call, Feb. 17, 2012//www.lincolnelectric.com.
5. Lincoln Electric Holdings, Inc. 4Q 2011//ZACKS. Investment Research // www.Zack.com.
6. Worldwide demand for welding consumables. Worldwide demand for welding machines // The Japan Welding News for the World. — 2009. — 13, № 47. — P. 7.
7. Worldwide demand for welding consumables. Worldwide demand for welding machines // Ibid. — 2011. — 15, № 55. — P. 5–6.
8. Tompleman J. Charter investory day 31.10.2006//www.charter.ie.
9. What das 2012 hold for the japan's welding industry? // The Japan Welding News for the World. — 2012. — 16, № 58. — P. 1–4.
10. Thermadyne Holdings Corporation. Investor presentation. August, 2011//www.thermadyne.com.
11. Lagebericht zur Branche 2010/11//DVS 2010 //www.die-verbundungs-spezialisten.de.
12. Strategic analysis of russian welding equipment market/Frost&Sullivan// www.reportlinker.com.
13. US welding equipment &consumables market// www.reportlinker.com.
14. China inverter welding and cutting equipment industry report, 2010–2011//www.researchandmarket.com.
15. Charter. An introduction. Sept. 2010// www.charter.ie.
16. Charter. Press release. Interim management Statement, 1 July to 27 Oct. 2011//www.charter.ie.
17. Market assessment and forecast. Building materials, Dec. 2009/Boston strategies intern./www.bostonstrategies.com.
18. Implement QTQ area in the world! Aims of the most reliable enterprise from the world customers! Kobe Steel, Ltd. Welding Business // The Japan Welding News for the World. — 2011. — 15, № 56. — P. 2–3.
19. Welding equipment and supplies: The global market//www.bccresearch.com.
20. Strategic analysis of the global welding market in energy generation/Frost&Sullivan/www.frost.com.
21. Strategic analysis of the welding equipment and consumables market in the global pipeline industry/Frost&Sullivan/www.frost.com.
22. Archana Chauhan. Welding requirements for repairs and maintenance increased adoption of preventive maintenance leads the market for welding/Frost&Sullivan/www.frost.com.

Знаменательные даты

ВКЛАД ИЭС им. Е. О. ПАТОНА В ПОСЛЕВОЕННОЕ
ВОЗРОЖДЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

60 лет назад сварочное производство СССР достигло рубежа массового внедрения автоматической сварки под флюсом. В ИЭС им. Е. О. Патона были разработаны технологии совмещенной сборки и сварки, соответствующие станки-автоматы и поточные линии, рациональные сварные конструкции горно-шахтного и энергетического оборудования, металлургических печей, мостов.

За годы Великой Отечественной войны в Украине, вся территория которой была оккупирована немецко-фашистской армией, было разрушено свыше 16 тыс. промышленных предприятий, шахт, мостов и 200 тыс. производственных зданий. Восстановление экономики в значительной мере зависело от возможностей сварочного производства. Реально в арсенале техники были универсальные способы ручной дуговой и газовой сварки. Автоматическая дуговая сварка под флюсом и контактная сварка были приспособлены для массового производства только в цеховых условиях. В некоторых случаях, особенно для ответственных конструкций, как и раньше, применяли клепку. 9 июня 1947 г. Совет Министров СССР принял постановление «О расширении применения в промышленности автоматической электросварки под слоем флюса», согласно которому планировалось в ближайшие полтора года ввести в эксплуатацию 670 сварочных автоматов на 111 заводах страны; резко увеличить объем внедрения сварки при строительно-монтажных работах. Программа по возрождению промышленного потенциала страны, в том числе и промышленности Украины, затрагивала все аспекты деятельности сварщиков: совершенствование сварных изделий, создание новых сварочных материалов, аппаратов и источников питания, разработку техники сварки; развитие науки и образования. Проект постановления был подготовлен под руководством Е. О. Патона, стремившегося расширить объемы применения автоматической сварки, достигнутые в годы войны в производстве вооружений. Дуговую сварку

под флюсом начали интенсивно развивать в нескольких направлениях.

Рационализация сварных конструкций была одним из важнейших направлений, которому Е. О. Патон уделил внимание с первого дня занятия сварочным производством. Путем совершенствования форм в институте решались задачи технологичности сварных конструкций, снижения их массы, уменьшения количества соединительных деталей. Конверсия достижений военных лет состояла в принципиально новом подходе к проектированию и изготовлению машин, резервуаров, труб, промышленных сооружений. Одновременно важнейшим направлением развития сварочного производства стало создание универсальной сварочной (тракторов и шланговых полуавтоматов) и специализированной аппаратуры для массового производства однотипных изделий. Для того чтобы расширить область применения сварки под флюсом на монтажно-строительные работы была решена задача автоматической дуговой сварки швов на вертикальной плоскости с применением подвижного принудительно охлаждаемого ползуна (Г. З. Волошкевич).

Руководство страны запланировало в первую очередь восстановить шахты и горно-обогатительные комбинаты. Донбасс, Криворожье и ряд других регионов нуждались в тысячах вагонеток, шахтных стояков, шахтерских ламп. В то же время Торецкий машиностроительный завод выпускал всего 4 вагонетки за смену, при этом приходилось приваривать ручную короткими швами 25 деталей. Под руководством Е. О. Патона была разра-



Монтаж резервуара вместимостью 10 тыс. м³ из рулонированных конструкций



Механизированная сварка под флюсом палубного набора на Николаевском заводе «Океан»



Линия автоматической сварки труб на Харцызском трубном заводе

ботана новая конструкция вагонеток и новый процесс их производства — осталось 8 швов. В основу организации поточной линии был положен принцип соединения операций сборки и сварки узлов с применением вальцесварочных станков (Р. И. Лашкевич, В. Е. Патон, А. И. Коренной). Девять сварочных головок обеспечили выпуск за смену более 60 вагонеток. Были также усовершенствованы конструкции шахтерских ламп, стальных крепежных стояков, разработаны специальные установки и автоматические линии по их производству. До 1950 г. все 220 основных шахт Донбасса были восстановлены, введено в действие несколько новых шахт и добыча угля превысила довоенный уровень.

В 1946–1948 гг. на Мариупольском заводе им. Ильича была введена в действие линия производства железнодорожных цистерн. Внутренние и внешние продольные и внешние круговые швы выполняли автоматической сваркой под флюсом тракторами. Технология поточной сборки и сварки локомобильных котлов была внедрена в 1950 г. на Херсонском машиностроительном заводе им. Г. И. Петровского. На «Запорожстали» впервые в мировой практике реализована автоматическая сварка вертикальных и горизонтальных швов кожуха доменной печи объемом 1050 м³ (Г. З. Волошкевич). Новые технические решения позволили сократить продолжительность строительства доменных печей и повысить их качество. При этом объем механизированной сварки составил 70 %. До конца 1952 г. были восстановлены и сооружены 23 доменные печи мощностью 8,3 млн т чугуна в год, 51 мартеновская печь годовой мощностью 4,7 млн т стали, прокатные станы мощностью 4,4 млн т проката.

Е. О. Патон также акцентировал внимание на форсирование работы по внедрению полуавтоматической сварки под флюсом, начатой Б. Е. Патном еще в 1943 г. К 1948 г. было разработано оборудование и технология сварки под флюсом тонкой электродной проволокой (диаметром 1...3 мм) — шланговая полуавтоматическая дуговая сварка (Б. Е. Патон, Д. А. Дудко, П. Г.

Гребельник, И. Н. Рублевский др.), которая позволила механизировать производство таких сложных конструкций с множеством коротких швов, как корпуса кораблей.

В Украине в ИЭС им. Е. О. Патона впервые в мире создан метод соединения металла большой толщины за один проход — электрошлаковая сварка (Б. Е. Патон, Г. З. Волошкевич), создана контактная сварка неповоротных стыков труб и железнодорожных рельсов (Н. Г. Остапенко, В. К. Лебедев). Примером универсального применения автоматической сварки под флюсом является возведение цельносварного моста им. Е. О. Патона через Днепр (Киев), завершившееся в 1953 г. и признанного Американским сварочным обществом выдающейся сварной конструкцией.

Г. В. Раевскому удалось решить сложнейшую технологическую задачу, поставленную Е. О. Патном, — рациональное изготовление крупногабаритных конструкций в цехах с применением автоматической сварки. Впервые в мире был создан метод промышленного строительства резервуаров из плоских полотнищ. Три основных элемента резервуара (днище, стенка и кровля) собирали и сваривали автоматами под флюсом в полотнища в цеху. Для транспортировки их сворачивали в габаритные рулоны, а потом на монтажной площадке разворачивали. На месте эксплуатации осталось сварить замыкающие вертикальные стыки стенки и приварить днище и крышу к стенке. Применение новой технологии изготовления резервуаров дало возможность в четыре раза уменьшить трудоемкость монтажных работ, в пять–десять раз ускорить сроки строительства. В 1948 г. для индустриального производства резервуаров были построены цеха на Куйбышевском и Запорожском заводах металлоконструкций. Монтаж 144 резервуаров (годовая продукция) в кратчайшие сроки обеспечил страну необходимым количеством нефтехранилищ при годовой экономии в размере 7 млн руб. Эта идея пригодилась при решении еще одной проблемы — изготовление водо-, газо-, продуктопроводов из двух полос-рулонов длиной до 1...2 км в одном отрезке, сваренных между собой по длинным торцам, свернутым на заводах и разворачиваемых и раздуваемых на месте монтажа.

Внедрение сварки под флюсом позволило высвободить для других работ свыше 30 тыс. квалифицированных рабочих. Благодаря разработкам ИЭС им. Е. О. Патона и их применению в первые послевоенные годы удалось достичь успехов в восстановлении разрушенной промышленности страны. В Украине к 1952 г. была полностью восстановлена топливно-энергетическая и металлургическая промышленность.

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Ti-2012 в СНГ»

Организованная Межгосударственной ассоциацией «Титан» традиционная ежегодная Международная конференция «Ti-2012 в СНГ» в 2012 г. прошла 22–25 апреля в Казани (Россия). В конференции приняли участие около 200 человек из России, Украины, Казахстана, Таджикистана, Японии, Германии, Италии, Норвегии, Люксембурга, Польши, Швейцарии и Китая. На конференции выступили с докладами ученые и специалисты в области титана из ведущих научно-исследовательских организаций и промышленных предприятий России, Украины и других стран: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет — УПИ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», «МАТИ» — Российского государственного технологического университета им. К. Э. Циолковского, ОАО «Всероссийский институт легких сплавов», ФГУП «Всероссийский институт авиационных материалов», Института проблем сверхпластичности металлов РАН, Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, ОАО «Корпорация «ВСМПО-АВИСМА», ОАО «Зеленодольский завод им. А. М. Горького», ОАО «РИТМ», ОАО «Чепецкий механический завод», ОАО «Нормаль», ОАО «Электромеханика»,

Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Института металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Донецкого физико-технического института им. О. А. Галкина НАН Украины, Государственного научно-исследовательского и проектного Института титана, ГП «Антонов», ALD Vacuum Technologies GmbH (Германия), TiRus International SA (Швейцария), NTC for Titanium Inc. (Япония) и др. Всего было представлено 88 докладов на пленарных заседаниях и в секциях «Сырье. Металлургия», «Металловедение и технология титановых сплавов» и «Экономика титана».

Делегация специалистов одного из ведущих мировых центров в области материаловедения титановых сплавов — ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» представила на конференции большое количество докладов по созданию новых и совершенствованию существующих титановых сплавов, определению их эксплуатационных характеристик, в том числе долгосрочных, разработке технологий их сварки, деформационной и термической обработки. Активное участие в работе конференции приняли ученые из двух крупнейших в России материаловедческих



центров: Уральского государственного технического университета — УПИ и МАТИ-РГТУ им. К. Э. Циолковского, в которых ведутся интенсивные исследования в области материаловедения титана и сплавов на его основе.

На конференции достаточно полно были представлены научно-технические разработки институтов Национальной академии наук Украины в области материаловедения титановых сплавов. От ИЭС им. Е. О. Патона были представлены доклады о свариваемости новых жаропрочных и конструкционных титановых сплавов, кинетике поглощения азота жидким титаном, новейших технологических разработках аргонодуговой и электронно-лучевой сварке титановых сплавов, производстве крупногабаритных дисков для газотурбинных установок из жаропрочных сплавов титана, полученных методом электронно-лучевой плавки. Специалисты Института металлофизики им. Г. В. Курдюмова рассмотрели материаловедческие, физико-химические и технологические аспекты изготовления полуфабрикатов и деталей из титановых сплавов, в том числе методами порошковой металлургии. Представители Физико-механического института им. Г. В. Карпенко представили свои разработки в области получения градиентных покрытий на изделиях из титановых сплавов, а специалисты Донецкого физико-технического института им. О. А. Галкина показали возможности улучшения механических характеристик титана методами винтовой экструзии.

В докладах Д. А. Курочкина (ОАО «Корпорация «ВСМПО-АВИСМА»), Masahiro Tsutsui (Японская Титановая Ассоциация), Steven Hancock (TiRus International SA, Швейцария), T. Nishimura (NTC Cor-

poration for titanium, Япония) и И. С. Полькина (ОАО «ВИЛС») отмечался рост объемов заказов на титановую продукцию в 2011 г. как в гражданских, так и в военных секторах промышленности. Так, например, мировой объем производства титанового проката в 2011 г. вырос на 24 % по сравнению с 2010 г. и составил 140 тыс. т. Основными потребителями титановых полуфабрикатов продолжают оставаться военное и гражданское самолетостроение, предприятия — изготовители теплообменной и химической аппаратуры. Растет применение титана в нефте- и газодобывающей промышленности, медицине, производстве спортивного инвентаря.

После завершения заседаний участники конференции посетили завод ОАО «Зеленодольский завод им. А. М. Горького» (г. Зеленодольск, Татарстан, Россия), осмотрели некоторые производства по сборке корпусов судов и крупнейший в мире цех литья титановых отливок и приняли участие в торжествах по случаю выпуска миллионной отливки с момента пуска данного производства в конце 1960-х годов. Цех литья титановых отливок оснащен девятью вакуумно-дуговыми литейными печами и может выпускать до 700 т литых заготовок в год. На его площадях находится крупнейшая в мире вакуумно-дуговая литейная печь «Нева-5», которая может производить отливки из титановых сплавов массой до 4000 кг.

В заключение хотелось бы отметить высокий уровень проведения конференции и выразить благодарность ее организаторам в лице ЗАО «Международная организация «Титан» и ее председателя А. В. Александрова.

С. В. Ахонин, д-р техн. наук

УДК 621/791/009(100)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНКУРС МОЛОДЫХ СВАРЩИКОВ В ЧЕХИИ

С 16 по 18 апреля 2012 г. в г. Фридек-Мистек (Чешская Республика) состоялся 16-й Международный конкурс молодых сварщиков «Золотой кубок Линде». Организатором конкурса была средняя профессиональная школа г. Фридек-Мистек совместно с генеральным партнером фирмой Linde Gas a.s. Конкурс проводился на учебно-производственной базе в следующих номинациях: метод 111 (ручная дуговая сварка покрытыми электродами), метод 135 (дуговая сварка плавящимся электродом в активных газах), метод 141 (дуговая сварка неплавящимся электродом в инертных газах), метод 311 (газосварочная сварка). В конкурсе могли участвовать только ученики учебных или учебно-профессио-

нальных дневных заведений (до 20 лет), которые окончили (или скоро заканчивают) начальный курс подготовки сварщиков.

Конкурс был рекомендован к проведению Министерством образования Чешской Республики, в его оргкомитет вошли: председатель — магистр Йозеф Пелуха, секретарь — К. Кубанёва, директор школы-организатора — П. Жезничек. Конкурс проходил в соответствии с объявленными заранее условиями и программой, был разделен на национальную и международную части. В национальной части конкурса для чешских учеников проводились также соревнования по теории в указанных выше четырех методах сварки.



Объявление результатов конкурсов

Программа практической части конкурса:

- метод 111, свариваемый материал 1.1 (углеродистая сталь), сварочный источник PEGAS 160E фирмы ALFA IN a.s., соединение стыковое, длина пластин 300 мм;
- метод 135, свариваемый материал 1.1 (углеродистая сталь), сварочный источник фирмы FRONIUS Ceska republika s.r.o. Transsteel 5000 и защитный газ фирмы Linde Gas a.s. — 82 % Argon + 18 % CO₂, соединение стыковое, длина пластин 300 мм;
- метод 141, свариваемый материал 8 (аустенитная нержавеющая сталь), сварочный источник TETRIX 180 Comfort фирмы EWM Hightec Welding s.r.o. и защитный газ фирмы Linde Gas a.s. — Argon 4.6, соединение стыковое, длина пластин 300 мм;
- метод 311, свариваемый материал 1.1 (углеродистая сталь), сварочные комплекты фирмы GCE Trade s.r.o. и защитные газы фирмы Linde Gas a.s., соединение стыковое, длина пластин 300 мм.

Для сварки были предоставлены присадочные материалы фирмы ESAB Vamberg s.r.o.

В состав жюри вошли опытные представители фирм: DOM — ZO 13 s.r.o., Прага (Чехия); TESYDO s.r.o., Брно (Чехия); Cech svareckych odborniku, Трнава (Словакия); Slovenske energeticke strojarne a.s., Тлмаче (Словакия); DVS Bezirksverband, Хемниц (Германия). Гарантом справедливости оценок было Чешское сварочное общество ANB. В состав жюри теоретической части личного конкурса вошли преподаватели школы-организатора.

В конкурсе участвовали 130 молодых сварщиков из Чешской Республики, Словацкой Республики, Германии и Украины. Материальную поддержку конкурса оказали ESAB VAMBERK s.r.o., FRONIUS Ceska republika s.r.o., ABICOR BINZEL s.r.o., GCE Trade s.r.o., Huisman Konstrukce s.r.o., BLANCO CS CZ spol. s r.o., EWM Hightec Welding s.r.o.,

NOVOGEAR s.r.o., ALFA IN a.s., ArcelorMittal a.s. Frydek-Mistek, 3M Cesko s.r.o., Lichna Trade CZ s.r.o., а также правительство Моравско-Силезского края.

В состав делегации Украины вошли сопровождающие лица: А. А. Кайдалов, д-р техн. наук, вице-президент Общества сварщиков Украины (руководитель делегации, г. Киев); В. М. Мельник, директор Ярмолинского профессионального лицея, пос. Ярмолинцы Хмельницкой области; А. И. Крузер, директор Нетешинского профессионального лицея, г. Нетешин Хмельницкой области; а также конкурсанты: А. Бабич (метод 111) Нетешинский профессиональный лицей; Р. Апанчук (метод 141) Нетешинский профессиональный лицей; А. Коломыя (метод 311) Ярмолинский профессиональный лицей.

Основная организационно-техническая подготовка конкурсантов проведена Советом Общества сварщиков Украины, Управлением профессионально-технического образования Хмельницкой областной администрации, Хмельницким и Одесским областными отделениями Общества сварщиков Украины.

На торжественном открытии конкурсов присутствовали представители администрации Моравско-Силезского края и Чешского сварочного общества ANB, а также представители фирм-спонсоров и средств массовой информации. После выступлений организаторов и спонсоров конкурса состоялось короткое представление танцевальной группы «StormDance».

После торжественного открытия конкурсанты автобусом были доставлены к месту проведения конкурса (производственный участок школы-организатора на заводе Valcoven plechu a. s.) в сопровождении переводчиков школы-организатора. Сопровождающие лица туда не допускались.

На следующий день все сварные образцы участников обоих конкурсов были выставлены для всеобщего обозрения, но под обозначенными номерами (т. е. в том виде, как с ними работало жюри).

Во время конкурса были проведены презентации и доклады фирм-спонсоров, а также выставка их продукции.

Для сопровождающих лиц и участников конкурса были проведены экскурсии на автозавод фирмы «Hyundai», расположенный в 10 км от г. Фридек-Мистек, который изготавливает три модели легковых автомобилей Hyundai серии i.

На торжественном закрытии были подведены итоги конкурса и награждены победители и призеры. Победителями конкурса стали: С. Якуб, Д. Манак, Л. Ружичка (номинации 111, 135 и 311 соответственно, Чехия) и Б. Адлер (номинации 141, Германия). Призы были предоставлены фирмами ESAB VAMBERK s.r.o., FRONIUS Ceska republika

s.r.o., ABICOR BINZEL s.r.o., GCE Trade s.r.o., BLANCO CZ spol. s r.o., ALFA IN a.s., EWM Hightec Welding s.r.o., 3M Cesko s.r.o., Lichna Trade CZ s.r.o., правительством Моравско-Силезского края, средней профессиональной школой г. Фридек-Мистек и др.

Подготовка и проведение международного конкурса молодых сварщиков были организованы безукоризненно.

Результаты конкурса и фотоотчет представлены на сайте школы-организатора www.sosfm.cz. Конкурс стал серьезным вкладом в поднятие престижа и популяризацию профессии сварщика.

Следующий конкурс молодых сварщиков «Золотой кубок Линде» состоится в апреле 2013 г.

А. А. Кайдалов, д-р техн. наук,
А. А. Абрамов, канд. техн. наук

К 90-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ В. К. ЛЕБЕДЕВА



Владимир Константинович Лебедев, доктор технических наук, профессор, академик НАН Украины, заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат Ленинской премии, Государственных премий СССР, УССР и Украины, лауреат Премии им. Е. О. Патона НАН Украины родился 6 июня 1922 г. в Данкове ныне Липецкой области (Россия).

После окончания Московского энергетического института в 1945 г. В. К. Лебедев поступил на работу в Институт электросварки и активно включился в исследования по разработке и созданию новой сварочной техники.

За более чем 60 лет работы в институте В. К. Лебедев прошел путь от младшего научного сотрудника до руководителя крупного исследовательского подразделения, заместителя директора по научной работе. Его первые исследования были посвящены изучению особенностей и разработке методов расчета сварочных трансформаторов со сложными полями рассеяния, что нашло отражение в кандидатской диссертации, защищенной в 1948 г. В 1959 г. В. К. Лебедеву была присуждена степень доктора технических наук за работу, внесшую существенный вклад в теорию и практику современного трансформаторостроения.

В. К. Лебедев был одним из ведущих специалистов в области электротермии и преобразования электрического тока. Наиболее значимые его работы связаны с изучением способов преобразования электрической энергии в тепловую и созданием десятков типов новых источников питания для разных способов дуговой, электрошлаковой, контактной, электронно-лучевой, лазерной сварки и для специальной металлургии. Эти источники питания нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Разработки В. К. Лебедева известны не только в Украине и странах СНГ, но и далеко за их пределами.

Результаты научных исследований В. К. Лебедева, а также его изобретения составили основу принципиально новой технологии и оригинального оборудования для контактной стыковой сварки изделий с большим поперечным сечением соединяемых деталей. Эта технология, благодаря высокой производительности, получила широкое применение на строительстве железнодорожных путей, за что в 1966 г. В. К. Лебедев в составе авторского коллектива был удостоен звания лауреата Ленинской премии.

Последующее развитие исследований в этом направлении привело к созданию технологических комплексов с внутритрубными машинами для контактной стыковой сварки труб большого диаметра. В. К. Лебедев внес также значительный вклад в разработку, создание и внедрение оборудования для многопозиционной контактной сварки головок блоков локомотивных дизелей и теплообменников



мощных трансформаторов. Эти работы были отмечены Государственной премией УССР (1976).

В. К. Лебедевым был проведен цикл исследований, имеющих большое значение для науки и техники в области контактной стыковой сварки силовых элементов летательных аппаратов. В 2001 г. В. К. Лебедеву за цикл работ в области сварки и родственных технологий присуждена премия им. Е. О. Патона НАН Украины.

Напряженная творческая работа у В. К. Лебедева всегда сочеталась со способностью не только ощущать потребности производства, но и определять перспективные и приоритетные направления развития науки и техники. Ярким свидетельством этого была увлеченность академика В. К. Лебедева новым для ученых и специалистов сварщиков направлением — созданием биоэлектрической технологии, позволившей впервые получить качественные сварные соединения живых мягких тканей. Сконцентрировав усилия специалистов инженерного и медицинского профилей, В. К. Лебедев стал ведущим разработчиком проекта «Сварка живых тканей», выполняемых в ИЭС им. Е. О. Патона при участии Международной ассоциации «Сварка» и компании «Consortium Service Management Group Technologies», Inc., США. Его разработки теоретических основ процесса соединения живых тканей и основ автоматической самонастройки процесса получения качественного соединения позволили впервые в мировой практике создать сварочное медицинское оборудование и сварочный медицинский инструментарий для проведения хирургических операций по восстановлению физиологических функций поврежденных органов человека. Новая

сварочная медицинская технология, созданная под руководством и при участии В. К. Лебедева, нашла успешное клиническое применение. В 2004 г. коллективу авторов была присуждена Государственная премия Украины в области науки и техники за электрическую сварку мягких живых тканей.

В. К. Лебедев — автор свыше 450 научных работ, в том числе 11 монографий, более 200 изобретений по новым способам сварки и сварочному оборудованию. На большинство изобретений получены патенты.

В. К. Лебедев охотно и щедро передавал свой богатый опыт и знания своим ученикам, коллегам по работе, молодым сотрудникам. Им подготовлено 10 докторов и 42 кандидата технических наук.

Около 30 лет В. К. Лебедев активно руководил работой редколлегии ведущего специализированного журнала «Автоматическая сварка».

Многолетний творческий труд В. К. Лебедева отмечен государственными наградами, среди которых орден Ленина, орден Октябрьской Революции, болгарский орден «Кирилл и Мефодий» и медали.

Все, кто работал и общался с Владимиром Константиновичем, помнят его исключительную порядочность, добросердечность, доброжелательность и интеллигентность.

Светлую память о Владимире Константиновиче Лебедеве, известном ученом в области технологии сварки и сварочного оборудования и мудром человеке, с благодарностью хранят его коллеги и ученики.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
редколлегия журнала «Автоматическая сварка»

ПЛАЗМЕННАЯ ОЧИСТКА ЗАГРЯЗНЕННЫХ ВОД

При содействии Хомма Масато, директора Ассоциации дружбы между Японией, Украиной и Молдовой, изготовлен специализированный плазменный комплекс и выполнены тестовые испытания в префектуре Фукусима влияния плазменной очистки на радиоактивность воды. Перспектива использования плазмохимических процессов в сложных задачах очистки загрязненных вод в основном базируется на высокоэффективной окислительной технологии. Плазменные методы являются наиболее эффективными для очистки или уничтожения в промышленных масштабах любых отходов, в том числе содержащих микроорганизмы, так как температура плазмы может быть выше температуры диссоциации и ионизации любых молекул, что обеспечивает распад любого устойчивого загрязняющего соединения. Кроме того, в газовой плазме образуется большое количество химически активных радикалов, ионов и колебательно-возбужденных молекул, что существенно ускоряет протекание химических реакций. В частности, наиболее распространенной и широко известной промышленной плазмохимической окислительной технологией является озонирование. Озон генерируется в барьерном электрическом разряде, горящем между металлическими электродами, разделенными твердым диэлектриком, под действием переменного напряжения с частотой несколько килогерц. В настоящее время изготавливаются мощные высокопроизводительные озонаторы, в которых на выработку 1 кг озона расходуется около 10 кВт·ч электроэнергии, вводимой в электрический разряд. Однако окислительный потенциал озона такой, что он является селективным окислителем. Существует много соединений, с которыми он практически не взаимодействует. Кроме того, продуктом реакций с озоном могут быть озониды, относящиеся к веществам, опасным для здоровья человека.

Авторы этой информации развивают новое направление в водоочистке, основанное на использовании рассеянного плазменно-дугового разряда в проточной газонасыщенной водной среде. Электродуговой разряд в воде (парах воды) — это эффективное средство генерирования различных химически активных соединений (радикалов), мощного ультрафиолетового излучения и ударных волн (рис. 1). Таким образом, плазма газонасыщенного водяного пара является уникальным источником химико-термической обработки материалов благодаря генерированию химически активных частиц, таких как O , O_3 , OH , H_2O_2 и др., УФ-излучению и акустическому воздействию в виде ударных волн.

Наиболее высокий окислительный потенциал имеют радикалы OH .

Образующиеся при определенных условиях в электрическом разряде радикалы OH не погибают мгновенно при взаимодействии между собой. Среднее время снижения концентрации OH в три раза составляет около 0,1 с. Время уменьшения исходной концентрации озона в три раза при движении смеси, извлеченной из реактора, будет порядка около 1...2 с. Таким образом, озонгидроксильную смесь при стационарной концентрации активных частиц, получаемую в электрическом разряде, можно транспортировать на значительные расстояния, и время жизни такой смеси порядка секунды. В принципе в течение этого времени, не превосходящем времени жизни локальных фрагментов структуры, должны пройти все целевые химические реакции. Опыт свидетельствует о том, что этого времени достаточно для окисления растворенных в воде солей тяжелых металлов и перевода их в нерастворимые гидроксиды, которые выпадают в осадок. Описанные особенности создают предпосылки для универсальной технологии, очищающей воду от тяжелых металлов, со-

лей, органических соединений, продуктов жизнедеятельности человека и животных и одновременно обеззараживающей (гибнут бактерии, вирусы). Плазменную технологию отличает интегрируемость, т. е. для повышения производительности и глубины очистки набирается необходимое количество «плазменных модулей».

На базе японской компании (АО) «Канадзава» при участии с украинской стороны киевских фирм «ЛИКОМ» и «Представительской фирмы Институт газа», а с японской стороны «Ohmi Industry Engineering», Global Energy Trade Co. LTD был разработан и изготовлен мобильный передвижной комплекс для плазменной очистки радиоактивно зараженной воды (рис. 2).

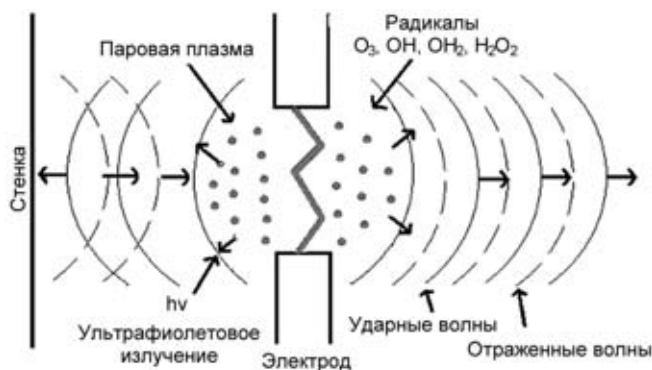


Рис. 1. Электродуговой разряд в воде



Рис. 2. Плазменный модуль:
а — общий вид мобильной плазменной установки для очистки радиоактивной воды;
б — блочно-модульное исполнение плазменной установки



Рис. 3. Публичные испытания процесса плазменной очистки зараженной воды в префектуре Фукусима

Место забора: г. Дате преф. Фукусима.

Дата забора: 28.02.2012, время забора:

10:30 — загрязненная вода, 14:30 — очищенная вода

Позиции анализа	Результаты анализа, Бк/кг	
	загрязненная вода	очищенная вода
Йод-131	Не обнаружен	Не обнаружен
Йод-134	7400	110
Цезий-137	11000	160

С использованием указанного комплекса были проведены публичные испытания процесса плазменной очистки радиоактивной воды в два этапа с участием представителей электрогенерирующей компании «Токио Электрик Пауэр Компани», (АО) «Токио Дэнрёку», лаборатории технических разработок «Группа технологий энвиронике», представителей Муниципалитета города Дате, журналистов газет «Йомиури синбун Токио», «Никкан коугё синбун», «Фукусима минхоуся» и заинтересованных компаний АО

«Токио Дэнрёку», АО «Сато Коугё», АО «Д'нйо Кёсан» (рис. 3). Первый этап испытаний был проведен 28 февраля 2012 г. в городе Дате, префектура Фукусима, а второй — 08 марта 2012 г. в городе Камагая, префектура Чибо. В таблице приведены результаты оценки влияния плазменной очистки на активность радионуклидов зараженной воды. Способ замера: спектрометрия гамма-излучения с помощью датчика с германиевым полупроводником.

Таким образом, использование плазмы в технологии обеззараживания воды является перспективным в отношении промышленного применения и имеет ряд преимуществ: отсутствие образования побочных продуктов, высокую эффективность. Установки для плазмохимической обработки воды не требуют специальных помещений и могут эксплуатироваться в стационарном или мобильном вариантах для очистки и обеззараживания сточных вод различного происхождения и в различном количестве. Затраты на обработку воды по данной технологии не превышают затрат в сравнении с традиционными методами.

С. В. Петров, д-р техн. наук, М. Хомма, инж.

ИННОВАЦИОННАЯ РАЗРАБОТКА SPEED — ПРОЦЕССЫ LORCH

Процесс SpeedPulse призван расширить возможности применения импульсной сварки для различных сталей и повысить ее производительность.

Применение импульсной дуги при сварке MIG/MAG сталей в основном было связано с необходимостью обеспечения четко дозированного переноса электродного металла и, как следствие, обеспечения минимальных тепловложений, связанных с этим минимальных деформаций и т. п. При этом производительность и скорость сварки были существенно ниже, чем при сварке со струйным переносом электродного металла. Функция

SpeedPulse объединила качество и применяемость импульсной дуги со скоростью струйной дуги. При этом обеспечиваются уменьшенное тепловложение, улучшенный провар и четкое формирование шва. Отличие от традиционного импульсного процесса заключается в том, что во время пауз между импульсами на долю миллисекунды включается струйный процесс сварки, тем самым перенос электродного металла происходит также между импульсами. Таким образом, более эффективно используется энергия самой дуги, при этом количество переносимого металла остается контролируемым. Это можно увидеть на кадрах высокоскоростной съемки (рис. 1). Очень важно, что при процессе SpeedPulse обеспечивается более высокое и концентрированное давление электродного металла на заготовку и формируется более глубокое проплавление основного металла. Это наглядно демонстрируется сравнением макрошлифов двух угловых сварных швов (рис. 2). На одинаковом режиме сварки функция SpeedPulse обеспечивает более высокую скорость подачи сварочной проволоки по сравнению со стандартной



Рис. 1.

Почти непрерывный, текущий переход капель

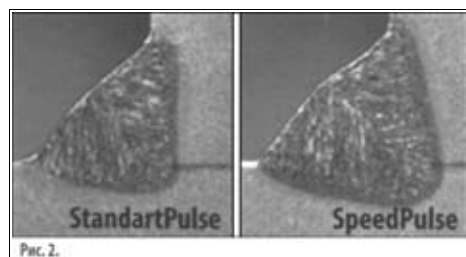


Рис. 2.

импульсной сваркой: 11,9 против 9,5 м/мин, а также более высокую производительность наплавки: 6,37 против 5,09 кг/ч. Эффект от применения функции SpeedPulse более заметен на более высоких режимах сварки (рис. 3). Например, при одинаковой мощности сварочных дуг (10000 Вт) производительность расплавления с функцией SpeedPulse выше на 10%, а при одинаковой скорости подачи проволоки (режиме сварки) функция SpeedPulse обеспечивает меньшее на 20 % тепловложение в изделие по сравнению со стандартной импульсной сваркой. Таким образом, объединение импульсной и струйной дуг функцией SpeedPulse существенно повлияло на производительность и скорость сварки, а именно: до 48 % быстрее автоматизированной импульсной сварки; до 35 % быстрее ручной импульсной сварки; до 10...15% быстрее обычной сварки MIG/MAG; до 30 % быстрее при сварке нержавеющей стали в отличие от ручной импульсной сварки; до 20 % быстрее при сварке алюминия в отличие от ручной импульсной.



Рис. 3.

Процесс SpeedArc нацелен на повышение качества сварных соединений из толстолистового металла, обусловленного обеспечением гарантированного проплавления корня шва, а также возможность выполнения сварки MIG/MAG в узкую разделку.

Функция SpeedArc в отличие от стандартной струйной дуги поддерживает уверенный струйный процесс переноса металла более короткой дугой (рис. 4). Дуга становится более сфокусированной, очень устойчивой (рис. 5). Благодаря высокому плазменному давлению в дуге обеспечивается более глубокое

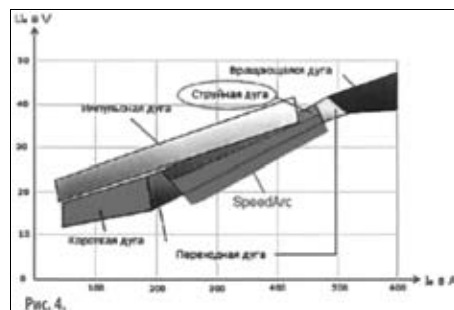
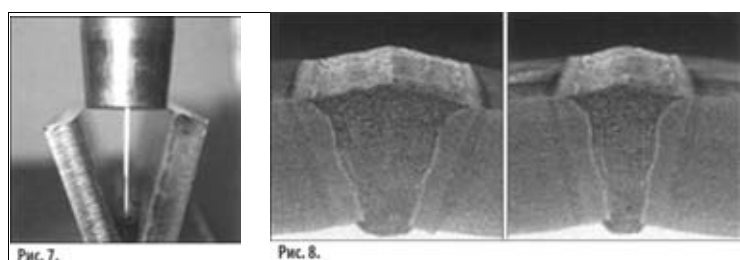
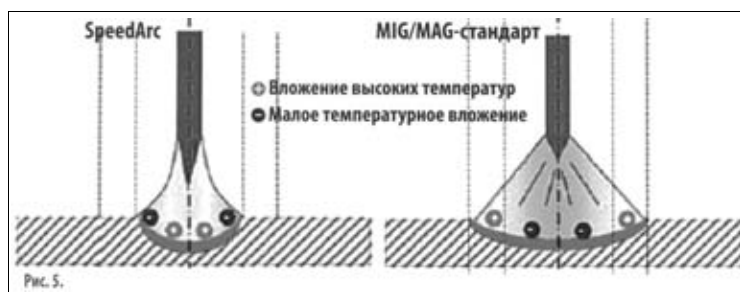


Рис. 4.



проплавление (рис. 6). При этом снижается как тепловложение в основной металл, так и вероятность возникновения таких дефектов, как подрезы.

Сварка возможна на больших вылетах (до 40 мм), что позволяет выполнять сварку «в узкую разделку» и при этом получать гарантированный провар корня шва (рис. 7). Возникает возможность снижения угла разделки с 60 до 40° в тех случаях, в которых это допускается (рис. 8). Это позволяет не только существенно снизить расход сварочных материалов, но и повысить производительность сварки за счет уменьшения количества проходов при многопроходной сварке. За один проход возможна сварка металла толщиной до 15 мм.

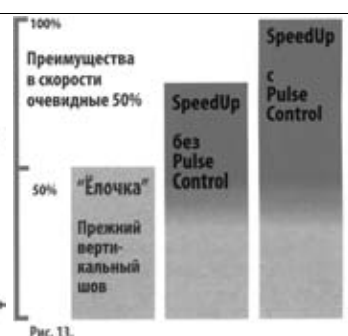
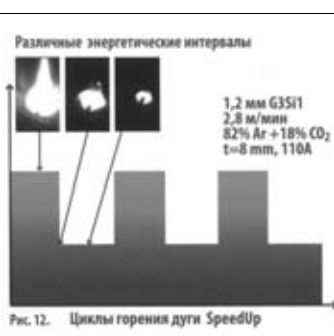
SpeedArc — высокопроизводительный процесс сварки со струйным переносом металла короткой дугой с высокой плотностью энергии, который в результате более эффективного использования энергии дуги допускает увеличение скорости сварки до 30 % в сравнении с обычной сваркой MIG/MAG.

Процесс SpeedUp предназначен для повышения качества и одновременно упрощения техники сварки швов в вертикальном и потолочном положениях.

Обычно сварка вертикальных швов требует от сварщика максимального умения и квалификации. С функцией SpeedUp сварщику не нужно выполнять сложные движения горелкой (техники сварки «елочка» или поперечными колебаниями), ему необходимо лишь перемещать горелку вдоль стыка с постоянной скоростью (рис. 9). Сварочный аппарат выстроит алгоритм импульсов так, чтобы обеспечить уверенный провар корня и получить



качественное формирование шва с плавным переходом на основной металл (рис. 10). Возможность сварки MIG/MAG без сложных движений горелкой (техники сварки «елочка» или поперечными колебаниями) достигается комбинированием двух технологий или, точнее, двух фаз сварочной дуги. Первая фаза — «горячая» фаза тока большой силы с вы-

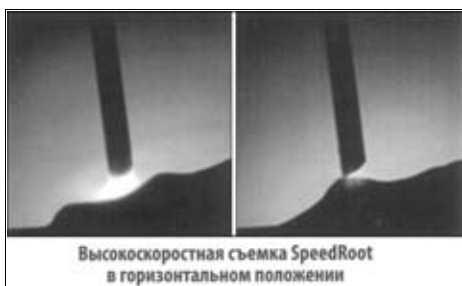


сокой подачей энергии — для оптимального расплавления материала. Затем без переходов и, таким образом, практически без брызг наступает вторая, «холодная» фаза благодаря идеальному автоматическому регулированию (рис. 11).

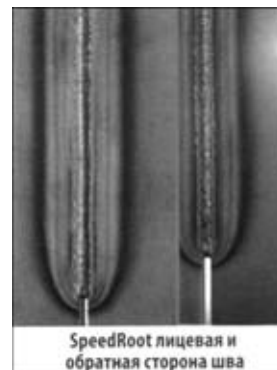
Периодически возникающая высокая концентрация энергии дуги, колебания сварочной ванны и циклическое целенаправленное удлинение дуги обеспечивают надежное схватывание боковых кромок (рис. 12). Уменьшенная подача энергии на завершении каждого цикла обеспечивает надежный провар, точное объемное заполнение шва и почти оптимальный катет шва. SpeedUp — высокопроизводительный процесс сварки MIG/MAG в вертикальном и потолочном положениях. Упрощением техники сварки вертикальных или потолочных швов достигается существенное повышение скорости сварки — до 100 % в сравнении с обычной сваркой MIG/MAG (рис. 13).

SpeedRoot предназначен для сварки MIG/MAG корня шва с высокой производительностью заполнения зазора и гарантированным образованием обратного валика заданной геометрии.

Обычные процессы сварки MIG/MAG короткой дугой мало пригодны для этого, так как перенос материала происходит, как правило, со взрывом шейки капли, из-за этого сварочная ванна провисает или шов слишком сильно



и неравномерно продавливается через зазор. Процесс SpeedRoot осуществляется практически без брызг при сварке с минимальным энерговыделением. При этом используются такие сила тока и напряжение, которые обеспечивают идеальную стабильность процесса и отличный слегка выпуклый шов. Технология регулировки высокопроизводительных источников тока для сварки MIG/MAG обеспечивает «холодный» перенос материала с помощью ограничения времени (делается процессором) короткого замыкания с уменьшенной энергией. Решающую роль при этом играет точный расчет времени низкого тепловложения и оптимальных условий для отделения и переноса капли. Процесс SpeedRoot обеспечивает комбинацию минимального тепловложения, максимальных значений допусков по зазору и заполнение зазора. Так, например, зазор 4 мм при толщине материала 3 мм можно заполнить без проблем без применения колебательного движе-



ния. Оптимальный внешний вид шва при этом гарантирован. Даже при зазоре в 8 мм SpeedRoot обеспечивает оптимальный контроль за сварочной ванной, а значит маятниковое движение при этом выполнять легко и просто. Высокая стабильность процесса делает возможным простое управление горелкой и позволяет даже неопытным сварщикам добиться высокого качества сварки корневого шва и тонких материалов. Значительно минимизирует затраты на последующую обработку изделия. Процесс SpeedRoot почти в 3 раза быстрее, чем применяемый на практике для заварки корня шва процесс TIG, SpeedRoot способствует повышению производительности и ускорению производственного процесса и является логичным завершением семейства Speed-процессов фирмы LORCH.

Процессы SpeedPuls, SpeedArc, SpeedUp и SpeedRoot не только существенно упрощают технику сварки, значительно повышая качество и производительность, но и, самое главное, позволяют нивелировать низкую квалификацию или отсутствие опыта сварщиков.

НОВЫЕ КНИГИ

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И РЕНОВАЦИИ:**

Тематическая подборка статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» в 2009-2011 гг. - Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2012. - 172 с. Мягкий переплет, 200х290 мм.

Сборник включает 38 статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» за период 2009-2011 гг., по проблемам ремонта, восстановления и реновации изделий ответственного назначения. Авторами статей являются известные в Украине ученые и специалисты в области сварки, наплавки, упрочнения, металлизации и других технологий ревитализации. Сборник предназначен для научных сотрудников, инженеров, технологов, конструкторов и аспирантов, занимающихся проблемами сварки и других родственных технологий обработки материалов. Стоимость сборника* 160 грн./800 руб.

**ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО:**

Тематическая подборка статей, опубликованных в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» в 2005-2010 гг. - Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2011. - 324 с. Мягкий переплет, 200х290 мм.

Сборник включает 70 статей, опубликованных в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за период 2005-2010 гг. по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. Авторами статей являются известные в Украине и за рубежом ученые и специалисты. Тематика статей посвящена созданию новых технологических процессов и оборудования для производства и сварки титана. Сборник предназначен для широкого круга инженеров, технологов, конструкторов, занятых в машиностроении, энергетике, строительстве,

судостроении, металлургии и других отраслях промышленного производства, связанных с обработкой и потреблением титана; полезен также преподавателям и студентам высших учебных заведений.

Стоимость сборника* 200 грн./1000 руб.

**СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ:**

Тематическая подборка статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» в 2006-2010 гг. - Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2011. - 216 с. Мягкий переплет, 200х290 мм.

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

Стоимость сборника* 140 грн./700 руб.

**СТЫКОВАЯ СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ:**

Тематическая подборка статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» в 2005-2010 гг. - Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2011. - 132 с. Мягкий переплет, 200х290 мм.

Сборник включает 24 статьи, опубликованные в журнале «Автоматическая сварка» за период 2005-2010 гг., по проблемам контактной стыковой сварки оплавлением и другим способом сварки давлением. Разделы сборника посвящены разработке технологии и оборудования для контактной сварки рельсов, стальных труб, арматуры и проката из высокопрочного алюминия. Рассматриваются также технологии прессовой сварки магнитоуправляемой дугой и сварки трением. Авторами статей являются известные в Украине и за рубежом ученые и специалисты в

области сварки давлением. Сборник предназначен для научных сотрудников, инженеров, технологов, конструкторов и аспирантов, занимающихся проблемами сварки давлением сталей, алюминиевых и титановых сплавов, интерметаллидов и других материалов.

Стоимость сборника* 100 грн./500 руб.

*Стоимость указана с учетом стоимости доставки заказной бандеролью соответственно для Украины и России.

Заказы на сборники просьба направлять:

Международная ассоциация «Сварка»

03680, г. Киев, ул. Боженко, 11, Украина

тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-54-84, 200-81-45

E-mail: journal@paton.kiev.ua

ПОДПИСКА — 2012 на журнал «Автоматическая сварка»

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

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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



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

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

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

Подписка доступна физическим и юридическим лицам.

РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190×190 мм) 700\$
- Вторая (550\$), третья (500\$) и четвертая (600\$) страницы обложки (200×290 мм)
- Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм) 400\$
- Вклейка А4 (200×290 мм) 340\$
- Разворот А3 (400×290 мм) 500\$
- 0,5 А4 (185×130 мм) 170\$

Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290 мм

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

Все файлы в формате IBM PC

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

Стоимость рекламы и оплата

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

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

Контакты:

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

Подписано к печати 07.05.2012. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 8,75. Усл.-отт. 9,04. Уч.-изд. л. 9,64 + 6 цв. вклеек.

Печать ООО «Фирма «Эссе».

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