

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал



№ 8 (581)
август 2001

Издается с марта 1948

Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Международная ассоциация «Сварка»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

Ю. С. Борисов, Н. М. Воропай,
В. Ф. Грабин, Ю. Я. Гречкий,
В. Н. Замков, А. Т. Зельниченко,
А. Я. Ищенко, С. И. Кучук-Яценко,
Ю. Н. Ланкин,
В. К. Лебедев (зам. гл. ред.),
В. Н. Липодиаев (зам. гл. ред.),
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,
В. И. Махненко, Л. П. Мойсов,
В. Ф. Мошкин, О. К. Назаренко,
В. В. Пешков, И. К. Походня,
И. А. Рябцев, Ю. А. Стеренбоген,
Б. В. Хитровская (отв. секр.),
В. Ф. Хорунов, В. К. Шелег,
К. А. Ющенко

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

И. Арака (Япония),
Н. П. Алешин (Россия),
И. Гривняк (Словакия),
У. Дилтей (Германия),
Е. А. Дорошкевич (Беларусь),
П. Зайффарт (Германия),
А. С. Зубченко (Россия),
К. Иноуэ (Япония),
К. Мацубути (США),
Н. И. Никифоров (Россия),
Б. Е. Патон (Украина),
Я. Пиллярчик (Польша)

Адрес редакции:
03680, Украина, г. Киев-150,
ул. Боженко, 11

Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
Тел.: (044) 227 63 02, 269 26 23

Факс: (044) 268 04 86
E-mail: journal@paton.kiev.ua;
tomik@mac.relc.com
http://www.nas.gov.ua/rwj

Редакторы:
Е. Н. Казарова, В. И. Котляр,
Г. В. Ольшевская

Электронная верстка:
И. С. Баташева, И. Р. Наумова,
И. В. Петушкив, Т. Ю. Снегирева

Свидетельство
о государственной регистрации
КВ 4788 от 09.01.2001

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

СОДЕРЖАНИЕ

СВАРОЧНОМУ ФАКУЛЬТЕТУ ПГТУ – 30 лет

Роянов В. А. Кафедре оборудования и технологии сварочного производства Приазовского государственного технического университета – 55 лет	4
Размышляев А. Д., Шаферовский В. А., Белоусов Ю. В. Подготовка специалистов на сварочном факультете Приазовского государственного технического университета	7
Матвиенко В. Н., Гулаков С. В. 30 лет отраслевой научно-исследовательской лаборатории наплавки	10
Чигарев В. В., Макаренко Н. А., Кондрашов К. А., Воропай Н. М. Особенности плавления электродной проволоки при наплавке способом плазма-МИГ	12
Роянов В. А., Псарас Г. Г. Наплавка бронзы Бр.АЖ9-4 тремя разнородными проволоками в аргоне	16
Захарова И. В., Чичкарев Е. А., Васильев В. Г., Троцан А. И., Дайнека А. Я., Кирюхин О. С. Структура и свойства металла ЗТВ соединений низколегированных трубных сталей, модифицированных кальцием	18
Размышляев А. Д., Маевский В. Р., Сидоренко С. М. Расчет индукции магнитного поля соленоида с ферромагнитным сердечником применительно к дуговой наплавке	22
Гулаков С. В., Носовский Б. И., Тарасенко И. В., Псарева И. С. Исследование процесса плавления флюса дугой	25
Войцеховский Е. В. Автоматизированная линия газотермического напыления антикоррозионных покрытий на трубчатые металлоконструкции и трубы	28
Носовский М. Б. Параметры устройства для продольных колебаний торца проволочного электрода	30
Кассов В. Д. Минимизация потерь наплавленного порошковой лентой металла	32
Малинов Л. С., Малинов В. Л. Марганецсодержащие наплавочные материалы	34

КАФЕДРЕ СП ЧГТУ – 30 лет

Хоменко Н. Н. Производство полупроводниковых датчиков электрохимической сваркой	38
Болотов Г. П. Тлеющий разряд как источник нагрева в процессах сварки и пайки (Обзор)	41
Березин Л. Я. Некоторые особенности процесса сварки в электростатическом поле диэлектриков с металлами и между собой	45
Хоменко Н. Н., Балакирева Е. В., Олексенко С. В. Внутренние электростатические поля и их роль при электрохимической сварке материалов в твердой фазе	49
Бадаев А. С., Николаенко С. В. Моделирование и макетирование технологий и техники в учебном процессе подготовки инженеров-сварщиков	52
Задорожный Ю. Г., Гребениченко В. Я. Исследование переходной зоны соединения высокотемпературной пьезокерамики с металлом	54
Сердюк В. И., Гнатюк О. В. Совершенствование способов повышения качества покрытий, осаждаемых в вакууме	59

ХРОНИКА

Третья Международная конференция «Водородная обработка материалов»	61
1-я Всеукраинская научно-техническая конференция молодых ученых	62
Научно-техническая конференция «Инженерия поверхности и реновация изделий»	63
15-й Международный Планзее семинар	64
Н. П. Алешину – 60 лет	65
Наши поздравления	66

РЕКЛАМА

Главные спонсоры журнала: ОАО «Фирма СЭЛМА»



Каховский завод электросварочного оборудования

Ново-Краматорский машиностроительный завод



Monthly Scientific-Technical and Production Journal

Avtomicheskaya Svarka

№ 8 (581)
August 2001

Published since March, 1948

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

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B.E.PATON

Yu.S.Borisov, N.M.Voropai,
V.F.Grabin, Yu.Ya.Gretskii, V.N.Zamkov,
A. T. Zelnichenko, A.Ya.Ishchenko,
S.I.Kuchuk-Yatsenko, Yu.N.Lankin,
V.K.Lebedev (vice-chief ed.),
V.N.Lipodaev (vice-chief ed.),
L.M.Lobanov, A.A.Mazur,
V.I.Makhnenko, L. P. Mojsov,
V.F.Moshkin, O.K.Nazarenko,
V. V. Peshkov, I.K.Pokhodnya,
I.A.Ryabtsev, Yu.A.Sternbogen,
B. V. Khitrovskaya (exec. secr.),
V.F.Khorunov,
V.K.Sheleg, K.A.Yushchenko

THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

I. Arata (Japan),
N.P.Alyoshin (Russia),
I.Hrivnak (Slovakia),
U.Diltey (Germany),
E.A.Doroshkevich (Belarus),
P.Seyffarth (Germany),
A.S.Zubchenko (Russia),
K.Inoue (Japan),
K.Masubuchi (USA),
N.I.Nikiforov (Russia),
B.E.Paton (Ukraine),
Ya.Pilyarchik (Poland)

Address:

The E. O. Paton Electric
Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (38044) 227 63 02, 269 26 23
Fax: (38044) 268 04 86
E-mail:journal@paton.kiev.ua
tomik@mac.relc.com
http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:
E. N. Kazarova, V. I. Kotlyar,
G. V. Olshevskaya
Electron galley
I.S.Batasheva, I.R.Naumova,
I.V.Petushkov, T. Yu. Snegireva

CONTENTS

30 YEARS OF THE WELDING FACULTY AT THE PRIAZOVSKY STATE TECHNICAL UNIVERSITY

Royanov V.A.	55 years of the Chair of Welding Equipment and Technology at the Priazovsky State Technical University	4
Razmyshlyayev A.D., Shaferovsky V.A., Belousov Yu.V.	Education of specialists at the Welding Faculty of the Priazovsky State Technical University	7
Mativienko V.N., Gulakov S.V.	30 years of the Surfacing Research Laboratory	10
Chigarev V.V., Makarenko N.A., Kondrashov K.A., Voropaj N.M.	Peculiarities of melting of electrode wire in surfacing by the plasma-MIG method	12
Royanov V.A., Psaras G.G.	Surfacing of bronze Br.Azh9-4 using three different wires in argon atmosphere	16
Zakharova I.V., Chichkarev E.A., Vasilev V.G., Trotsan A.I., Deineka A.Ya., Kiryukhin O.S.	Structure and properties of the HAZ metal of joints in low-alloy calcium-modified pipe steels	18
Razmyshlyayev A.D., Maevsky V.R., Sidorenko S.M.	Calculation of induction of the magnetic field generated by a magnetic-core solenoid for arc surfacing	22
Gulakov S.V., Nosovsky B.I., Tarasenko I.V., Psareva I.S.	Investigation of the flux melting process under the effect of the arc	25
Voitsekhevsky E.V.	Automated production line for thermal spraying of anti-corrosion coatings on tubular metal structures and pipes	28
Nosovsky M.B.	Parameters of the device for longitudinal oscillations of electrode wire tip	30
Kassov V.D.	Minimizing losses of the metal deposited by using a flux- cored strip	32
Malinov L.S., Malinov V.L.	Manganese-containing consumables for surfacing	34

30 YEARS OF THE WELDING PRODUCTION CHAIR AT THE CHERNIGIV STATE TECHNICAL UNIVERSITY

Khomenko N.N.	Manufacture of semi-conducting transducers by electrochemical welding	38
Bolotov G.P.	Glow discharge as the heat source for welding and brazing processes (review)	41
Berezin L.Ya.	Some peculiarities of the process of electrostatic-field welding of dielectrics to each other and to metals	45
Khomenko N.N., Balakireva E.V., Olekseenko S.V.	Internal electrostatic fields and their role in electrochemical solid-state joining of materials	49
Badaev A.S., Nikolaenko S.V.	Simulation and modeling of technologies and procedures in the process of education of welding engineers	52
Zadorozhnyj Yu.G., Grebenichenko V.Ya.	Investigation of the transition zone in a joint between high-temperature piezoceramics and metal	54
Serdyuk V.I., Gnatyuk O.V.	Upgrading of methods for improvement of the quality of vacuum deposition coatings	59

NEWS

The Third International Conference "Hydrogen Treatment of Materials"	61
The First All-Ukrainian Scientific-and-Technical Conference of Young Scientists	62
Scientific-and-Technical Conference "Surface Engineering and Renovation of Parts"	63
The 15th International Plansee Seminar	64
60th birthday of N.P.Aleshin	65
Our congratulations	66

ADVERTISING

67

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

Concerning publication of articles, subscription and advertising, please, contact:
tel.: (380 44) 227 67 57, fax: (380 44) 227 46 77, E-mail: tomik@mac.relc.com

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ-СВАРЩИКИ:
профессора, преподаватели, сотрудники и студенты
сварочного факультета
Приазовского государственного технического университета
и кафедры сварочного производства
Черниговского государственного технологического университета

Высшая школа Украины занимает ведущее место в Европе (после России) по уровню и количеству выпускаемых инженеров-сварщиков. 20 кафедр 17-ти вузов Украины в 2000 г. выпустили сотни инженеров и магистров. За прошедшие 55 лет кафедрой оборудования и технологии сварочного производства ПГТУ выпущено более 4900, а кафедрой сварочного производства ЧГТУ за 30 лет более — 1500 специалистов. Многие из них стали руководителями крупнейших строек, предприятий, высших учебных заведений Украины и других стран СНГ. Более 110 выпускников кафедры и факультета ПГТУ стали кандидатами технических наук наук, 10 — докторами наук.

Отрадно отметить, что научный потенциал высшей школы в течение 1990-х годов не только не растерян, а, напротив, постоянно укрепляется. На сварочных кафедрах в 2000 г. вели научно-педагогическую деятельность 44 профессора, 39 докторов наук и 166 кандидатов наук. В аспирантуре обучался 61 аспирант.

Институт электросварки им. Е. О. Патона всегда уделял внимание вузовской науке и в настоящее время поддерживает тесные контакты с профильными кафедрами университетов Украины. В частности, в последние годы институт обеспечивает кафедры аналитической и обзорной информацией о развитии мировой сварочной науки и техники. Профессорско-преподавательские кадры университетов всегда желанные участники национальных и международных конференций, проводимых в Институте электросварки. Они же являются активными авторами журнала «Автоматическая сварка». Так, данный номер журнала включает подборку статей преподавателей и специалистов ПГТУ и ЧГТУ, подготовленных по результатам научно-исследовательских работ, которые проведены в последние годы.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и редакция журнала «Автоматическая сварка» поздравляют преподавателей, сотрудников и студентов Приазовского и Черниговского университетов, желают им счастья, благополучия и новых успехов в подготовке специалистов сварочного производства и родственных технологий.



Академик Б. Е. Патон

КАФЕДРЕ ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИАЗОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА — 55 ЛЕТ

В. А. РОЯНОВ, д-р техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

В 1946 г. по решению руководящих органов страны в Ждановском металлургическом институте была создана кафедра оборудования и технологии сварочного производства, в задачу которой входила подготовка специалистов по сварке и резке металлов, а также инженерных кадров для вновь организуемого производства электросварочных труб магистральных трубопроводов. В то время на металлургическом заводе им. Ильича завершалась подготовка к пуску трубосварочного цеха № 1, созданного по инициативе и при непосредственном участии академика Е. О. Патона.

Первым исполняющим обязанности заведующего кафедрой в 1946 г. был назначен А. Я. Шадрин, которого сменил в том же году канд. техн. наук, доц. П. С. Елистратов. С первых дней начались работы по созданию учебно-лабораторной базы кафедры, организации и развитию научных исследований в области сварки конструкций, восстановления наплавкой деталей металлургического оборудования. Первая защита дипломных проектов по новой специальности состоялась в 1947 г. Первые пять выпускников (Д. П. Антонец, А. А. Фильчаков, К. И. Коротков, Ю. Н. Грищенко, Д. А. Роговин) стали крупными специалистами и организаторами сварочного производства, двое (Д. П. Антонец и Д. А. Роговин) защитили кандидатские диссертации.

В августе 1952 г. заведующим кафедрой был избран К. В. Багрянский. С его приходом началась перестройка учебного процесса, совершенствование лабораторной базы, расширились и укрепились связи кафедры с ИЭС им. Е. О. Патона, МГТУ им. И. Э. Баумана, Киевским политехническим институтом, а также многими предприятиями города и страны. При содействии академика Б. Е. Патона был построен сварочный корпус. Это позволило уже в 1960-х годах заметно улучшить подготовку специалистов, а кафедре стать одной из ведущих кафедр сварочного профиля. Вместе с К. В. Багрянским работали талантливые педагоги и учёные: канд. техн. наук, доц. З. А. Добротина, закончившая аспирантуру ЛПИ; канд. техн. наук, доц. Д. С. Кассов, канд. техн. наук Г. С. Кузьмин, преподаватели П. Ф. Лаврик, А. А. Фильчаков, В. А. Му-

ратов, а также В. Т. Сопин — выпускник Мариупольского металлургического института.

Опираясь на оригинальные учебно-методические разработки специалистов кафедры с 1968 г. начала подготовка инженеров-сварщиков по новой специальности — «Металлургия и процессы сварочного производства». В 1971 г. был организован факультет, в состав которого, кроме двух сварочных, вошли общетехнические и общеобразовательные кафедры. Первым деканом сварочного факультета избрали канд. техн. наук, доц. Д. П. Антонца, который до этого многие годы проработал главным сварщиком завода «Азовмаш».

В 1960-е годы под руководством К. В. Багрянского значительный толчок получила научная деятельность кафедры, направленная на развитие сварки и наплавки с применением керамических флюсов и исследование свойств сварных и наплавленных изделий. В эти годы процесс сварки никеля под керамическим флюсом нашел успешное применение на заводе «Большевик», г. Киев (руководитель работы — канд. техн. наук, доц. Г. С. Кузьмин). Под руководством канд. техн. наук, доц. Д. С. Кассова разработан способ сварки и наплавки медных сплавов под керамическим флюсом, успешно применявшийся на металлургических заводах Украины. К. В. Багрянским при активном участии В. Я. Зулина и А. Д. Корнеева был разработан способ сварки алюминия под слоем флюса, который широко использовали при сварке элементов токоведущих шин Братской ГЭС. Широкое применение нашел процесс наплавки под керамическим флюсом при восстановлении прокатных валков и деталей оборудования на металлургических заводах в г. Рустави (Грузия), им. Ильича и «Азовсталь» в Мариуполе, Енакиевском металлургическом заводе, горно-обогатительном комбинате в г. Усть-Каменогорске (Казахстан). Доцент А. А. Фильчаков руководил исследованиями по разработке и внедрению новых марок электродов на заводе «Азовмаш», канд. техн. наук, доц. К. А. Олейниченко — разработкой методики количественного определения вредных выделений при сварке. Ими были предложены рекомендации по улучшению условий труда сварщиков.

За период 1955–1980 гг. на кафедре подготовлено и защищено 30 кандидатских и одна докторская диссертация, подготовлен и трижды переиздан учебник «Теория сварочных процессов» (К. В. Багрянский, З. А. Добротина, К. К. Хренов), издано

Роянов Вячеслав Александрович — выпускник Ждановского металлург. ин-та 1963 г., зав. кафедрой оборудования и технологии сварочного производства, проректор, профессор, академик АН ВШ Украины.

© В. А. Роянов, 2001



Студенты сварочного факультета ПГТУ изучают устройство и работу робота «Бриг-10»



Студенты сварочного факультета во время программирования работы сварочного робота

учебное пособие «Расчет и проектирование сварных конструкций» (А. Н. Серенко, М. Н. Крумболт, К. В. Багрянский), монографии «Сварка никеля и его сплавов» (К. В. Багрянский, Г. С. Кузьмин) и «Керамические флюсы для сварки и наплавки» (К. В. Багрянский).

В 1971 г. при кафедре была организована отраслевая научно-исследовательская лаборатория (ОНИЛ) наплавки, задачей которой является исследование и разработка новых конструкций прокатных валков и роликов МНЛЗ, технологии наплавки и наплавочных материалов, автоматизированного оборудования. Возглавляет лабораторию канд. техн. наук, доц. В. Н. Матвиенко.

Большой вклад внесен кафедрой и ОНИЛ наплавки в исследования склонности сварных швов к образованию горячих трещин. Работа проводилась под руководством К. В. Багрянского Я. Я. Григорьевым и В. Е. Саенко. В результате была предложена новая методика испытаний, получен ряд авторских свидетельств. Большое внимание уделялось также исследованию свойств наплавленного металла, работающего при нормальных и высоких температурах (В. Н. Кальянов, Б. И. Носовский).

С 1973 по 1979 гг. кафедру возглавлял канд. техн. наук, проф. А. Н. Серенко. В этот период проводились исследования статической и динамической прочности сварных соединений и конструкций, были начаты работы по исследованию однопроходной сварки сталей толщиной 40 мм и более с программированием процесса. Результаты исследований обобщены в кандидатских диссертациях В. А. Шаферовского и А. Скшипчика (Польша), а также нашли практическое применение на «Азовмаше» и судостроительном заводе «Залив».

В 1980 г. кафедру возглавил Л. К. Лещинский. Совместно с отраслевой лабораторией наплавки были разработаны новые керамические флюсы и порошковые проволоки для электродуговой наплавки прокатных валков и деталей металлургического оборудования. Проведены исследования процессов наплавки и сварки ленточным электродом под флюсом. Результаты исследований внедрены на машиностроительных и металлургических предприятиях, обобщены в кандидатских диссертациях Ю. В. Белоусова, В. И. Щетининой, В. Н. Матвиенко, В. П. Лаврика, А. В. Зареченского. Активно велись работы по совершенствованию оборудования для

автоматизации процессов наплавки и управлению качеством наплавленного металла. Их результаты отражены в докторской диссертации С. В. Гулакова. Получили широкое развитие научные исследования в области плазменного упрочнения изделий, в том числе после наплавки. Их результаты приведены в монографии «Плазменное поверхностное упрочнение» (Л. К. Лещинский, С. С. Самотугин, И. И. Пирч, В. И. Комар).

С 1985 г. кафедру оборудования и технологии сварочного производства возглавляет д-р техн. наук, проф. В. А. Роянов. С его участием расширена и укреплена материальная база, в учебный процесс включены дисциплины по роботизации сварочного производства, в учебном процессе используются вычислительная техника и новые информационные технологии (при курсовом и дипломном проектировании). Ведутся исследования в области газотермического напыления коррозионно- и износостойких покрытий. Разработаны порошковые проволоки для электродуговой металлизации, внедренной в Киевском объединении «Киевтрактордеталь», на авторемонтных предприятиях Полтавы, Ташкента и других городов. Результаты исследований обобщены в кандидатской диссертации Е. В. Войцеховского и докторской В. А. Роянова.

За период с 1989 по 2001 гг. на кафедре защищили докторские диссертации С. В. Гулаков, В. А. Роянов, Л. К. Лещинский, А. Д. Размышляев, С. С. Самотугин. А. Н. Серенко было присвоено ученое звание профессора. Открыта докторантura, в которой завершают работы над докторскими диссертациями два докторанта. При кафедре действует Специализированный совет по защите кандидатских диссертаций по специальности 05.03.06 «Сварка и родственные технологии».

За последние три года подготовлены и изданы учебные пособия «Сварка. Введение в специальность» (А. Н. Серенко, В. А. Роянов), «Дефекты в сварных соединениях и покрытиях» (В. А. Роянов, В. Я. Зусин, С. С. Самотугин), «Ремонт машин с применением сварки и родственных технологий» (В. А. Роянов, Г. Г. Псарас, В. К. Рубайло) и монография «Магнитное управление формированием швов при дуговой сварке» (А. Д. Размышляев).

Кафедра активно сотрудничает с индустриальным и машиностроительным техникумами г. Мари-

упола в рамках многоступенчатой подготовки специалистов.

За 55 лет коллективом кафедры подготовлено около 4900 инженеров, в том числе для стран Европы, Азии, Африки и Латинской Америки, более 40 кандидатов наук, подготовлено и защищено 8 докторских диссертаций, опубликовано более 25 учебников и монографий, 600 научных статей, более 250 разработок защищено авторскими свидетельствами и зарубежными патентами.

Успешно защитили докторские диссертации выпускники кафедры А. Д. Чепурной, Т. Г. Кравцов, В. Я. Зусин, В. И. Щетинина, В. Н. Кальянов. Многие выпускники стали известными специалистами в области сварочного производства и ныне возглавляют промышленные предприятия Украины, России и других стран СНГ.

В настоящее время на кафедре работают три профессора, доктора технических наук, один профессор, кандидат технических наук, девять доцентов, кандидатов технических наук, один старший преподаватель, два ассистента. Комиссией Министерства образования и науки Украины кафедра аккреди-

тирована по IV уровню. Она готовит специалистов по следующим специальностям: «Оборудование и технология сварочного производства», «Автоматизированные электросварочные процессы и установки», «Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановления деталей машин».

Специалисты кафедры принимают участие в работе Международной ассоциации «Сварка». Наряду с традиционным сотрудничеством с кафедрами сварки вузов Москвы, Санкт-Петербурга, Челябинска, Екатеринбурга, Тбилиси, Минска, Могилева и других городов СНГ налажены связи с вузами и организациями дальнего зарубежья — Институтом сварки в г. Гливице (Польша), Мишкольским университетом (Венгрия), Харбинским технологическим институтом (Китай) и др.

Свое 55-летие кафедра оборудования и технологии сварочного производства встречает с желанием и в дальнейшем стремиться к совершенствованию учебно-методического процесса, направленного на повышение качества подготовки специалистов.

Поступила в редакцию 05.04.2001

УДК 621.791 (09)

ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ НА СВАРОЧНОМ ФАКУЛЬТЕТЕ ПРИАЗОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

А. Д. РАЗМЫШЛЯЕВ, д-р техн. наук, В. А. ШАФЕРОВСКИЙ, Ю. В. БЕЛОУСОВ, кандидаты техн. наук
(Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Сварочному факультету Приазовского государственного технического университета (ПГТУ) исполнилось 30 лет. В бывшем СССР он был одним из трех сварочных факультетов. Сегодня в Украине функционируют два сварочных факультета: в ПГТУ и НТУУ «Киевский политехнический институт». Первым деканом факультета был доц., канд. техн. наук Д. П. Антонец. Затем в разные периоды его возглавляли проф., д-р техн. наук Л. К. Лещинский (1975), проф., канд. техн. наук А. Н. Серенко (1989), доц., канд. техн. наук Ю. В. Белоусов (1990). С 1999 г. по настоящее время деканат факультета возглавляет проф., д-р техн. наук А. Д. Размышляев.

В состав факультета входит пять кафедр, в том числе оборудования и технологии сварочного производства (зав. кафедрой академик АН ВШ Украины, проф., д-р техн. наук В. А. Роянов); металлургии и технологии сварочного производства (зав. кафедрой академик АИН, проф., д-р техн. наук В. В. Чигарев); материаловедения (зав. кафедрой действительный член Нью-Йоркской АН, проф., д-р техн. наук Л. С. Малинов).

На факультете в разные годы работали такие видные ученые — профессора, доктора технических наук В. К. Багрянский, А. И. Гедрович, Г. В. Кузьмин, В. Н. Кальянов, а сегодня трудятся академики А. Д. Чепурной, В. А. Роянов, В. В. Чигарев, В. Я. Зусин, профессора Л. С. Малинов, А. Н. Серенко, С. В. Гулаков, С. С. Самотугин и др.

В настоящее время организацией учебного процесса, педагогической и научно-исследовательской деятельностью на факультете занимаются высококвалифицированные преподаватели: академик АН ВШ Украины, 3 академика АИН, 4 академика зарубежных академий наук, 10 докторов технических и физико-математических наук, 11 профессоров, 32 доцента, канд. техн. наук, более 30 старших преподавателей, преподавателей и ассистентов.

Кафедры факультета оснащены современным оборудованием для научных исследований. Значи-

Размышляев Александр Денисович — выпускник Ждановского металлург. ин-та 1964 г., профессор кафедры оборудования и технологии сварочного производства, декан сварочного факультета.

Шаферовский Виктор Александрович — выпускник ПГТУ 1997 г., доцент кафедры оборудования и технологии сварочного производства, заместитель декана сварочного факультета.

Белоусов Юрий Васильевич — выпускник Ждановского металлург. ин-та 1964 г., доцент, докторант кафедры оборудования и технологии сварочного производства.

© А. Д. Размышляев, В. А. Шаферовский, Ю. В. Белоусов, 2001

тельная часть научно-исследовательских разработок внедрена в производство на ряде предприятий нашей страны и стран ближнего зарубежья. Основными направлениями научно-исследовательских разработок факультета являются: восстановление технологического оборудования различными методами напыления; наплавка валков прокатных станов; электродуговая наплавка и сварка с использованием управляемых магнитных полей; электродуговая механизированная сварка под флюсом толстолистового металла с программированием параметров режима; усовершенствование способов повышения работоспособности сварных соединений и конструкций; оценка напряженного состояния сварных соединений и деталей с защитными покрытиями; износостойкая наплавка деталей металлургического оборудования; создание экономнолегированных высокопрочных и износостойких сталей; исследование физических явлений на поверхности твердых тел и процессов тепломассопереноса на макро- и микроуровнях; формирование мощных плазменных потоков и их взаимодействие с конденсированными средами и др.

По результатам исследований, сотрудниками факультета опубликовано более 1000 научных работ, в том числе более 10 монографий и учебных пособий, получено более 100 авторских свидетельств и патентов.

В 1995 г. создан и функционирует компьютерный класс сварочного факультета на 16 посадочных мест, оснащенный современной вычислительной техникой.

В Ждановском (Мариупольском) металлургическом институте первый выпуск инженеров-сварщиков состоялся в 1947 г. С каждым годом количество выпускаемых специалистов постоянно увеличивается, и к настоящему времени оно выросло до 4900 человек. Ежегодный набор абитуриентов на сварочный факультет до 1996 г. составлял около 100 человек.

В 1994 г. Мариупольский металлургический институт был преобразован в Приазовский государственный технический университет и аттестован на IV уровень аккредитации. С 1993 по 1997 гг. сварочный факультет ПГТУ готовил бакалавров сварки (БС) по четырем направлениям профессиональной ориентации, соответствующим следующим специальностям: 8.092301 «Оборудование и технология сварочного производства»; 8.092302 «Технологические и металлургические процессы сварки»; 8.092303 «Автоматизированные электросварочные процессы и установ-

ки»; 8.092304 «Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановления деталей машин», а также специалистов (по техническим специальностям, называемых инженерами – ИС) и магистров (МС) [1].

В конце 1998 г. в состав факультета вошла кафедра материаловедения. В том же году Министерством образования и науки Украины было принято решение об изменении ряда названий специальностей, в том числе и по направлениям подготовки 0923 «Сварка» и 0901 «Прикладное материаловедение».

Таким образом, с 1998 г. сварочный факультет ПГТУ осуществляет подготовку и выпуск БС, специалистов (инженеров) и МС по следующим специальностям:

8.092301 «Технология и оборудование для сварки»;

8.092302 «Сварочные установки»;

8.092303 «Технология и оборудование для восстановления и повышения износостойкости машин и конструкций»;

8.090101 «Прикладное материаловедение».

За основу концепции многоуровневой системы высшего образования принятая программа четвертой и пятой ступеней [2], которая является общей (базовой) для всех вузов Украины.

Этап подготовки БС по приведенным выше специальностям завершается выполнением выпускной (квалификационной) работы и последующей ее за-

щитой перед Государственной аттестационной комиссией (ГАК) при условии успешной сдачи экзаменационной сессии VIII семестра. Выпускная работа БС является итоговой работой четырех лет обучения в вузе и имеет своей целью систематизацию, закрепление и расширение теоретических знаний путем самостоятельной разработки вопросов по одной из отраслей сварочного производства или прикладного материаловедения.

Состав и объем выпускной работы определяется выпускающей кафедрой. Как правило, по структуре выпускная работа содержит пояснительную записку объемом не более 60 с. формата А4 рукописного текста и графическую часть объемом 4...5 листов формата А1.

При направлении на производственную практику студенты получают индивидуальные задания с указанием узлов (изделий), технологию изготовления которых они должны изучить. При выполнении бакалаврских и выпускных работ студенты разрабатывают новые или совершенствуют известные (базовые) технологические процессы изготовления этих узлов. При выполнении дипломных проектов специалистов студенты, как правило, используют основные разработки, выполненные в бакалаврских работах.

БС, имеющие базовое высшее образование, могут получить полное высшее образование и квалификацию специалиста (инженера для технических



специальностей) по четырем специальностям, пройдя второй этап обучения (рисунок). Инженерная подготовка БС продолжается в течение двух семестров и завершается защитой дипломного проекта перед Государственной экзаменационной комиссией (ГЭК).

Реализация программы подготовки МС по сварочным специальностям началась в 1995 г. по специальным учебным планам на базе инженерного образования [1]. В соответствии с Постановлением Кабинета Министров Украины от 20 января 1998 г. за № 65 (Положение об образовательно-квалификационных уровнях) на факультете с 1999 г. началась подготовка магистров на основе квалификации бакалавра и специалиста.

В целом подготовка МС на факультете осуществляется по схеме, представленной на рисунке.

Заметим, что после получения квалификации бакалавра в течение одного учебного года (двух семестров) подготовка осуществляется на госбюджетной основе, а после получения квалификации специалиста (инженера) – в течение одного учебного года (двух семестров) преимущественно на контрактной основе.

В обоих случаях претенденты для поступления в магистратуру должны иметь положительную рекомендацию выпускающих кафедр и ученых советов факультета и университета. Кроме того, университетом установлена квота приема в магистратуру, равная 20 % общего количества выпускников, имеющих высшее образование.

Магистерская подготовка завершается выполнением и защитой квалификационной работы перед ГЭК.

Качество подготовки кадров в условиях многоуровневой системы высшего образования, по-нашему мнению, непосредственно связано с решением ряда задач [1]: повышением уровня подготовки абитуриентов; включением в состав студентов ПГТУ выпускников техникумов и обратная ротация студентов в техникумы ПГТУ; обеспечением соответствия процесса подготовки специалистов стандартам европейского и международного уровней; повышением научно-педагогического уровня профессорско-преподавательского состава; совершенствованием учебного процесса путем применения современных средств технического обучения, в том числе и вычислительной техники; совершенствованием языковой подготовки и улучшением экономического образования выпускников и др.

В течение последних восьми лет оправдывает себя практика включения выпускников техникумов в число студентов 2-го и 3-го курсов. Как правило, эта категория студентов характеризуется достаточно серьезным отношением к занятиям и высоким уровнем практической подготовки. В 2000 г. окончательно согласованы учебные планы всех специальностей факультета первого и второго семестров и учебные планы техникумов ПГТУ с целью сокращения объема пересдачи ряда дисциплин и облегчения первого этапа обучения в вузе. Для студентов

младших курсов, не способных по каким-либо причинам продолжать обучение в университете, предоставляется возможность завершить образование в одном из техникумов ПГТУ. Это стало возможным после включения в состав университета в 1998 г. трех техникумов: механико-металлургического, машиностроительного, индустриального и технического лицея.

Дальнейшее развитие высшего образования в Украине немыслимо без учета мирового и европейского опыта подготовки специалистов, а также требований международных стандартов в отношении образования и аттестации специалистов-сварщиков [1].

Основным требованием и важнейшим условием развития рыночной экономики является повышение качества выпускаемой продукции во всех отраслях промышленности. Продукция сварочного производства чаще всего относится к категории ответственных конструкций. По этой причине фактор соответствия этой продукции европейским и мировым стандартам представляется достаточно актуальным.

Уровень профессорско-преподавательского состава сварочного факультета достаточно высок. В настоящее время в аспирантуре и докторантуре обучаются соответственно 13 и 3 человека. За последний пятилетний период более 30 преподавателей и научных сотрудников повысили свою квалификацию через систему постояннодействующих курсов в университете по направлениям: педагогическое мастерство, психология и педагогика, компьютерная подготовка и др.

На факультете активно ведется языковая подготовка специалистов. Ежегодно организуются факультативные занятия по изучению иностранных языков, языка делового общения.

С 1998 г. в ПГТУ работает Специализированный совет по защите кандидатских диссертаций по специальности 05.03.06 «Сварка и родственные технологии». На олимпиадах студенты сварочного факультета ежегодно занимают первые места. В октябре 2000 г. на выставке «Сварка-2000» в г. Киеве было представлено оборудование и материалы, разработанные на кафедрах сварочного факультета в последние годы. Итоги выставки показали, что кафедры сварочного факультета по значимости и эффективности научных разработок занимают достойное место.

Факультет постоянно поддерживает деловые и творческие связи с выпускниками, работающими в различных производственных организациях, коммерческих структурах, предприятиях и учебных заведениях, что позволяет выявить потребность в специалистах конкретной квалификации.

1. Белоусов Ю. Н., Шаферовский В. А. Совершенствование подготовки кадров в условия многоуровневой системы высшего образования // Автомат. сварка. – 1996. – № 8. – С. 6–8.
2. Чертов И. М. Многоуровневая инженерная подготовка по специальности «Оборудование и технология сварочного производства» на кафедре сварочного производства Киевского политехнического института // Там же. – 1995. – № 10. – С. 8–9.

Поступила в редакцию 05.04.2001

30 ЛЕТ ОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ НАПЛАВКИ

В. Н. МАТВIЕНКО, канд. техн. наук, С. В. ГУЛАКОВ, д-р техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Как уже отмечалось, под руководством проф., д-ра техн. наук К. В. Багрянского в 1960-е годы значительное развитие получила научно-исследовательская деятельность кафедры оборудования и технологии сварочного производства (ОиТСП), направленная на создание новых способов сварки и наплавки, разработку оборудования для этих процессов, а также исследования свойств сварных и наплавленных изделий. Для реализации этих задач в августе 1971 г. была создана и успешно работает в настоящее время отраслевая научно-исследовательская лаборатория (ОНИЛ) наплавки, которая специализируется в разработке и внедрении новых сварочных технологий, оборудования и материалов преимущественно в области черной металлургии.

Руководили лабораторией ученые кафедры — профессора, доктора техн. наук К. В. Багрянский и Л. К. Лещинский. В настоящее время ее возглавляет доцент кафедры ОиТСП, канд. техн. наук В. Н. Матвиенко. Огромную помощь ОНИЛ наплавки в проведении научно-исследовательских работ и решении организационных вопросов оказывает ее заведующий — В. А. Роянов.

За свое тридцатилетнее существование учеными ОНИЛ наплавки было внедрено в промышленность более 50 научно-исследовательских работ, большинство из которых выполнено на уровне изобретений.

Сотрудники лаборатории участвуют в обучении студентов по специальностям 8.092303 «Технология и оборудование для восстановления и повышения износостойкости машин и конструкций».

Специалисты ОНИЛ наплавки успешно решают разнообразные актуальные задачи по восстановлению и упрочнению деталей оборудования. Основным направлением в работе лаборатории является решение проблемы повышения работоспособности, улучшения эксплуатационных характеристик рабочего инструмента и деталей прокатного, металлургического и энергетического оборудования, подверженных интенсивному изнашиванию в процессе эксплуатации, а именно: разработка рациональных конструкций рабочих слоев с новым комплексом свойств рабочей поверхности прокатных валков и роликов МНЛЗ, техники и технологии наплавки, наплавочных экономнолегированных материалов,

технологии плазменного поверхностного упрочнения, механического и автоматизированного оборудования, нестандартного (основного и вспомогательного) оборудования для реализации поставленных задач.

Деятельность лаборатории с самого начала ее существования сориентирована на практические нужды производства. Большой экономический эффект получен в результате внедрения научных разработок по восстановлению и упрочнению валков прокатных станов слябинг-1150 и НШС-1700 горячей прокатки, бандажированных опорных валков толстолистового стана ТЛС-3000, валков пильгестана, роликов МНЛЗ и другого оборудования металлургических комбинатов — ОАО «ММК им. Ильича» и «Азовсталь». С этой целью сотрудниками ОНИЛ наплавки разработаны, созданы и введены в эксплуатацию специализированные высокопроизводительные наплавочные участки в ЛПЦ-4500, ТЛС-3000 и цехе слябинг-1150 ММК им. Ильича, оснащенные всем комплексом оборудования, необходимого для реализации разработанных технологий. В настоящее время создается участок по восстановлению прокатных валков НШС-1700.

С первых лет своего существования лаборатория проводит исследования по разработке новых наплавочных материалов. Для наплавки износостойких слоев металла при изготовлении и упрочнении крупногабаритных стальных деталей оборудования горячей прокатки (опорных и рабочих валков листопрокатных и обжимных станов, роликов рольгангов и др.) создана серия легирующих керамических флюсов марки ЖСН (ЖСН-5, ЖСН-5Р, ЖСН-7); для наплавки валков сортопрокатных и пилигримовых станов разработаны порошковые проволоки ПП-8ЖН и ПП-35ЖН, обладающие самоприспособляемостью к условиям эксплуатации, т. е. улучшающие свои служебные характеристики при жестких режимах работы. Успешное выполнение многих работ стало возможным благодаря освоению промышленного производства данных наплавочных материалов на Днепропетровском метизном заводе. При разработке материалов ОНИЛ наплавки тесно сотрудничает с кафедрой материаловедения нашего университета. С целью улучшения снабжения наплавочных участков электродным материалом на основании проведенных ОНИЛ наплавки исследований освоено производство в условиях ОАО «ММК им. Ильича» легированной наплавочной холоднокатаной ленты различного химического состава (18Х3ГМФА, 20Х4ГМФБ и 25Х3ВМБ).

В лаборатории впервые разработана технология наплавки валков из высокоуглеродистых сталей,

Матвиенко Владимир Николаевич — выпускник Ждановского металлург. ин-та 1977 г., доцент кафедры оборудования и технологии сварочного производства, научный руководитель ОНИЛ наплавки.

Гулаков Сергей Владимирович — выпускник Ждановского металлург. ин-та 1970 г., зав. кафедрой автоматизации технологических процессов и производств, декан факультета информационных технологий.

© В. Н. Матвиенко, С. В. Гулаков, 2001

которые ранее считались неподдающимися наплавке. В частности, определены температурный режим наплавки, условия формирования свойств наплавленного слоя, характеристики применяемых наплавочных материалов. Сотрудники лаборатории принимали активное участие в разработке, модернизации и освоении наплавочного оборудования и технологии восстановления и упрочнения прокатных валков и другого металлургического оборудования, а также создании наплавочных участков на ряде металлургических предприятий. Многолетний опыт эксплуатации прокатных валков обжимных станов металлургических комбинатов ОАО «ММК им. Ильича», «Запорожсталь» и «Криворожсталь», рабочих и опорных валков НШС горячей прокатки на металлургических комбинатах ОАО «ММК им. Ильича», Ново-Липецком и Череповецком подтвердил высокую эффективность предложенных материалов и технологий.

Разработаны и освоены конструкции наплавленных слоев с износостойкостью, изменяющейся по длине, глубине и поверхности бочки валка, позволяющие не только повысить производительность прокатных станов и работоспособность валков, но и улучшить качество проката, увеличить выход годного металла, снизить отходы на обрезь, уменьшить пробуксовки и сгладить пиковую нагрузку на главный привод обжимного стана. Получаемая при этом рабочая поверхность обладает уникальным комплексом свойств — равнознашивание поверхности независимо от нагрузки, изнашивание по требуемому закону, получение квазикомпозитных сплавов в малых и больших объемах.

Разработаны технологии, позволяющие изготавливать прокатные валки с разными рабочими слоями: состоящими из чередующихся в шахматном порядке участков из материалов с различным уровнем твердости, пластичности, износостойкости или состоящими из наплавленных валиков, отдельные участки которых определенным образом сориентированы по отношению друг к другу, что обеспечивает высокую стойкость рабочей поверхности к воздействию циклических теплосмен за счет торможения развития трещин разгара, а также неизменные условия захвата металла в течение всего периода эксплуатации. Для наплавки предложенных конструкций разработаны новые способы наплавки, наплавочные материалы, автоматизированное оборудование.

Для регистрации и контроля температурного режима наплавляемых изделий в лаборатории разработан малогабаритный контактный электронный термомонитор, позволяющий фиксировать температуру поверхности металла в диапазоне 100...750 °C.

В лаборатории создана система автоматизированного проектирования технологических процессов наплавки деталей металлургического оборудования, повышающая эффективность проектирования наплавленного слоя сложной конфигурации с использованием компьютерной технологии. В деятельности лаборатории с начала ее основания одним из главных направлений является совершенствование технологии широкослойной наплавки для повышения ее производительности и качества. Разработаны и реализованы способы наплавки ленточ-

ным электродом, обеспечивающие надежное сплавление восстанавливаемого слоя при минимальной доле участия основного металла, путем перераспределения воздействия источника нагрева по фронту плавления, управления массопереносом расплавленного металла и формообразованием сварочной ванны. Эффект достигается профилированием ленточного электрода, а также изменением положения и соотношения массовых скоростей подачи нескольких ленточных электродов. Например, наплавка двумя ленточными электродами обеспечивает повышение производительности процесса до 30...32 кг/ч при высоком качестве наплавленного слоя и незначительной (7...8 %) доле участия основного металла в наплавленном.

Для реализации способа наплавки профилированным ленточным электродом спроектирована и изготовлена в условиях опытного завода НПО ЦНИИТмаш (г. Москва) партия устройств для подачи и одновременного профилирования ленты, показавших высокую надежность при эксплуатации в производственных условиях завода энергетического машиностроения (г. Чехов, Россия), ПО «Атоммаш» (г. Волгодонск, Россия), Донецкого, Ново-Липецкого и Константиновского металлургических заводов, ММК им. Ильича и др.

В ОНИЛ наплавки созданы специальные методики и установки для изучения и исследования особенностей процессов наплавки и испытания основных свойств наплавленного металла таких, как технологическая прочность, стойкость к образованию горячих и холодных трещин, замедленному разрушению, прочность в рабочем диапазоне температур, твердость при повышенных температурах, сопротивляемость термической усталости, износостойкость при повышенных температурах, контактная усталость и др. Эти методики успешно используются также сотрудниками кафедр ПГТУ и других научно-исследовательских, учебных учреждений.

Результаты исследований свойств наплавочных материалов и технологий неоднократно проверены при наплавке многих типов прокатных валков, изготовленных из различных видов легированной стали. Они доказали технические и экономические преимущества научных разработок ОНИЛ наплавки. По результатам научно-исследовательских работ ОНИЛ наплавки были подготовлены и защищены четыре докторские и девять кандидатских диссертаций, подготовлены и изданы четыре монографии, созданы новые наплавочные материалы, технологии, оборудование. Новизна и приоритет научных разработок ОНИЛ наплавки подтверждены более чем 150 авторскими свидетельствами СССР и патентами России, США, Англии, Франции, Швеции, Германии и других стран.

В развитие как самой лаборатории, так и ее отдельных научных направлений значительный вклад внесли Ю. В. Белоусов, В. П. Ермолов, Н. Г. Заварика, В. П. Иванов, А. В. Ковальчук, В. П. Лаврик, Л. С. Малинов, Б. И. Носовский, А. И. Олдаковский, И. И. Пирч, Г. Г. Псарас, Н. Ф. Рыжов, С. С. Самотугин, К. К. Степнов, В. И. Щетинина и др.

Поступила в редакцию 28.05.2001

ОСОБЕННОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ НАПЛАВКЕ СПОСОБОМ ПЛАЗМА-МИГ

В. В. ЧИГАРЕВ, д-р техн. наук, **Н. А. МАКАРЕНКО**, канд. техн. наук, **К. А. КОНДРАШОВ**, инж.
(Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь),
Н. М. ВОРОПАЙ, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Определено влияние полоцилиндрической дуги при наплавке способом плазма-МИГ на характер плавления порошковой проволоки, аксиально подаваемой через канал плазмотрона. Установлено ее положительное воздействие на равномерность плавления сердечника и металлической оболочки проволоки. Показано, что наплавка способом плазма-МИГ может осуществляться при пониженном токе плавящегося электрода без коротких замыканий дугового промежутка и минимальном проплавлении основного металла.

Ключевые слова: плазменная наплавка, режимы наплавки, плавление электрода, перенос металла, порошковая проволока

Одним из основных требований, предъявляемых к способам сварки и наплавки порошковой проволокой, является обеспечение равномерности плавления сердечника, имеющего низкую электропроводность металлической оболочки. При наплавке способом плазма-МИГ электродная проволока дополнительно нагревается за счет тепла полоцилиндрической дуги [1], а при увеличенном вылете — также джоулева тепла проходящего тока [2].

Изучение особенностей плавления электродной проволоки в зависимости от основных параметров режима необходимо для установления оптимальных условий сварки и наплавки. Причем при сварке главным требованием, как правило, является достижение максимальной глубины проплавления, а при наплавке — минимальное разбрызгивание наплавленного металла основным.

Коэффициент формы шва при плазменной сварке в значительной степени зависит от давления плазменно-газового потока, значение которого пропорционально квадрату силы тока [3, 4]. Характер плавления и переноса электродного металла также зависит от тока.

Поскольку наплавка (сварка) плавящейся электродной проволокой является составным элементом процесса плазма-МИГ, вид переноса влияет на состояние, сохранность плазмообразующего сопла и кольцевого неплавящегося электрода, а также на стабильность процесса. С этой точки зрения предпочтительнее мелкокапельный и струйный перенос с минимальным разбрызгиванием, который зафиксирован при достаточно высоких плотностях тока.

Чигарев Валерий Васильевич — выпускник Ждановского металлург. ин-та 1969 г., профессор, зав. кафедрой металлургии и технологии сварочного производства.

Макаренко Наталья Алексеевна — докторантка кафедры металлургии сварочного производства.

Кондрашов Константин Александрович — научный сотрудник кафедры металлургии и технологий сварочного производства.

Воропай Николай Маркович — ведущий научный сотрудник ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины.

© В. В. Чигарев, Н. А. Макаренко, К. А. Кондрашов, Н. М. Воропай, 2001

Однако при наплавке для достижения минимального проплавления основного металла плотность тока должна быть небольшой, что сопровождается, как правило, крупнокапельным переносом и повышенным разбрызгиванием.

Задача настоящего исследования заключалась в определении оптимальных параметров режима наплавки по двум критериям — максимально допустимая плотность тока и минимальное проплавление основного металла.

Эксперименты проводили с использованием порошковой проволоки на плазмотроне типа ПНАМ-2 с таким подключением: плавящийся электрод — изделие к источнику с жесткой характеристикой ВДУ-601 при обратной полярности; неплавящийся электрод (он же внутреннее сопло) к источнику питания с падающей характеристикой при обратной полярности. Плазмотрон и подающий механизм закрепляли неподвижно на стойке. Образцы устанавливали на суппорте и перемещали со скоростью сварки отдельного привода. Процесс возбуждения и горения дуги, плавления электрода и перенос электродного металла фиксировали с помощью скоростной киносъемки (до 4000 кадров в секунду) камерой СКС-1М с одновременной записью тока неоновой лампы кинокамеры, сварочного тока и напряжения на дуге на шлейфном осциллографе Н-116.

Исследование характера плавления электродной проволоки в плазменной полоцилиндрической дуге представляет определенные трудности, вызванные тем, что свечение столба плазменной дуги препятствует фиксации капель, яркость которых меньше яркости дуги. Поэтому использовали дополнительную контрподсветку дуги лампой накаливания с плоским светящимся телом, на фоне нити которой наблюдали форму конца плавящегося электрода и капли расплавленного металла [5].

Покадровая расшифровка и просмотр кинограмм показали, что процесс плазма-МИГ в аргоне при выбранных параметрах режима может сопровождаться крупнокапельным переносом электродного металла, переносом капель металла среднего размера без коротких замыканий и мелкокапельным переносом с определенной частотой.

С целью изучения влияния плазменной полоцилиндрической дуги на частоту переноса и размер капель выполнили две серии экспериментов наплавки порошковой проволокой на одной и той же установке в условиях существования полоцилиндрической дуги (процесс плазма-МИГ) и свободногорящей дуги при отсутствии полоцилиндрической дуги. В обоих случаях задавали одинаковые значения среднего тока дуги, скорости подачи электрода, расхода газа и скорости наплавки, выбираемые путем планирования эксперимента [6, 7].

Идентичность остальных условий обеих серий экспериментов позволила исключить из параметров оптимизации такие факторы, как влияние состава и диаметра порошковой проволоки, динамических характеристик источника питания и сварочной цепи, а также состава защитного газа. По пяти опытам каждой серии оценивали влияние на характер плавления и переноса трех линейных факторов при процессе плазма-МИГ и при свободногорящей дуге. Плазмообразующим газом служил аргон. Скорость наплавки устанавливали постоянной (20 м/ч), расход защитного газа (аргона) составлял 10 л/мин . Ток сварочной дуги варьировали в пределах $200\ldots340 \text{ А}$, расход плазмообразующего газа — от 8 до 16 л/мин и ток плазменной дуги изменяли в пределах от 80 до 180 А .

Для количественной обработки результатов экспериментов, кроме отдельных замеров капель по кинокадрам, использовали методику, описанную в работе [8]. Массу m_k и диаметр переноса капель d_{cp} рассчитывали по количеству переходов капель (частоте переноса n_k). Установлено (рис. 1), что при процессе плазма-МИГ частота переноса капель повышается в среднем в $3\ldots4$ раза с увеличением тока полоцилиндрической дуги. При этом масса и диаметр отрывающихся капель соответственно уменьшаются.

Плотность тока на анодном пятне, расположенным на жидкой капле, при увеличении тока остается постоянной, а площадь пятна растет. Следовательно, в каплю поступает больше тепла, а поскольку с увеличением температуры стали (и большинства других металлов) коэффициент поверхностного натяжения уменьшается, то снижается и уровень критического тока, при котором начинается струйный перенос. Уменьшением поверхностного натяжения объясняется достижение струйного переноса при меньшем токе дуги, а также в случае введения в состав защитного газа кислорода [9].

Одним из факторов, оказывающих влияние на характер переноса, является пинч-эффект, способствующий при повышении тока измельчению капель и увеличению частоты переноса. В настоящей работе допускается, что воздействие электромагнитных сил на перенос капель при процессе плазма-МИГ качественно и количественно аналогично характеру их воздействия при свободногорящей дуге.

Кроме обычных источников поступления тепла в плавящийся электрод, при процессе плазма-МИГ дополнительным источником является тепловыделение от столба полоцилиндрической дуги. Удельный тепловой поток столба полоцилиндрической дуги выражается законом Стефана–Больцмана:

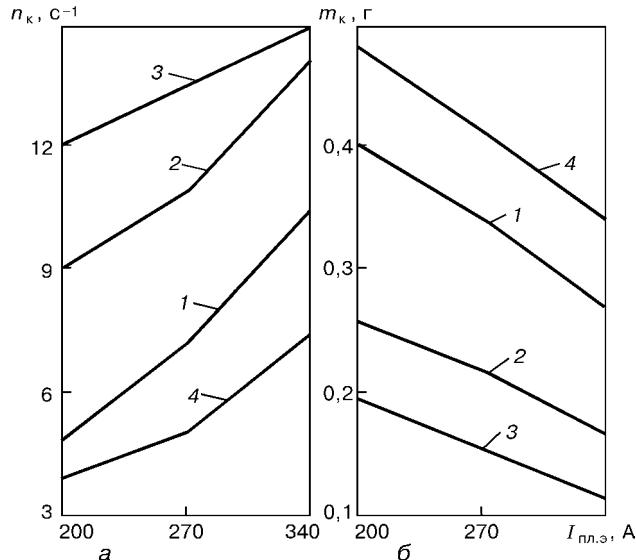


Рис. 1. Влияние тока полоцилиндрической дуги I_n на частоту переноса n_k (а) и массу капель m_k (б): 1 — $I_n = 80 \text{ А}$; 2 — $I_n = 130 \text{ А}$; 3 — $I_n = 180 \text{ А}$; 4 — свободногорящая дуга ($I_n = 0$). Расход плазмообразующего газа Q_n (аргона) — 8, защитного (аргона) — 10 л/мин

$$q_r = C \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где C — коэффициент пропорциональности; T — температура поверхности тела. Можно предположить, что коэффициент C и температура поверхности не изменяются в пределах выбранных параметров режима.

Таким образом, количество тепла Q , поступившего в каплю от излучения, прямо пропорционально времени облучения и площади облучаемой поверхности капли F_k и конца электрода l_r :

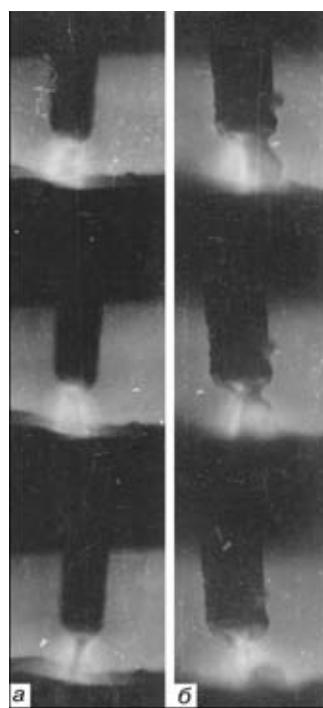


Рис. 2. Кинограммы наплавки способом плазма-МИГ: а — $I_{pl,z} = 270$; б — 200 А ($I_n = 130 \text{ А}$, расход аргона — 10 л/мин)

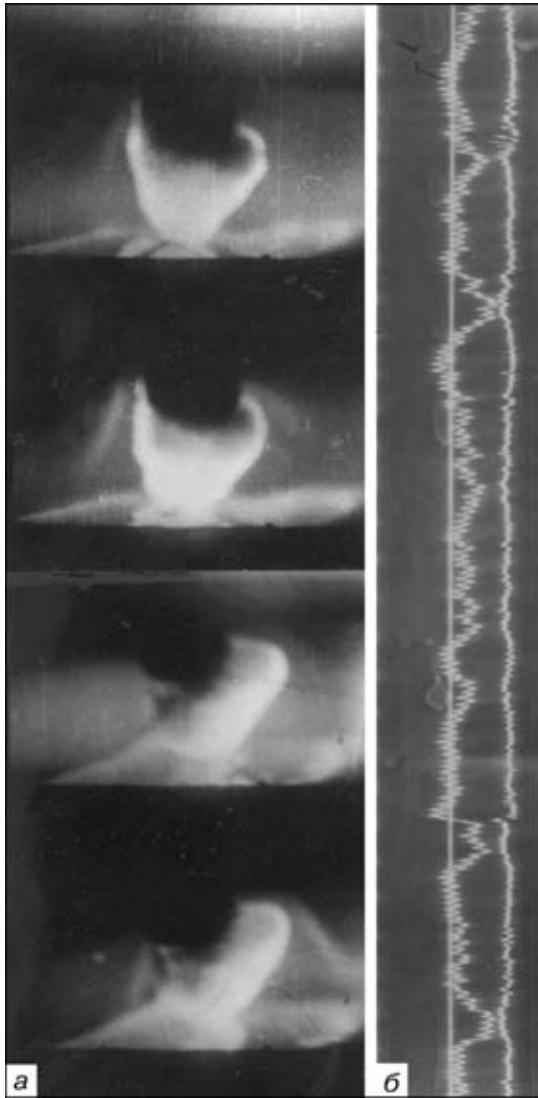


Рис. 3. Кинограмма (а) и осциллограмма (б) замыкания столба полоцилиндрической дуги каплей электродного металла ($I_{\text{пл.э}} = 120 \text{ A}$; $I_n = 130 \text{ A}$; расход аргона — 10 л/мин)

$$Q \equiv q_r t(F_k + \pi d l).$$

Очевидно, что основным фактором, оказывающим влияние на измельчение капель в изучаемом процессе, является уменьшение сил поверхностного натяжения вследствие дополнительного нагрева тепловыделением от столба полоцилиндрической дуги. При этом конвективным теплопереносом можно пренебречь, так как теплопроводность аргона невелика (при 26000 К она составляет 0,05 Вт/(см·К)) и переносу препятствует сравнительно холодный поток газа. Дополнительный нагрев участка электродной проволоки, выступающей из неплавящегося электрода, а также капли производится за счет излучения.

Следует отметить, что дополнительный нагрев внешним излучением благоприятно сказывается на характере плавления торца порошковой проволоки (рис. 2). Важнейшим преимуществом процесса плазма-МИГ является равномерное проплавление порошкового сердечника и металлической оболочки. Воздействие столба полоцилиндрической дуги способствует интенсивному расплавлению сердеч-

ника и осесимметричному расположению капель на торце электрода. Несмотря на то что коническая форма сердечника сохраняется, его длина уменьшается от 3...4 мм при свободногорящей дуге до 2 мм при плазменной дуге. В таких условиях часть расплавленного металла оболочки стекает в дугу по поверхности сердечника. Кинокадры плавления порошковой проволоки показывают, что в условиях процесса плазма-МИГ отклонение капель от оси электрода практически не зафиксировано, что можно объяснить меньшим размером капель и положительным воздействием плазменно-газового потока, «сдувающего» отклоняющиеся от оси капли.

Аэродинамическое воздействие плазменно-газового потока кольцевого электрода суммируется с действием плазменного потока электромагнитного происхождения, направленным также от электрода к ванне [10], что способствует увеличению количества переходов капель при меньшем токе (рис. 1). Однако несмотря на эти потоки при крупнокапельном переносе возможно шунтирование плазменной дуги. Дополнительно к плану экспериментов выполнено исследование процесса плазма-МИГ при токах плавящегося электрода, несколько меньших нижнего уровня ($I_{\text{пл.э}} = 120$ и 150 A). При размерах, примерно равных внутреннему диаметру кольцевого электрода, капли отклоняются и столб полоцилиндрической дуги замыкается на каплю (рис. 3). О таком шунтировании можно судить и по уменьшению напряжения обеих дуг.

Наиболее оптимальными являются режимы среднекапельного переноса, когда диаметр капли меньше диаметра плавящегося электрода. Для порошковой проволоки выбранного состава диаметром 2 мм этому условию соответствуют $I_{\text{пл.э}} = 220 \dots 260 \text{ A}$, $U_d = 30 \dots 32 \text{ В}$ при параметрах режимов плазменной дуги $I_n = 180 \dots 240 \text{ A}$ и $U_n = 40 \dots 42 \text{ В}$.

Выводы

1. Дополнительное тепловое воздействие плазменной полоцилиндрической дуги при наплавке способом плазма-МИГ порошковой проволокой способствует равномерному плавлению сердечника и металлической оболочки, а также осесимметричному формированию капель на торце электрода. Установлено, что с повышением тока полоцилиндрической дуги и, следовательно, температуры нагрева электрода, а также капли внешним излучением частота переноса существенно увеличивается, а размер капель соответственно уменьшается при неизменном токе в цепи плавящегося электрода.

2. Особенностью процесса плазма-МИГ является возможность производить наплавку при более низких (по сравнению с другими дуговыми способами наплавки плавящимся электродом) токах. При этом практически полностью исключается разбрзгивание электродного металла и сводится к минимуму проплавление основного металла.

3. Наиболее оптимальным для наплавки способом плазма-МИГ является режим переноса, исключающий шунтирование полоцилиндрической дуги каплями расплавленного металла. Такие условия

реализуются в том случае, если диаметр капель не превышает диаметра электродной проволоки.

1. *Majar improvements in hardsurfacing steel rolls for continuous casting, using Philips-plasma-MIG with new metall cored wire* // Steel Times. — 1981. — № 9. — Р. 472–473.
2. *Макаренко Н. А. Плазменная наплавка с аксиальной подачей порошковой проволоки* // Автомат. сварка. — 1998. — № 12. — С. 52–53.
3. *Дятлов В. И. Элементы теории переноса электродного металла при электродуговой сварке* // Новые проблемы сварочной техники: Сб. науч. тр. — Киев: Техника, 1964. — С. 167–182.
4. *Петров А. В. Перенос металла в дуге и проплавление основного металла при сварке в защитных газах* // Автомат. сварка. — 1957. — № 4. — С. 19–27.
5. А. с. 267772 СССР, МПК B 23 K 30/17. Способ исследования процесса дуговой сварки / А. Н. Корниенко. — Опубл. 02.04.70, Бюл. № 13.
6. *Винарский М. С., Лурье М. В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях*. — Киев: Техника, 1975. — 168 с.
7. *Использование регрессионного анализа для изучения сварочных процессов* / О. Г. Касаткин, Ю. Н. Ланкин, Ю. А. Стеренбоген, Ю. Д. Яворский // Автомат. сварка. — 1970. — № 3. — С. 5–9.
8. *Походня И. К., Суптель А. М. Теплосодержание капель металла при дуговой сварке в защитных газах* // Там же. — 1967. — № 2. — С. 13–18.
9. *Римский С. Т., Свецинский В. Г., Смиян О. Д. Перенос электродного металла при сварке в защитных газах с добавкой кислорода* // Там же. — 1998. — № 10. — С. 22–26.
10. *Заруба И. И. Плазменные потоки в сварочных дугах* // Там же. — 1968. — № 10. — С. 1–5.

The effect of a hollow-cylindrical arc in surfacing using the plasma MIG method on the character of melting of flux-cored wire axially fed through the plasmatron channel has been evaluated. Its positive influence on uniformity of melting of the core and metal sheath of the wire is shown. Also it is shown that plasma MIG surfacing can be performed at a decreased current of consumable electrode without short-circuiting of the arc gap and minimum penetration of the base metal.

Поступила в редакцию 14.05.2001

ВНИМАНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ! СВЭСТА-2001

Вышел в свет очередной сборник «Экономико-статистические данные по сварочному производству: СВЭСТА-2001», издаваемый Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины на русском и английском языках.

Сборник «СВЭСТА-2001» издан при содействии Международного института сварки (IIW), Европейской сварочной федерации (EWF), а также проекта UNIDO и UNDP-ПрООН.

В сборнике «СВЭСТА-2001» представлена систематизированная экономико-статистическая информация о состоянии и развитии рынка сварочной техники в различных странах мира, включая Германию, Россию, Украину, Францию, США, Японию и другие страны за период 1998–1999 гг. Приведены количественные и стоимостные показатели объемов производства, потребления, экспорта-импорта оборудования и расходуемых материалов для сварки и родственных технологий. Статистическая информация по базовым показателям производства, экспорта-импорта сварочной техники для большинства стран представлена в соответствии с Вопросником МИС/ЕСФ «World Welding Engineering (Reference-Statistical Information)».

В двух других разделах представлена информация о мировом, региональном и национальных рынках сварочных роботов, а также стали — основного материала для сварных конструкций.



Заказы направляйте в редакцию журнала «СВАРЩИК» по факсу: (044) 227-6502. Справки по тел.: (044) 227-6502

НАПЛАВКА БРОНЗЫ Бр.АЖ9-4 ТРЕМЯ РАЗНОРОДНЫМИ ПРОВОЛОКАМИ В АРГОНЕ

В. А. РОЯНОВ, д-р техн. наук, **Г. Г. ПСАРАС**, канд. техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Подтверждена возможность получения наплавленного слоя из бронзы Бр. АЖ 9-4 при электродуговой наплавке тремя разнородными проволоками из меди, железа и алюминия. Установлены оптимальные скорости подачи проволок и режимы наплавки, обеспечивающие оптимальный, требуемый состав. Установлен характер изменения химического состава наплавленного металла по высоте валика, рекомендована оптимальная высота наплавки рабочего слоя. Приведены примеры применения разработанной технологии.

Ключевые слова: бронза, наплавка, железо, медь, алюминий, горелка, скорость подачи, распределение, коэффициент, концентрация, легирование, элемент

Для экономии меди при изготовлении бронзовых вкладышей подшипников прокатных станов, под пятников домкратных тележек конвертеров, шестерен, гаек нажимных винтов, втулок, ободов и многих других изделий широкое применение получили биметаллические детали, изготавливаемые электродуговой наплавкой слоя алюминиевой бронзы на основу из углеродистой стали. При этом в качестве наплавочных материалов используются проволоки марок Бр.АМц9-2 и Бр.АЖМц10-3-1,5.

Из алюминиево-железной бронзы Бр.АЖ9-4, которая наиболее широко применяется в машиностроении для отливки массивных деталей, проволока не изготавливается в связи с низкой деформируемостью сплава.

Для получения наплавленного металла по составу, близкому бронзе Бр.АЖ9-4, разработана технология наплавки тремя разнородными проволоками по схеме, приведенной на рис. 1. Легирующие присадочные проволоки могут быть обесточенными или находиться под одноименным потенциалом с основным металлом. Применяя такую технологию и изменяя марки присадочных легирующих проволок, можно получать наплавленный металл и другого требуемого химического состава.

Подача в зону дуги дополнительных присадочных проволок заметно снижает глубину провара и уменьшает долю основного металла в наплавленном, что существенно при нанесении бронзы на сталь (рис. 2).

Наплавка производится основной медной проволокой марки М1 диаметром 3,0 мм, а в качестве легирующих присадок применяют алюминиевую проволоку Св-А5 диаметром 2,5 мм и углеродистую проволоку марки Св-08А диаметром 2,5 мм.

Содержание алюминия и железа в наплавленном металле зависит от диаметров и скорости подачи алюминиевой и углеродистой проволоки, а также диаметра и скорости подачи медной, основной проволоки.

Псарас Геннадий Георгиевич — выпускник Ждановского металлург. ин-та 1959 г., зав. лабораторией сварки Машиностроительного техникума ПГТУ.

© В. А. Роянов, Г. Г. Псарас, 2001

При заданной подаче медной электродной проволоки скорость подачи алюминиевой проволоки для получения заданного количества алюминия в наплавленном металле устанавливали по зависимости

$$v_{n_{Al}} = \frac{C_{Al} D_{Cu} v_{n_{Cu}} K_{Al}}{C_{Cu} D_{Al}}, \quad (1)$$

а скорость подачи углеродистой проволоки — по формуле

$$v_{n_{Fe}} = \frac{C_{Fe} D_{Cu} v_{n_{Cu}} K_{Fe}}{C_{Cu} D_{Fe}}, \quad (2)$$

где v_{n_M} , $v_{n_{Cu}}$, $v_{n_{Fe}}$ — скорость подачи соответственно алюминиевой, медной и углеродистой проволоки, м/ч; C_{Al} , C_{Cu} , C_{Fe} — доли алюминия, меди и железа в наплавленном металле, %; D_{Al} , D_{Cu} , D_{Fe} — диаметр алюминиевой, медной и углеродистой проволоки, мм; K_{Al} , K_{Fe} — коэффициенты, учитывающие потери на угар легирующей алюминиевой и железной

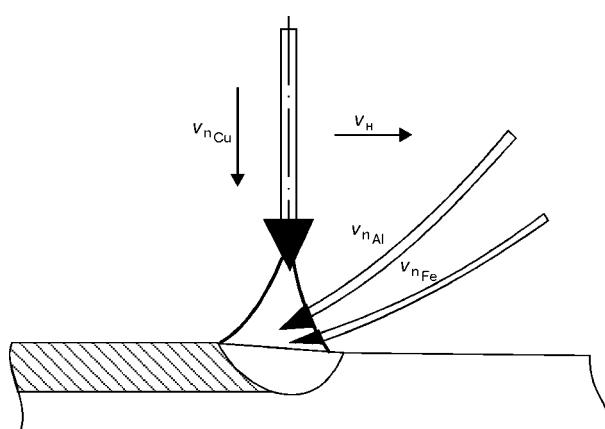


Рис. 1. Схема электродуговой наплавки бронзы Бр.АЖ9-4

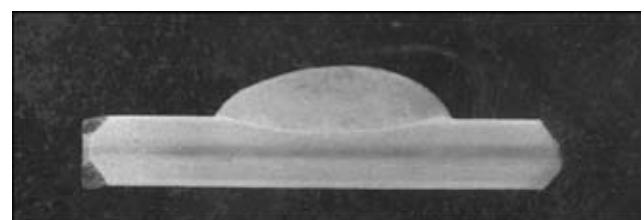


Рис. 2. Макрошлиф наплавленного валика бронзы Бр.АЖ9-4



Рис. 3. Микроструктура наплавленной бронзы Бр.АЖ9-4 ($\times 200$)

проводолки. Приведенные коэффициенты устанавливали опытным путем: $K_{\text{Al}} = 1,05 \dots 1,1$; $K_{\text{Fe}} = 1,02 \dots 1,05$.

При наплавке в аргоне на постоянном токе обратной полярности оптимальным был следующий режим: $I_d = 420 \dots 460$ А, $U_d = 32 \dots 36$ В, $v_n = 14 \dots 18$ м/ч; $v_{n_{\text{Cu}}} = 80$, $v_{n_{\text{Al}}} = 11$ и $v_{n_{\text{Fe}}} = 6$ м/ч.

Расход аргона 25...30 л/мин. Как видно из рис. 2, при наплавке на указанном режиме глубина

The study confirmed the possibility of producing a deposited layer of bronze Br.AZh 9-4 in electric-arc surfacing with three dissimilar wires of copper, iron and aluminium. Optimal wire feed rates and surfacing modes, ensuring the optimal required composition, have been determined. Nature of variation of the deposited metal composition along the bead height is established and the optimal height of the deposited working layer is recommended. Examples of the developed technology application are given.

проплавления незначительная, наплавленный металл плотный (поры и трещины не наблюдаются). Высокое качество наплавленного металла достигается за счет надежной очистки и обезжиривания (как механическим путем, так и химическим травлением) присадочных проволок.

Многослойный наплавленный металл по химическому составу соответствует бронзе марки Бр.АЖ9-4 и содержит, %: 8...10 алюминия, 3...4 железа. Механические свойства такого наплавленного металла следующие: $\sigma_b = 500 \dots 550$ МПа, $HB = 160 \dots 180$. Характеристика микроструктуры наплавленной бронзы Бр.АЖ9-4 приведена на рис. 3.

Разработанная технология электродуговой наплавки бронзы Бр.АЖ9-4 тремя разнородными проволоками в аргоне, которая прошла производственную проверку при наплавке под пятников домкратных тележек конвертеров, обеспечивает высокое качество наплавленного металла. Она универсальна и не встречает трудностей в технике выполнения. Технология может быть рекомендована для широкого применения при выполнении наплавки ответственных изделий.

Поступила в редакцию 25.04.2001

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ЗТВ СОЕДИНЕНИЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ КАЛЬЦИЕМ

И. В. ЗАХАРОВА, инж., Е. А. ЧИЧКАРЕВ, канд. техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, Мариуполь),

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

А. И. ТРОЦАН, д-р техн. наук (Ин-т проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины),

А. Я. ДЕЙНЕКА, О. С. КИРЮХИН, инженеры (ОАО ХТЗ)

Методом дилатометрических измерений построены диаграммы анизотермического распада аустенита для сталей 13Г1СУ, 09Г2ФБ, 10Г2ФБ, модифицированных кальцием. Показаны изменения структуры низколегированных сталей трубного сортамента под действием термического цикла сварки. Определены константы уравнений Авраами для полиморфных превращений, оценены параметры эмпирического уравнения, связывающего показатели ударной вязкости с фазовым составом металла ЗТВ. Установлено, что скорость охлаждения в интервале 600...500 °C для сталей 13Г1СУ, 09Г2ФБ, 10Г2ФБ, должна лежать в пределах 5...35, а при жестких требованиях к структуре — 8,5...35 °C/c.

Ключевые слова: зона термического влияния, скорость охлаждения, образцы-имитаторы, микроструктура, ударная вязкость, термокинетическая диаграмма, погонная энергия, тепловложение

В настоящее время для изготовления прямошовных газо-, нефтепроводных труб большого диаметра используются стали с твердорастворным упрочнением, в том числе и обработанные кальцием. Технология получения таких сталей и механизм действия кальция на их структуру и свойства описаны в работе [1]. Положительные качества (повышенная прочность, высокая хладостойкость) указанного класса сталей должны быть сохранены и в сварных соединениях. Основной трудностью при сварке является предотвращение резкого ухудшения свойств в результате появления в металле зоны термического влияния (ЗТВ) структур, снижающих сопротивляемость хрупкому разрушению.

Для основных марок сталей трубного назначения, раскисленных кальцием (13Г1СУ, 09Г2ФБ, 10Г2ФБ), в литературе имеются лишь отрывочные сведения об особенностях структурных изменений в условиях сварочного термического цикла [2, 3]. В связи с этим в данной работе поставлена задача исследовать закономерности формирования структуры металла ЗТВ путем имитации сварочных циклов на образцах трубных марок стали, модифицированных кальцием, определить влияние структурных изменений на механические свойства металла и выбрать рациональные режимы сварки, основываясь на структурной методике исследования, приведенной в работе [4]. Химический состав исследованных марок сталей приведен в таблице. Все они относятся к категории прочности К55–К60 и имеют углеродный эквивалент около 0,40.

Исследование исходной структуры металла показало, что все стали в состоянии поставки имеют

Химический состав трубных марок стали

Марка стали	Массовое содержание элементов, %								
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al
13Г1СУ	0,14	1,50	0,52	0,06	0,016	0,038	0,0045	0,004	0,037
09Г2ФБ	0,09	1,62	0,26	0,04	0,017	0,03	0,03	0,03	0,03
10Г2ФБ	0,11	1,65	0,24	0,05	0,017	0,03	0,03	—	0,037
Марка стали	Массовое содержание элементов, %								
	Ti	V	Nb	As	N ₂				
13Г1СУ	0,023	0,02	0,006	0,005	0,007				
09Г2ФБ	0,015	0,07	0,034	0,006	0,009				
10Г2ФБ	0,002	0,10	0,032	0,005	0,008				

Захарова Ирина Вячеславовна — выпускница ПГТУ 1997 г., аспирантка кафедры оборудования и технологии сварочного производства.

Чичкарев Евгений Анатольевич — старший преподаватель кафедры теории металлургических процессов.

Васильев Валентин Григорьевич — старший научный сотрудник ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

Троцан Анатолий Иванович — зав. отделом Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины.

Дейнека Anatolij Яковлевич — начальник Центральной заводской лаборатории ОАО ХТЗ.

Кирюхин Олег Степанович — начальник трубной лаборатории ОАО ХТЗ.

© И. В. Захарова, Е. А. Чичкарев, В. Г. Васильев, А. И. Троцан, А. Я. Дейнека, О. С. Кирюхин, 2001

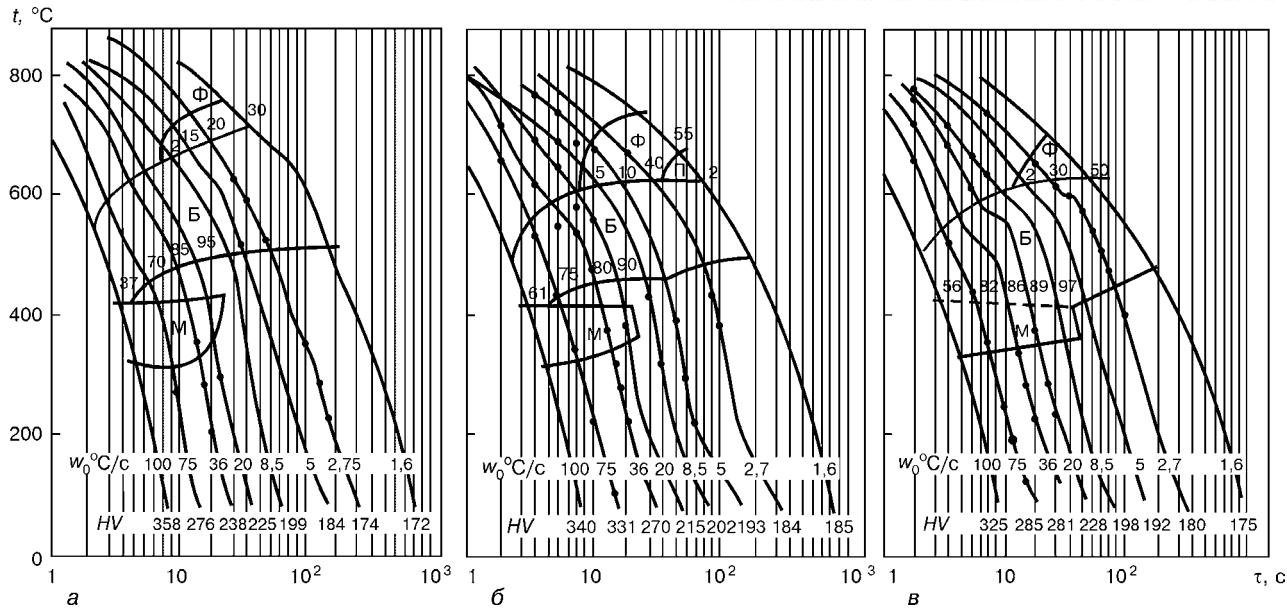


Рис. 1. Термокинетическая диаграмма для сталей: 13Г1СУ (а), 09Г2ФБ (б), 10Г2ФБ (в)

ферритно-перлитную структуру с выраженной строочечностью расположения феррита и перлита, совпадающей с направлениями прокатки.

Структурные превращения изучали в условиях имитации термических циклов сварки на быстро действующем дилатометре конструкции ИЭС им. Е. О. Патона [5].

Максимальная температура нагрева образцов-имитаторов в дилатометре была постоянной и составляла 1350 °С, скорость нагрева — 150 °С/с (в интервале температур 800...1000 °С). Диапазон исследованных скоростей охлаждения (в интервале 600...500 °С) составлял 100...1,6 °С/с и охватывал скорости охлаждения соединений, выполняемых сваркой в углекислом газе и под флюсом [6].

Обработка результатов дилатометрического анализа и построение диаграмм проводились по общепринятой методике.

Количественный расчет соотношения продуктов превращения проводили по дилатометрическим кривым методом отрезков [7, 8].

Содержание микроструктурных составляющих определяли по ГОСТ 8233-56. Для этого после полного остывания образцов-имитаторов изготавливали микрошлифы, на которых также измеряли твердость. Выявление микроструктуры образцов проводили травлением в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте, а ее изучение и съемку — на микроскопе «Неофот-23» при увеличении 320.

На рис. 1 приведены термокинетические диаграммы превращения аустенита в сталях 13Г1СУ, 09Г2ФБ и 10Г2ФБ в условиях имитации сварочного термического цикла. В исследованном диапазоне скоростей охлаждения превращение аустенита происходит в мартенситной (М), бейнитной (Б) и ферритной (Ф) областях (в стали 10Г2ФБ захватывается и перлитная (П) область). Для всех сталей характерно, что чисто мартенситное превращение в них не происходит даже при максимальной скорости охлаждения. Образующаяся бейнитно-мартенситная структура имеет сравнительно невысокую твердость (ниже HV 350); только в стали 13Г1СУ

она выше (HV 358), по-видимому, вследствие более высокого содержания углерода в ней.

Расчет количества фазовых составляющих позволяет определить ударную вязкость металла ЗТВ, а путем обработки результатов расчета по заданным предельным значениям ударной вязкости — желаемый фазовый состав и, следовательно, среднюю скорость охлаждения $w_{6/5}$. Известное соотношение [6, 9] для расчета количества фазовых составляющих не дает достаточно точного результата для рассматриваемых марок стали.

Количественную обработку полученных результатов проводили на основе уравнений Авраами [10]. Так, содержание мартенсита в структуре (%) составляет

$$M = 100 \left[1 - \exp \left(-k_m w^m \right) \right], \quad (1)$$

содержание феррита и перлита

$$\Phi\Pi = 100 \exp \left(-k_f w_f^n \right), \quad (2)$$

содержание бейнита

$$B = 100 - M - \Phi\Pi, \quad (3)$$

где k_m , n_m , k_f , n_f — константы; w — скорость охлаждения.

Уравнения (1), (2) легко линеаризируются, что позволяет определить константы k_m , n_m и k_f , n_f по экспериментальным данным изменения содержания мартенсита и ферритно-перлитной смеси в металле образца при варьировании скорости охлаждения:

$$\ln \left[-\ln \left(M / 100 \right) \right] = \ln k_m + n_m \ln(w), \quad (4)$$

$$\ln \left[-\ln \left(\Phi\Pi / 100 \right) \right] = \ln k_f + n_f \ln(w). \quad (5)$$

Все исследованные марки стали характеризуются близкими значениями углеродного эквивалента и их структурные диаграммы описываются зависимостями (1)...(3) с такими коэффициентами: $k_m = 0,0021$; $n_m = 1,2$; $k_f = 0,487$; $n_f = 0,8$. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета

по уравнениям (1)...(3) с использованием приведенных значений коэффициентов показано на рис. 2. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами предыдущих исследований.

Известно, что структура металла ЗТВ хорошо коррелирует с характеристиками механических свойств. Так, в результате обработки данных [4] получены следующие зависимости показателей ударной вязкости металла ЗТВ от его фазового состава ($\text{Дж}/\text{см}^2$):

$$KCU_{-60} = -2,50M + 0,87B - 1,40\Phi\Pi, \quad (6)$$

$$KCV_{-40} = -0,864M + 0,505B - 0,661\Phi\Pi. \quad (7)$$

Зависимости (6), (7) адекватны для сталей с углеродным эквивалентом $\approx 0,4$ (результаты проверяли по данным [9, 11]).

Для оценки KCU_{20} известна зависимость аналогичной формы, применяемая для более широкого диапазона варьирования химического состава сталей ($\text{МДж}/\text{см}^2$), [12]:

$$\begin{aligned} KCU_{20} = & (1,06 - 2,8C^2 + 1,3C - 0,08Mn + 0,054\ln(t_{8/5}))M/100 + \\ & + (1,3 - 1,6C - 0,08Mn)B/100 + \\ & + (1,47 - 1,8C + 0,80C^2 - 0,075Mn - 0,043\ln(t_{8/5}))\Phi\Pi/100, \end{aligned} \quad (8)$$

где $t_{8/5}$ — время охлаждения от температуры 800 до 500 °C; C, Mn — содержание химических элементов, %. Зависимости (4)...(7) позволяют установить пределы, в которые должны попадать скорость охлаждения в сварочном термическом цикле (обычно $w_{6/5}$), обеспечивающая фазовый состав металла ЗТВ для получения удовлетворительных значений ударной вязкости. Решение системы уравнений (4)...(6) относительно скорости охлаждения $w_{6/5}$ показало, что для сохранения ударной вязкости на уровне $KCU_{-60} \geq 40 \text{ Дж}/\text{см}^2$ охлаждение должно происходить со скоростями в пределах 4,68...35,16 °C/c.

Анализ микроструктуры образцов-имитаторов, охлаждавшихся со скоростями 5,0...8,5 °C/c, которые обеспечивают удовлетворительные характеристики ударной вязкости, показал, что она характеризуется преимущественно нижним бейнитом. При понижении скорости охлаждения количество верхнего бейнита увеличивается, происходит огрубление бейнита с образованием структуры, напоминающей видманштеттовую; а при $w_0 = 2,7 \text{ °C}/\text{с}$ в структуре повышается содержание структурно-свободного феррита. Поэтому скорости охлаждения ниже 5 °C/c являются нежелательными (при них не обеспечиваются требуемые значения ударной вязкости). Полученные результаты хорошо согласуются с данными работы [13].

Таким образом, рациональный интервал скоростей охлаждения для низколегированных трубных марок сталей ограничен пределом 5...35 °C/c (при более жестких требованиях к металлу ЗТВ — 8,5...35 °C/c). Для решения практических задач сварки труб необходимо увязать скорость охлаждения с погонной энергией.

В соответствии со схемой линейного быстродвижущегося источника средняя скорость охлаждения (°C/c) в интервале температур 600...500 °C $w_{6/5}$ определяется по формуле [14]

$$w_{6/5} = \frac{\pi\lambda c\rho}{(q/v)^2} [(600 - t_0)^3 + (500 - t_0)^3], \quad (9)$$

где q/v — погонная энергия сварки; $q = \eta UI$ — эффективная тепловая мощность источника нагрева при данном коэффициенте полезного действия η , напряжении дуги U и силе тока I ; λ , c , ρ — теплопроводность, теплоемкость и плотность свариваемой стали (по данным [14], для низколегированных сталей $\lambda = 40 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $c\rho = 5,0 \text{ МДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$); t_0 — начальная температура свариваемого изделия.

Погонная энергия сварки, при которой достигается желаемое значение $w_{6/5}$:

$$\frac{q}{v} = \delta [(600 - t_0)^3 + (500 - t_0)^3]^{1/2} \sqrt{\pi \frac{\lambda c \rho}{w_{6/5}}}. \quad (10)$$

Расчет по уравнению (10) для указанных выше пределов скорости охлаждения позволяет установить предельные значения погонной энергии сварки. При толщине свариваемых листов $\delta = 12\dots 20 \text{ мм}$ нижняя граница погонной энергии при $w_{6/5} = 35 \text{ °C}/\text{с}$ должна лежать в пределах 8,9...14,8 кДж/см, а верхняя граница имеет значения 23,5...39,2 кДж/см при $w_{6/5} = 5 \text{ °C}/\text{с}$ и 18,0...30,1 кДж/см при $w_{6/5} = 8,5 \text{ °C}/\text{с}$. Такие значения погонной энергии достигаются на практике (30...50 кДж/см [15]) при использовании стандартного сварочного оборудования.

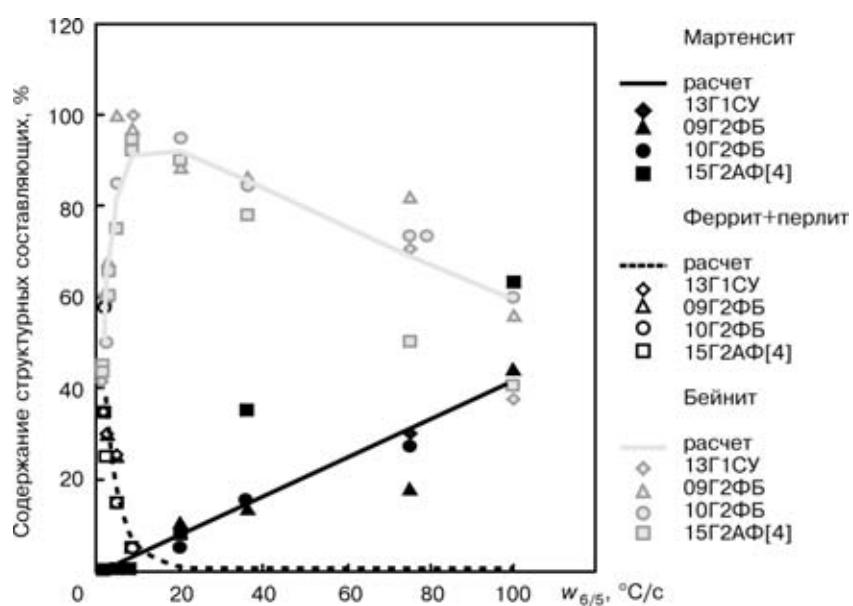


Рис. 2. Структурная диаграмма для низколегированных сталей в зависимости от скорости охлаждения в термическом цикле сварки

Выходы

1. В условиях имитации сварочного термического цикла со скоростями охлаждения 100...1,6 °C/s в низколегированных трубных сталях 13Г1СУ, 09Г2ФБ, 10Г2ФБ, модифицированных кальцием, превращение аустенита происходит в мартенситной, бейнитной и ферритной областях.

2. Для сохранения ударной вязкости сварных соединений трубных сталей, модифицированных кальцием, на исходном уровне ($KCU_{-60} \geq 4$ Дж/см²) скорость охлаждения в металле ЗТВ должна находиться в пределах 35...5 °C/s.

3. Для практических целей дуговой сварки трубных сталей указанные скорости охлаждения достигаются при сварке листов толщиной 12...20 мм на режимах, при которых погонная энергия лежит в пределах 9...39 кДж/см. Реализация таких режимов на практике обеспечивается применением стандартного оборудования и специализированной техники и технологии сварки трубного производства.

1. Улучшение качества непрерывнолитой стали путем микролегирования плакированными порошковыми модификаторами / Б. Ф. Белов, Г. А. Николаев, А. И. Троцен и др. // Сталь. — 1992. — № 1. — С. 24–27.
2. Анучин М. П., Горицкий В. Н., Мирошниченко Б. И. Трубы для магистральных трубопроводов. — М.: Недра, 1986. — 231 с.
3. Матросов Ю. И., Литвиненко Д. А., Голованиченко С. А. Сталь для магистральных газопроводов. — М.: Металлургия, 1989. — 228 с.
4. Грецкий Ю. Я., Демченко В. В., Васильев В. Г. Формирование структуры металла ЗТВ низкокремнистой стали с

The method of dilatometric measurements has been used to plot diagrams of anisothermal decomposition of austenite for steels 13G1SU, 09G2FB and 10G2FB modified with calcium. Variations in the phase structure of low-alloyed tubular steels under the effect of a thermal welding cycle are shown. Constants of Abraham equations for polymorphic transformations have been determined and parameters of an empiric equation relating impact toughness values to the phase composition of the HAZ metal have been estimated. It has been established that the cooling rate within a range of 600...500 °C for steels 13G1SU, 09G2FB and 10G2FB should range from 5 to 35 °C/s and that under stringent requirements for the structure should range from 8,5 to 35 °C/s.

5. Васильев В. Г., Малевский Ю. Б. Дилатометр для исследования фазовых превращений при сварочном термическом цикле // Физ. методы исследования металлов. — Киев: Наук. думка, 1981. — С. 144–148.
6. Шоршоров М. Х. Металловедение сварки стали и сплавов титана. — М.: Наука, 1965. — 336 с.
7. Steven W., Mayer G. Continuous-cooling transformation diagrams of steels. Pt 1. // J. of the Iron and Steel Institute. — 1953. — Vol. 174. — P. 33–45.
8. Черепин В. Т. Экспериментальная техника в физическом металловедении. — Киев: Техника, 1968. — 280 с.
9. Касаткин О. Г., Мусияченко В. Ф. Расчет режима сварки высокопрочной низколегированной стали // Автомат. сварка. — 1977. — № 10. — С. 1–5.
10. Теория сварочных процессов / В. Н. Волченко, В. М. Ямпольский, В. А. Винокуров и др. — М.: Выш. шк., 1988. — 559 с.
11. Башмаков В. Е. Свойства сварных соединений высокопрочных низколегированных сталей // Свар. пр-во. — 1983. — № 4. — С. 21–23.
12. Компьютерное моделирование сварочных процессов как средство прогнозирования дефектов в сварных соединениях / В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка и др. // Автомат. сварка. — 1999. — № 12. — С. 10–19.
13. Взаимосвязь микроструктуры с ударной вязкостью металла шва на низколегированной трубной стали // Д. П. Новикова, Л. Ю. Богачек, В. Ф. Грабин и др. // Автомат. сварка. — 1973. — № 8. — С. 6–9.
14. Лившиц Л. С., Хакимов А. Н. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений. — М.: Машиностроение, 1989. — 336 с.
15. Высокопрочные стали для трубных фитингов / Т. Вада, Д. Е. Дисбург, П. И. Буссель и др. // Сталь для газопроводных труб и фитингов. Тр. конф. — М.: Металлургия, 1985. — С. 295–307.

Поступила в редакцию 25.04.2001

РАСЧЕТ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ ПРИМЕНЯТЕЛЬНО К ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ

А. Д. РАЗМЫШЛЯЕВ, д-р техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь),
В. Р. МАЕВСКИЙ, канд. техн. наук (ОАО «Азовмаш», г. Мариуполь),
С. М. СИДОРЕНКО, инж. (Приазовский гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

На основе метода вторичных источников разработана методика расчета индукции магнитного поля в зоне между соленоидом с ферромагнитным сердечником, генерирующим продольное магнитное поле, и изделием-пластиной. Расчетным путем установлены оптимальные размеры соленоида применительно к процессу дуговой наплавки проволокой под флюсом в продольном магнитном поле.

Ключевые слова: дуговая наплавка, продольное магнитное поле, магнитная индукция, ферромагнитный материал, исследования

Новые возможности для управления геометрическими размерами зоны проплавления при дуговой наплавке сварочной проволокой под флюсом открываются с использованием управляющих продольных магнитных полей (ПРМП) [1–4].

Для процессов дуговой сварки и наплавки в ПРМП обычно применяют устройство ввода магнитного поля (УМВП) в виде соленоида с цилиндрическим ферросердечником, расположенным соосно с электродом [1–5]. При дуговой сварке (наплавке) плавящимся электродом зачастую ферромагнитными являются сварочная проволока, проходящая через отверстие в ферромагнитном сердечнике соленоида, и свариваемое (наплавляемое) изделие. В настоящее время нет методики расчета магнитных полей соленоидов, содержащих ферромагнитные части, что сдерживает поиск оптимальных размеров УМВП для рассматриваемых процессов. Ниже приведена основанная на методе вторичных источников [6] методика расчета компонент индукции ПРМП, генерируемого такими осесимметричными УМВП (рис.1).

Первичным источником магнитного поля является стационарный ток с плотностью j , протекающий в объеме катушки V_k , охватывающей стальной сердечник с объемом $V_{\Phi 1}$, ограниченный поверхностью $S_{\Phi 1}$. Вторичными источниками в этом поле служат фиктивные магнитные заряды с объемной ρ_{M1} и поверхностной σ_{M1} плотностями для стального сердечника и с поверхностной σ_{M2} плотностью для ферромагнитного электрода. Относительную магнитную проницаемость стального сердечника μ_1 принимали зависящей от координат и напря-

женности магнитного поля в точке, а магнитную проницаемость внутри ферромагнитной проволоки μ_2 задавали постоянной. Напряженность эквивалентного магнитного поля, выраженная через плотности всех источников, имеет вид [6]

$$\mathbf{H}(Q) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{V_{\Phi 1}} \rho_{M1}(M1) \frac{\mathbf{r}_{M1Q}}{3} dV_{M1} + \frac{1}{4\pi\mu_0} \oint_{S_{\Phi 1}} \sigma_{M1}(M1) \frac{\mathbf{r}_{M1Q}}{3} dS_{M1} + \\ + \frac{1}{4\pi} \int_{V_k} \frac{[j(N), \mathbf{r}_{NQ}]}{3} dV_N + \frac{1}{4\pi\mu_0} \oint_{S_{\Phi 2}} \sigma_{M2}(M2) \frac{\mathbf{r}_{M2Q}}{3} dS_{M2}. \quad (1)$$

Плотности вторичных источников определялись по соотношениям

$$\rho_{M1}(Q) = -\frac{\mu_0}{\mu_Q} (\mathbf{H}(Q), \operatorname{grad}_Q \mu_1'); \quad (2)$$

$$\sigma_{M1}(Q) = 2\mu_0 \lambda_{M1}(\mathbf{H}(Q), \mathbf{n}_{1Q}); \quad (3)$$

$$\sigma_{M2}(Q) = 2\mu_0 \lambda_{M2}(\mathbf{H}(Q), \mathbf{n}_{2Q}); \quad (4)$$

$$\lambda_{M1} = \frac{\mu_1' - 1}{\mu_1' + 1}; \quad \lambda_{M2} = \frac{\mu_2' - 1}{\mu_2' + 1}, \quad (5)$$

где \mathbf{n}_{1Q} , \mathbf{n}_{2Q} — единичные нормали соответственно к поверхности стального сердечника и ферромагнитного электрода.

Подставив выражение (1) в соотношения (2)–(4), получим систему трех интегральных уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{M1}(Q) + \int_{V_{\Phi 1}} \rho_{M1}(M1) \frac{\mathbf{r}_{M1Q} \nabla_Q \mu_1'}{4\pi\mu(Q) \mathbf{r}_{M1Q}^3} dV_{M1} + \oint_{S_{\Phi 1}} \sigma_{M1}(M1) \frac{\mathbf{r}_{M1Q} \nabla_Q \mu_1'}{4\pi\mu(Q) \mathbf{r}_{M1Q}^3} dS_{M1} + \\ + \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{S_{\Phi 2}} \sigma_{M2}(M2) \frac{\mathbf{r}_{M2Q} \nabla_Q \mu_1'}{4\pi\mu(Q) \mathbf{r}_{M2Q}^3} dS_{M2} = -\mu_0 \int_{V_k} \frac{[j(N), \mathbf{r}_{NQ}] \nabla_Q \mu_1'}{4\pi\mu(Q) \mathbf{r}_{NQ}^3} dV_N; \\ \sigma_{M1}(Q) - \int_{V_{\Phi 1}} \rho_{M1}(M1) \frac{\mathbf{r}_{M1Q} \mathbf{n}_{1Q}}{2\pi \mathbf{r}_{M1Q}^3} dV_{M1} - \oint_{S_{\Phi 1}} \sigma_{M1}(M1) \lambda_{M1}(Q) \frac{\mathbf{r}_{M1Q} \mathbf{n}_{1Q}}{2\pi \mathbf{r}_{M1Q}} dS_{M1} - \\ - \oint_{S_{\Phi 2}} \sigma_{M2}(M2) \lambda_{M1}(Q) \frac{\mathbf{r}_{M2Q} \mathbf{n}_{1Q}}{2\pi \mathbf{r}_{M2Q}^3} dS_{M2} = \frac{\mu_0 \lambda_{M1}(Q)}{2\pi} \int_{V_k} \frac{[j(N), \mathbf{r}_{NQ}]}{\mathbf{r}_{NQ}^3} dV_N; \\ \sigma_{M2}(Q) - \int_{V_{\Phi 1}} \rho_{M1}(M1) \lambda_{M2}(Q) \frac{\mathbf{r}_{M1Q} \mathbf{n}_{2Q}}{4\pi \mathbf{r}_{M1Q}^3} dV_{M1} - \oint_{S_{\Phi 1}} \sigma_{M1}(M1) \lambda_{M2}(Q) \frac{\mathbf{r}_{M1Q} \mathbf{n}_{2Q}}{2\pi \mathbf{r}_{M1Q}} dS_{M1} - \\ - \oint_{S_{\Phi 2}} \sigma_{M2}(M2) \lambda_{M2}(Q) \frac{\mathbf{r}_{M2Q} \mathbf{n}_{2Q}}{2\pi \mathbf{r}_{M2Q}^3} dS_{M2} = \frac{\mu_0 \lambda_{M2}(Q)}{2\pi} \int_{V_k} \frac{[j(N), \mathbf{r}_{NQ}] \mathbf{n}_{2Q}}{\mathbf{r}_{NQ}^3} dV_N. \end{array} \right.$$

Маевский Владимир Рудольфович — выпускник Ждановского металлург. ин-та 1986 г., инженер ОАО «Азовмаш».

Сидоренко Сергей Михайлович — выпускник ПГТУ 1999 г., аспирант кафедры оборудования и технологии сварочного производства.

© А. Д. Размышилев, В. Р. Маевский, С. М. Сидоренко, 2001

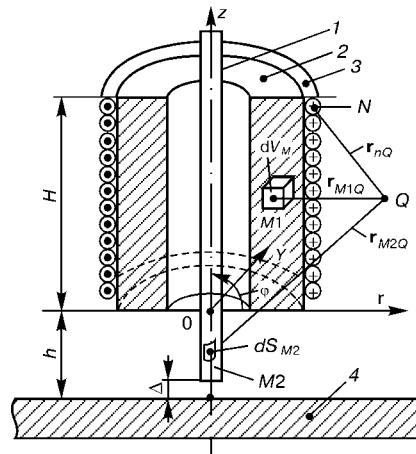


Рис. 1. Схема соленоида, генерирующего ПРМП: 1 — сварочная проволока; 2 — сердечник; 3 — витки катушки (медь); 4 — изделие

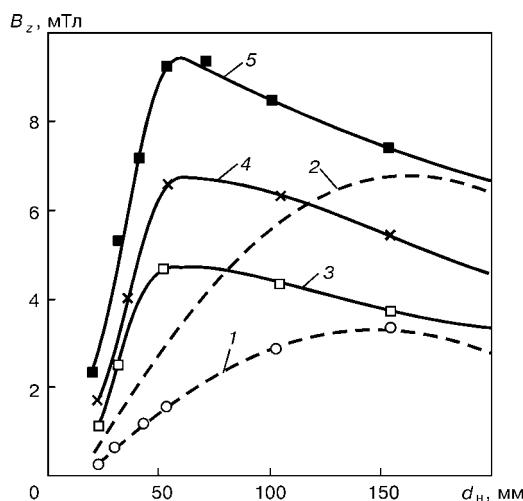


Рис. 2. Зависимость индукции B_z от диаметра сердечника соленоида d_h : 1, 2 — сердечник из немагнитного материала (2 — изделие-ферромагнетик); 3—5 — сердечник-ферромагнетик (4 — изделие-ферромагнетик, 5 — сварочная проволока-ферромагнетик)

Эту систему интегральных уравнений с учетом условий равенства нулю суммы магнитных зарядов решали методом блочной итерации [6]. Нелинейные свойства стального сердечника учитывали по кри-

вой $\mu_1' = \mu_1'(|\mathbf{H}|)$ для данного сорта стали. Сварочную пластину моделировали как неферромагнитный материал, а также как ферромагнитный с постоянной магнитной проницаемостью. Учет ферромагнитных свойств пластины производился методом зеркального отражения [7].

Все расчеты и эксперименты проведены для соленоидов с количеством витков катушки $W = 20$ из медного провода диаметром 2,0 мм при пропускании в этой катушке постоянного тока $I = 42$ А. Ферромагнитный сердечник имел отверстие диаметром $d_{bh} = 12$ мм. Высота катушки во всех экспериментах, за исключением оговоренных случаев, составляла $H = 40$ мм, а расстояние от среза сердечника соленоида до изделия $h = 40$ мм. Использовали сварочную проволоку Св-08А (ферромагнетик) диаметром 5,0 мм, а расстояние от торца проволоки до изделия составляло $\Delta = 5$ мм (рис. 1).

Интерес представлял поиск оптимального наружного диаметра ферромагнитного сердечника d_h , обеспечивающего максимальное значение продольной компоненты индукции B_z ПРМП у поверхности ферромагнитного изделия-пластины (в зоне дуги). Расчетные и экспериментальные данные (на всех приведенных ниже графиках линии соответствуют расчетным данным, а значки — экспериментальным) показывают, что для соленоида с ферромагнитным сердечником значение индукции B_z практически линейно возрастает, если увеличивать d_h до значений 60 мм, а при дальнейшем его увеличении значения B_z уменьшаются (кривые 3—5 на рис. 2). Для соленоида без ферромагнитного сердечника компонента индукции B_z возрастает при увеличении d_h до 152 мм (кривые 1, 2 на рис. 2). Здесь и ниже следует отметить хорошую сходимость экспериментальных и расчетных данных. Таким образом, применение ферромагнитного сердечника позволяет не только увеличить в 2...3 раза индукцию B_z у изделия под электродом (при $d_h \leq 60$ мм), но и уменьшить диаметр соленоида приблизительно в 3 раза, сделав конструкцию УМВП более компактной.

Темп уменьшения компоненты индукции B_z в направлении от среза сердечника соленоида к изделию меньше при наличии ферромагнитного сердеч-

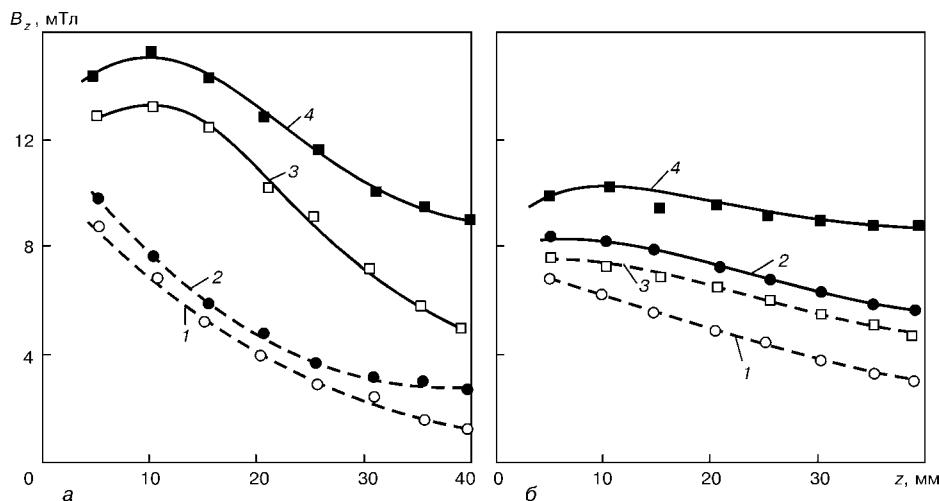


Рис. 3. Распределение индукции B_z вдоль оси $0z$ ($r = 0$) при $d_h = 50$ (а) и 100 (б) мм: 1, 2 — сердечник из немагнитного материала; 3, 4 — сердечник и сварочная проволока (2, 4 — изделие-ферромагнетик)

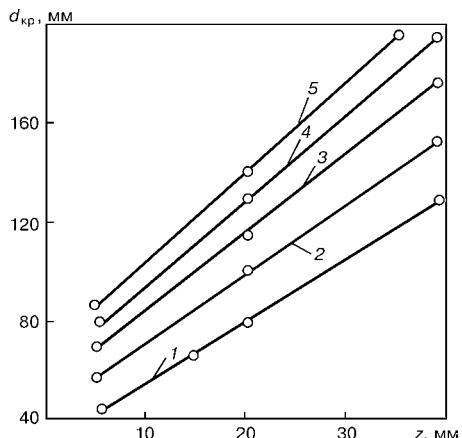


Рис. 4. Зависимость критического диаметра соленоида d_{kp} от расстояния $z = h$ ($r = 0$) соответственно при $H = 20$ (1), 40 (2), 60 (3), 80 (4) и 100 (5) мм

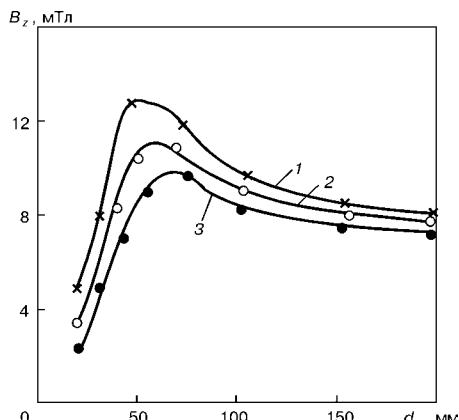


Рис. 5. Зависимость индукции B_z от диаметра ферромагнитного сердечника соленоида d_n (изделие и сварочная проволока — ферромагнетики) соответственно при $H = 20$ (1), 30 (2), 40 (3) мм

ника (кривые 3, 4 и 1, 2 на рис. 3) При увеличении диаметра соленоида компонента индукции B_z вдоль оси $0z$ распределяется более равномерно (кривые 1–4 на рис. 3, а, б). Аналогично (данные не приводятся) и темп спада значений индукции B_z вдоль радиуса в направлении от оси соленоида уменьшается, если увеличивается диаметр соленоида. Таким образом, магнитное поле становится в этом пространстве более однородным, если увеличивать диаметр соленоида (сердечника).

Для соленоидов без ферромагнитных частей (сердечника и сварочной проволоки) и при отсутствии ферромагнитного изделия можно определить его критический диаметр d_{kp} , при превышении которого индукция B_z в определенной точке на его оси не увеличивается, а уменьшается. Расчеты показывают, что при увеличении расстояния вдоль оси z при $r = 0$ ($z = h$ по рис. 1) значения d_{kp} увеличиваются линейно. При увеличении высоты катушки соленоида H значения d_{kp} также возрастают (рис. 4). Аналогичные зависимости имеют место и для соленоидов, содержащих ферромагнитные части, одна-

The procedure for calculation of induction of the magnetic field, generating a longitudinal magnetic field, and a workpiece, i.e. the plate, has been developed on the basis of the secondary source method. Optimal dimensions of the solenoid for the process of submerged-arc wire surfacing in the longitudinal magnetic field have been established by the calculations.

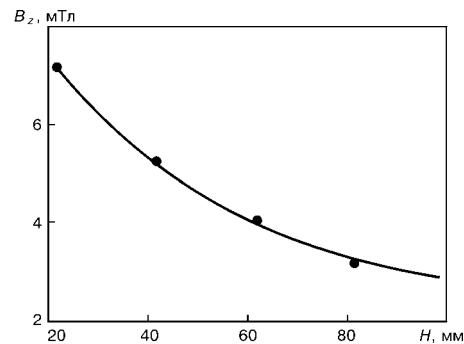


Рис. 6. Зависимость индукции B_z от высоты катушки соленоида H ($d_n = 30$ мм; сварочная проволока и изделие-ферромагнетик)

ко эти зависимости выражены весьма слабо. При наличии в соленоиде ферромагнитных сердечника и проволоки диаметром 5 мм, проходящей через отверстие с $d_{отв} = 12$ мм в сердечнике, а также ферромагнитной пластины уменьшение расстояния $z = h$ от 40 до 20 мм приводит к уменьшению критического диаметра d_{kp} от 60 до 50 мм (рис. 5).

При одной и той же намагничивающей силе катушки $IW = \text{const}$ уменьшение ее высоты H позволяет увеличить индукцию B_z у изделия под электродом (рис. 6). При возрастании диаметра сварочной проволоки компонента индукции B_z увеличивается. Таким образом, необходимо в разумных пределах уменьшать высоту катушки H соленоида, а наплавку выполнять при максимальном (по возможности) диаметре сварочной проволоки.

Выводы

1. Разработанная на основе метода вторичных источников методика расчета магнитных полей, генерируемых соленоидом с ферромагнитными частями, обеспечивает удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных.

2. Выполненные расчетно-экспериментальные исследования позволили рекомендовать оптимальные размеры соленоида применительно к дуговой наплавке в ПРМП сварочной проволокой под флюсом.

- Болдырев А. М., Биржев В. А., Черных А. В. Управление глубиной проплавления при дуговой сварке и наплавке с помощью продольного переменного магнитного поля // Свароч. пр-во. — 1993. — № 6. — С. 30–31.
- Размышляев А. Д. Управление геометрическими размерами шва при дуговой сварке и наплавке воздействием магнитных полей // Там же. — 1994. — № 9. — С. 28–31.
- Размышляев А. Д., Маевский В. Р. Влияние управляющих магнитных полей на геометрические размеры шва при дуговой сварке под флюсом // Там же. — 1996. — № 2. — С. 17–19.
- Размышляев А. Д. Влияние магнитного поля на размеры зоны проплавления под флюсом // Автомат. сварка. — 1996. — № 8. — С. 25–27, 30.
- Сварка с электромагнитным перемешиванием / В. П. Черных, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брисман и др. — Киев: Техника, 1983. — 127 с.
- Тозони О. В. Метод вторичных источников в электротехнике. — М.: Энергия, 1975. — 296 с.
- Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. — М.: Высш. шк., 1986. — 273 с.

Поступила в редакцию 05.04.2001

УДК 621.791.753.042.5:621.791.791.753.5.048

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ ФЛЮСА ДУГОЙ

С. В. ГУЛАКОВ, д-р техн. наук, **Б. И. НОСОВСКИЙ**, канд. техн. наук, **И. В. ТАРАСЕНКО, И. С. ПСАРЕВА**, инженеры
(Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Проанализированы представления о плавлении флюса при электродуговой сварке тепловым излучением столба дуги. Экспериментально установлено, что основное тепловое воздействие осуществляется формирующимся в горящей дуге факелом. Одновременно наблюдается и его силовое воздействие, проявляющееся формированием в шлаке потоков, которые переносят тепло от факела к периферийным зонам.

Ключевые слова: дуговая сварка, столб и факел дуги, плавление флюса, сварочная ванна

В настоящее время дуговая сварка под флюсом является одним из наиболее распространенных (в промышленном производстве и ремонте) технологических процессов соединения конструктивных элементов и нанесения покрытий. При этом качество сварных соединений в значительной мере определяется условиями и характером плавления флюса.

Существующая более пятидесяти лет теория плавления флюса [1] основывается на предположении об основном энергетическом вкладе в этот процесс излучения столба дуги. Тогда же был отмечен ряд несоответствий между теоретическими предпосылками и практикой. В частности, наблюдается отсутствие связи между температурой столба дуги и относительной массой шлака, в то время, как известно, что теплоотдача излучением пропорциональна четвертой степени температуры излучения. В литературе были опубликованы данные о том, что увеличение сварочного тока с 300 до 800 А, повышающее температуру столба дуги на 750 °С, приводит не к возрастанию, а значительному уменьшению относительной массы шлака. Рост напряжения дуги, практически не влияющий на ее температуру, вызывает существенное приращение эффективности плавления флюса. Позднее была показана роль в этом процессе металла сварочной ванны [2]. Дискуссия о характере и физике плавления флюса продолжается до сих пор [3, 4], что свидетельствует об актуальности этой темы и ее недостаточной изученности.

Следует отметить, что на плавление флюса влияют несколько компонентов, сопутствующих процессу дуговой сварки: дуга; нагретый и расплавленный электродный и основной металлы; протекающий через жидкий шлак ток шунтирования. В предлагаемой работе сделана попытка определить роль дуги в плавлении флюса и оценить вклад от-

дельных ее составляющих. Первое возможно при условии исключения из этого процесса сварочной ванны. В связи с этим проведены эксперименты по плавлению флюса АН-60 косвенной дугой, горящей между неплавящимися графитовыми электродами диаметром 8 мм. Питание дуги проводили от сварочного выпрямителя ВДУ-1201 на режиме с жесткой вольт-амперной характеристикой. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 1. При возбуждении дуги ($U_d = 30 \dots 31$ В, $I_d = 120 \dots 150$ А) между электродами 1 и 2 было отмечено наличие, кроме ее столба (ядра) 3, также факела 4, протяженность которого составляла 25...30 мм при длине столба дуги, на порядок меньшей.

Разделение дуги на ядро и факел описано в работах [5, 6], где показано, что скорости потоков в ядре на один порядок выше, чем в факеле, а сам факел более подвижен, чем ядро. При этом оба они располагались между электродами. В проведенных авторами экспериментах при горении дуги между графитовыми электродами факел не совпадал с ее ядром, а исходил из катодной области в пространство (рис. 1). Фотография дуги, сделанная через темное стекло, подтверждает присутствие такого факела (рис. 2).

Для оценки природы факела было выполнено его электрическое зондирование. В качестве зондов 5 (рис. 1) использовали никромовую проволоку диаметром 0,8 мм. Измерение распределения потенциала осуществлялось с помощью вольтметров $PV_1 \dots PV_3$. Было установлено, что разность потенциалов вдоль длины факела $U_{PV_1} = 0$, между факелом и анодом $U_{PV_2} = 25 \dots 26$ В, а между факелом

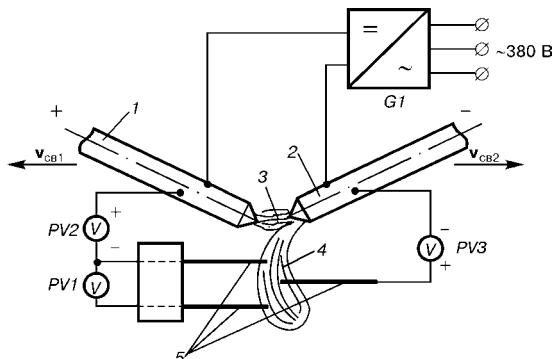


Рис. 1. Схема зондирования электрической дуги постоянного тока, горящей между графитовыми электродами (обозначения см. в тексте)

Носовский Борис Иванович — доцент кафедры оборудования и технологии сварочного производства.

Тарасенко Ирина Викторовна — выпускница ПГТУ 1996 г., аспирантка кафедры оборудования и технологии сварочного производства.

Псарева Ирина Сергеевна — выпускница ПГТУ 1994 г., аспирантка кафедры оборудования и технологии сварочного производства.

© С. В. Гулаков, Б. И. Носовский, И. В. Тарасенко, И. С. Псарева, 2001

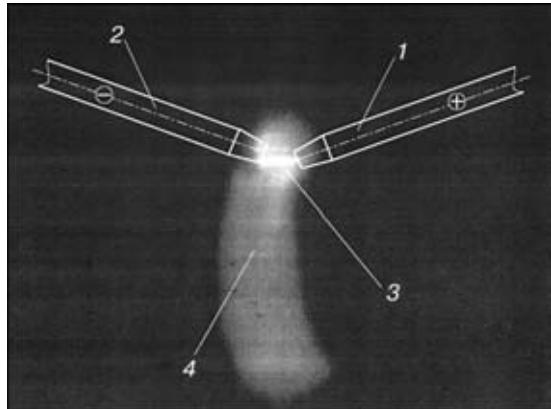


Рис. 2. Электрическая дуга, горящая между графитовыми электродами (обозначения те же, что и на рис. 1)

и катодом $U_{PV3} \approx 6$ В. При изменении напряжения на дуге от 30 до 50 В указанное катодное напряжение колебалось в диапазоне 6...8 В. Вероятно, напряжение U_{PV3} соответствует катодному падению напряжения.

Если такой факел существует при дуговой сварке под слоем флюса и имеет достаточный запас энергии, то он также может участвовать в плавлении флюса. Наличие при дуговой сварке факела, прорывающегося через флюс, в хвостовой части сварочной ванны отмечено в работах [7, 8].

Для оценки энергетических характеристик факела дуги проведен следующий эксперимент. Медную пластину 1 (рис. 3) массой 176,6 г и размерами $9,5 \times 30 \times 68$ мм, расположенную в металлическом кожухе 2 и теплоизолированную от него и окружающей среды с помощью асбестовой прослойки 3, помещали на фиксированный отрезок времени (5...6 с) под факел дуги 4 на расстоянии примерно 5 мм от ее ядра 5. Энергетические параметры дуги были следующими: $U_d = 30$ В, $I_d = 100$ А. При этом факел 4 касался пластины 1. По прошествии этого отрезка времени пластина быстро выводили из-под факела и накрывали сверху теплоизоляционной крышкой. Температуру после выравнивания по всему объему пластины фиксировали с помощью термопары 6 и прибора 7.

Теплоемкость вещества описывается выражением [9] $c = Q/(M)\Delta T$, где Q — количество тепла, кДж; M — масса нагреваемого тела, кг; ΔT — изменение температуры нагреваемого тела, К. Зная, что для меди $c = 0,39$ Дж/(кг·К), можно рассчитать количество тепла, затрачиваемого на увеличе-

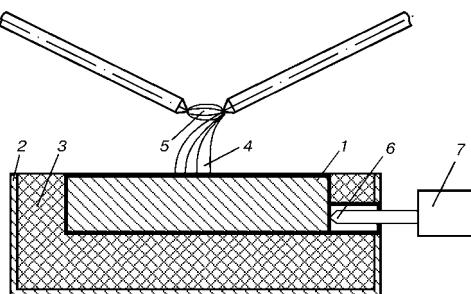


Рис. 3. Схема измерения энергетических характеристик факела (обозначения см. в тексте)

ние температуры медной пластины, в проведенных экспериментах оно составило 4,0...4,2 кДж. При электрической мощности дуги, равной 3 кВт, и времени горения 5...6 с количество выделенной в ней энергии составило 15...18 кДж. Таким образом, сконцентрированная в факеле энергия составляет примерно 20...25 % затраченной при горении дуги, что свидетельствует о достаточно высокой тепловой эффективности этой составляющей дугового процесса.

При горении дуги над флюсом его нагрев обусловлен излучением дуги и ее факела. Под слоем флюса к этим факторам добавляется непосредственное воздействие на флюс столба (ядра) дуги.

Для определения непосредственного влияния на флюс ядра и факела дуги выполнены эксперименты по схемам, приведенным на рис. 4. Дугу 1 зажигали над флюсом 2 (рис. 4, а) и касались факелом 3 его поверхности при неподвижном источнике тепла. При этом расстояние H от поверхности флюса до ядра дуги составляло 3 мм. Факел интенсивно расплавлял флюс, осуществляя на жидкый шлак также и силовое воздействие. В шлаковой ванне под этим воздействием отмечено формирование потоков, которые, увлекая с периферии новые порции флюса, транспортировали их к центру, а также вглубь расплавленной области шлака. Таким образом, образующиеся при сварке потоки не только транспортируют тепло, но и перемещают флюс, вовлекая новые его порции в реакционную зону и интенсифицируя его расплавление.

Последующие эксперименты по расплавлению флюса производили с движущейся дугой. Скорость ее перемещения относительно флюса составляла 30 м/ч, а вектор скорости перемещения (кроме отдельно оговоренных случаев) был направлен по нормали к плоскости чертежа (рис. 4). В процессе экспериментов изменяли расстояние H от поверхности флюса до дуги при расположении дуги над его поверхностью и под флюсом. Длительность перемещения (горения) дуги во всех опытах составляла 10 с. По окончании опыта застывший после расплавления шлак взвешивали. Результаты экспериментов приведены на рис. 5, из которого следует, что при расположении дуги над флюсом, т. е. при положи-

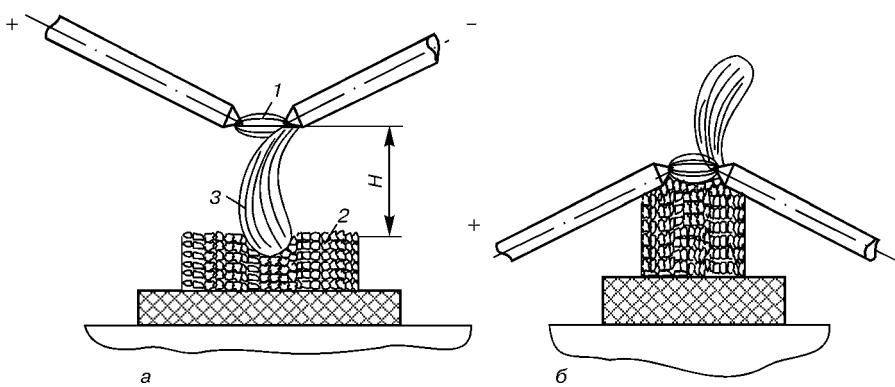


Рис. 4. Схемы плавления флюса дугой (обозначения см. в тексте)

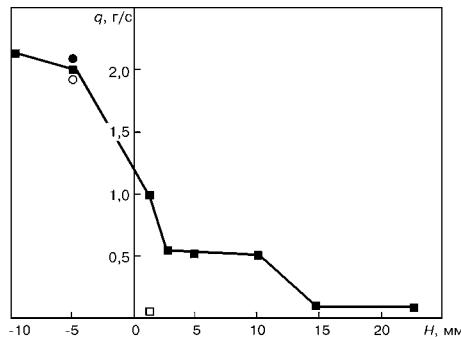


Рис. 5. Изменение интенсивности плавления флюса дугой

тельных значениях величины H с изменением последней характер его плавления факелом 3 (см. рис. 4, а) является нелинейным. В непосредственной близости дуги от флюса интенсивность его плавления q максимальна и быстро уменьшается с ростом расстояния H . При этом застывающий шлак формируется в виде непрерывного валика. При изменении H от 2,5 до 10,0 мм интенсивность плавления флюса, снизившись в два раза по сравнению с предыдущим участком, стабилизируется на уровне 0,5 г/с. Застывающий шлак формируется в виде прерывающегося валика, состоящего из длинномерных фрагментов. При дальнейшем увеличении расстояния H интенсивность плавления флюса опять резко снижается, а затем остается постоянной в диапазоне 15...22 мм. Шлак при этом формируется из отдельных застывших фрагментов.

При помещении дуги под слой флюса (отрицательные значения величины H на рис. 5) в его плавлении участвуют в максимальной степени все энергетические факторы дуги. Соответственно в этом случае возрастает и интенсивность расплавления q , увеличиваясь практически в два раза по сравнению со случаем перемещения дуги над флюсом в непосредственной близости от его поверхности. Шлак при этом формируется в виде сплошного валика.

Выделить энергетическую составляющую нагрева флюса, связанную с излучением дуги, можно при перемещении последней над флюсом в соответствии с рис. 4, б. При этом факел дуги направлен вверх и в нагреве флюса практически не участвует. Реализация такого опыта показала, что излучением дуги флюс практически не плавится (на рис. 5 это значение q обозначено светлым квадратом). Оплавляются лишь отдельные зерна, попавшие, вероятно, непосредственно в зону столба дуги.

В работе [10] представлена модель плавления флюса, заключающаяся во внедрении в него столба дуги при движении сварочного аппарата со скоростью сварки. При этом происходит «прокачка» флюса через дугу и его плавление. Выявить роль этого фактора в плавлении флюса можно при уменьшении интенсивности «прокачки» через ядро дуги. Для этого при горении дуги под флюсом обеспечили ее перемещение в направлении векторов $\mathbf{v}_{\text{св}1}$ и $\mathbf{v}_{\text{св}2}$ (см. рис. 1). Движущийся перед дугой графитовый

электрод (анод в первом случае и катод во втором) раздвигает флюс, экранируя ядро дуги от непосредственного попадания в эту зону новых порций флюса. Результаты экспериментов приведены на рис. 5 кружками (светлые — первый случай, темные — второй). Из него видно, что интенсивность расплавления флюса практически не изменилась. Причиной этого может служить меньшая, чем у факела, поверхность ядра дуги, которая при перемещении дуги во флюсе может взаимодействовать с ним. Поэтому и вклад ядра дуги в плавление флюса мал.

В реальных условиях дуговой сварки под слоем флюса длина столба дуги, рассчитанная с использованием данных о падении напряжения в приэлектродных областях и его распределении в столбе дуги [11] для $U_d = 30\dots32$ В и плавленых флюсов АН-348А, ОСЦ-45, составляет всего 1,5...2,5 мм. При такой длине дуги и диаметре проволочного электрода 4...5 мм вклад излучения столба дуги в плавление флюса и «прокачки» через него флюса не может быть существенным.

Выводы

1. Влияние излучения столба дуги в плавлении флюса несущественно.

2. В дуге, горящей между графитовыми электродами, формируется факел, энергетические возможности которого достаточны для интенсивного плавления флюса.

3. Интенсивность плавления флюса определяется не только термическим, но и силовым воздействием факела, который обеспечивает формирование в шлаке потоков, транспортирующих тепло от источника энергии к периферийным зонам.

1. Кирдо И. В. Тепловой баланс сварки под флюсом // Сб. тр. по автоматической сварке под флюсом. — Киев: Изд-во АН УССР, 1948. — Т. 1. — С. 95–128.
2. Гулаков С. В., Носовский Б. И., Темирбек О. Д. Роль теплоты металла сварочной ванны в плавлении флюса // Автомат. сварка. — 1984. — № 12. — С. 2–4.
3. Кузьменко В. Г. Особенности плавления и отвердевания флюса при дуговой сварке // Свароч. пр-во. — 1999. — № 10. — С. 16–22.
4. Бадьянов Б. Н. О новой схеме процесса дуговой сварки под флюсом // Там же. — № 11. — С. 8–11.
5. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма: Пер. с нем. — М.: Изд-во иностр. лит., 1961. — 182 с.
6. Гаген Ю. Г., Таран В. Д. Сварка магнитоуправляемой дугой. — М.: Машиностроение, 1970. — 160 с.
7. Щетинина В. И., Лещинский Л. К., Серенко А. Н. Движение жидкого металла в сварочной ванне // Свароч. пр-во. — 1988. — № 4. — С. 31–33.
8. Щетинина В. И., Лещинский Л. К., Ермолов В. П. Влияние скорости сварки комбинированным электродом на перемещение дуги // Там же. — 1987. — № 6. — С. 38–40.
9. Рыкалев Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машиностроение, 1951. — 196 с.
10. Кузьменко В. Г. О сплошности шлаковой оболочки при сварке под флюсом // Автомат. сварка. — 1998. — № 3. — С. 14–19.
11. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга. — М.: Машиностроение, 1970. — 336 с.

Concepts of melting of a flux in electric-arc welding under the effect of the arc column radiation have been analysed. It has been experimentally found that the main heat effect is provided by the plume formed in the burning arc. The latter provides a simultaneous force effect showing up in formation of slag flows which transfer heat from the plume to peripheral zones.

Поступила в редакцию 14.03.2001

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ЛИНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ АНТИКОРРОЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТРУБЧАТЫЕ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ И ТРУБЫ

Е. В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ, канд. техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, Мариуполь)

Описана разработанная автоматизированная линия газотермического напыления антикоррозионных покрытий на трубчатые металлоконструкции и трубы. Оригинальные технические решения, заложенные в конструкции линии, позволяют практически решать вопросы автоматизированного нанесения электрометаллизационных покрытий при высоком качестве выпускаемых изделий.

Ключевые слова: автоматизированная линия, электродуговая металлизация, антикоррозионные покрытия

Борьба с коррозией металла — одна из актуальных проблем современного производства. Отсутствие достаточно стойких материалов или эффективных средств защиты от коррозии зачастую оказывается существенным препятствием на пути научно-технического прогресса, нанося тем самым невосполнимый ущерб состоянию и темпам развития экономики.

В последние годы наметилась тенденция широкого использования газотермических покрытий как эффективного средства защиты металлов от коррозионных разрушений. Нанесение газотермических покрытий на поверхность металлоконструкций, трубопроводов, инженерных сооружений, деталей машин и механизмов позволяет обеспечивать защиту от коррозии на срок до 20...30 лет.

В Украине в настоящее время широкое распространение получает электродуговой способ нанесения покрытия, заключающийся в расплавлении электродного металла теплом электрической дуги, его диспергировании высокоскоростным газовым потоком и закреплении на подготовленной поверхности распыленных частиц.

Основные преимущества данного способа состоят в высокой производительности и экономичности наряду с более высоким качеством структуры напыленного покрытия (с позиции стойкости к коррозионным воздействиям), простоте и технологичности применяемого оборудования.

Однако сдерживающим фактором более широкой популяризации способа электрометаллизации является отсутствие средств комплексной механизации и автоматизации, позволяющих значительно повысить производительность нанесения покрытий, снизить затраты живого труда и себестоимость покрытия. Очевидно, что разработка и внедрение таких производств представляет определенный практический интерес и имеет важное народнохозяйственное значение.

В ПГТУ разработана автоматизированная линия [1], предназначенная для нанесения антикорро-

Войцеховский Евгений Викторович — выпускник Ждановского металлург. ин-та 1971 г., доцент кафедры оборудования и технологий сварочного производства.

© Е. В. Войцеховский, 2001

зионных алюминиевых и цинковых покрытий на трубчатые металлоконструкции и трубы диаметром от 50 до 90 мм, производительность которой составляет 3000 м в сутки при трехсменном режиме работы. Линия (рисунок) обеспечивает нанесение покрытия толщиной 0,2...0,3 мм в автоматизированном режиме. Она состоит из стеллажа загрузки 3 с магазином-накопителем поштучной выдачи трубных заготовок 5, блока рольгантов 6, дробеструйной 7 и электрометаллизационной 9 камер проходного типа, механизма сброса напыленных труб 14 и приемника-накопителя готовой продукции 13. Работа линии организована следующим образом. Пакет труб укладывают на стеллаж загрузки, откуда по наклонному склизу с помощью рычажного устройства, приводимого в действие пневмоцилиндрами, трубы поштучно передаются на транспортный рольганг, являющийся отличительной особенностью данной линии.

В известных установках заложены различные принципы перемещения напыляемого изделия, которые можно разделить на три варианта. В первом использован принцип токарного станка — единичная трубная заготовка устанавливается во вращатель, а аппарат-металлизатор, размещенный на суппорте, перемещается вдоль напыляемого изделия. Очевидны недостатки такой схемы, заключающиеся в отсутствии средств комплексной механизации

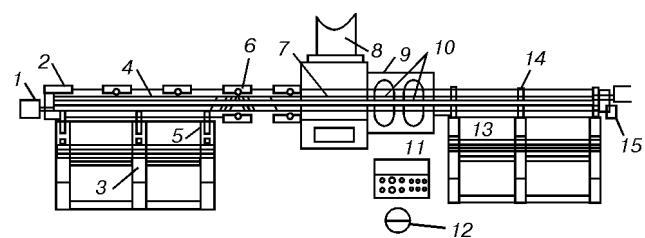


Схема автоматизированной линии газотермического напыления антикоррозионных покрытий на трубчатые металлоконструкции и трубы: 1 — привод транспортного рольганга; 2 — боковая плавающая опора; 3 — стеллаж загрузки; 4 — напыляемое изделие; 5 — магазин-накопитель поштучной выдачи изделий; 6 — двуручевой блок рольгантов; 7 — камера дробеструйной очистки; 8 — воздухоочистительное оборудование; 9 — камера электрометаллизации; 10 — электрометаллизаторы; 11 — пульт управления; 12 — рабочее место оператора; 13 — приемник-накопитель готовой продукции; 14 — механизм сброса напыленных изделий; 15 — конечный выключатель привода рольганга

и, как следствие, в значительной трудоемкости и низкой производительности процесса. Во втором варианте транспортирующим устройством напыляемого изделия является толкающая тележка-вращатель. Как ее конструктивное исполнение, так и привод подачи довольно сложны и нетехнологичны, а сам процесс установки трубной заготовки трудоемок. И, наконец, третий вариант, представленный в виде поточной линии, хотя и оснащен приводными роликоопорами, однако предполагает одноручьевую поток напыляемых труб, что сдерживает повышение производительности выпуска продукции.

В разработанной автоматизированной линии учтены все отмеченные недостатки и реализованы оригинальные подходы к их устранению.

Основным рабочим органом транспортной системы линии является блок рольгангов, позволяющих обрабатывать одновременно две трубы, т. е. применена двуручьевая схема подачи, что резко повысило производительность линии.

Технические характеристики линии

Производительность в смену, м	1000
Толщина покрытия, мм	0,2...0,3
Режим работы	трехсменный
Численность обслуживающего персонала, чел.	3
Длина труб, м	6...12
Скорость подачи трубы, м/мин	0,47 ... 1,8
Габариты, м	25×10×10

Блок рольгангов состоит из системы роликоопор (ведущих и ведомых), придающих напыляемым изделиям поступательно-вращательное движение, а приводной механизм позволяет регулировать скорость движения труб в широком диапазоне.

Определенный интерес представляет впервые примененный на линиях такого назначения блок синхронизации движения труб, практически исключающий разбалансированную подачу обоих изделий. Перемещаясь по линии, трубы поступают в камеру дробеструйной обработки, где осуществляется очистка их наружной поверхности от загрязнений, слоев окалины и ржавчины, оксидных пленок, а также придание напыляемой поверхности необходимой шероховатости. В качестве абразивного материала используется чугунная дробь диаметром 0,8...1,6 мм.

После очистки трубы подаются в камеру электрометаллизации, где на их поверхность напыляется антикоррозионное покрытие (цинковое или алюминиевое) толщиной 0,2...0,3 мм. Камера об-

рудована двумя модернизированными высокопроизводительными электродуговыми металлизаторами. Суть модернизации состоит в использовании новой распылительной головки [2], оснащенной, помимо центрального, двумя дополнительными соплами. За счет сверхзвуковых струй, образующихся в них, формируется газовый поток, газодинамические характеристики которого обеспечивают в точке контакта электродов зону пониженного давления, в результате максимального использования энергии набегающего потока и снижения его турбулентности повышается эффективность эвакуации расплавленного электродного металла. Расплавленный металл под действием возрастающей аэродинамической силы интенсивно удаляется, улучшая теплопередачу от активных пятен дуги к электродам, что способствует повышению производительности процесса металлизации. Таким образом, гранулометрический спектр частиц в металло воздушной струе становится более однородным и мелкодисперсным (~ 50...70 мкм), благодаря чему повышается прочность сцепления и снижается пористость напыленного покрытия. Кроме того, существенно возрастает коэффициент использования электродного металла.

Напыленные трубы с помощью устройства сброса, оснащенного пневмоприводом, снимаются с транспортного рольганга и передаются в накопитель готовой продукции.

Улавливание металлической пыли в процессе очистки и металлизации производят фильтрами мокрой очистки. Управление оборудованием и контроль за его работой осуществляют с пульта управления в автоматическом режиме.

В процессе разработки линии впервые в отечественной практике решены вопросы автоматизированного нанесения металлизационных покрытий на трубчатые металлоконструкции и трубы. Достигнута существенная экономия производственных площадей в сравнении с лакокрасочными и гальваническими производствами по антикоррозионной защите. Получаемая продукция в полной мере отвечает требованиям стандартов на соответствующие изделия.

1. Пат. 29796A Украина, МПК B 05B 13/02. Автоматическая линия напыления покрытий на трубчатые изделия / Е. В. Войцеховский. — Опубл. 15.11.2000, Бюл. № 6.
2. Пат. 551 Украина, МПК B 05B 7/22. Распыляющая головка электрометаллизатора. / Е. В. Войцеховский. — Опубл. 15.09.2000, Бюл. № 4.

The new automated line for thermal spraying of anti-corrosion coatings onto tubular metal structures and pipes is described. Ingenious technical solutions underlying the line design make it possible to solve almost all problems associated with automated deposition of electric-metallization coatings, providing the high-quality products.

Поступила в редакцию 21.05.2001

ПАРАМЕТРЫ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТОРЦА ПРОВОЛОЧНОГО ЭЛЕКТРОДА

М. Б. НОСОВСКИЙ, инж. (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Предложен механизм импульсной подачи проволоки для условий механизированной сварки. Проведен анализ передаточного отношения механизма импульсной подачи, позволяющий определять его оптимальные конструктивные параметры.

Ключевые слова: механизм импульсной подачи, анализ, амплитуда, продольные, поперечные перемещения

Основными недостатками дуговой сварки плавящимся электродом в углекислом газе являются повышенное разбрзгивание электродного металла и неудовлетворительное формирование швов. В работах [1–4] установлена возможность существенного расширения технологических характеристик дуговой сварки и наплавки при использовании механизмов импульсной подачи электродной проволоки. Однако наряду с перспективностью указанного способа отмечается низкая надежность механизмов импульсной подачи электрода, которая объясняется наличием в их конструкции односторонних захватов [3]. Этого недостатка лишен подающий механизм, выполненный на основе квазиволнового преобразователя [4].

При механизированной сварке происходит значительное искажение параметров генерируемых импульсов в гибком направляющем канале. Снижение амплитуды импульсов подачи составляет 30...35 % ее значения на входе в направляющий канал [5]. В связи с изложенным выше очевидна необходимость размещения механизма преобразования продольных колебаний как можно ближе к торцу электрода для сокращения длины направляющего канала сварочной горелки. Это легко осуществить при автоматической сварке, когда подающий механизм расположен непосредственно перед сварочной горелкой. При механизированной сварке механизм продольных колебаний размещен в держателе горелки полуавтомата, что значительно увеличивает его массу и ухудшает условия работы сварщика.

На основании известных механизмов импульсной подачи электродной проволоки разработано усовершенствованное устройство [6], которое преобразует поперечные колебания электрода в продольные. Его конструктивные особенности позволяют в широких пределах варьировать геометрические параметры, а следовательно, и массу подающего механизма в зависимости от требуемой мощности электродвигателя. Для оптимизации указанных параметров выполнен анализ условий работы меха-

низма, преобразующего поперечные колебания электрода в продольные.

В рассматриваемом варианте функции звеньев механизма импульсной подачи электродной проволоки выполняет отрезок электродной проволоки, расположенный между подающим роликом и скользящим токоподводом (рис. 1). Поперечные перемещения центральной части отрезка электрода осуществляются по синусоидальному закону с регулируемой амплитудой (рис. 2). Зависимость продольных перемещений торца электрода от амплитуды

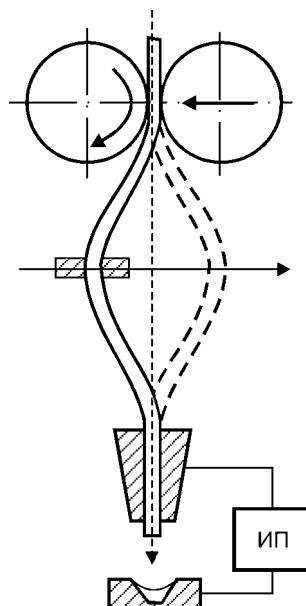


Рис. 1. Схема механизма преобразования поперечных колебаний электрода в продольные (ИП — источник питания)

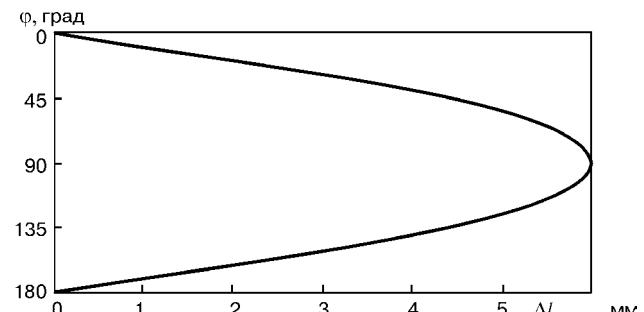


Рис. 2. Кривая поперечных колебаний центральной части отрезка электрода (φ — угол поворота кулочка; $\Delta l_{\text{попер}}$ — перемещение поперечных колебаний электрода)

Носовский Михаил Борисович — выпускник Ждановского металлург. ин-та 1977 г., младший научный сотрудник кафедры оборудования и технологии сварочного производства.

© М. Б. Носовский, 2001

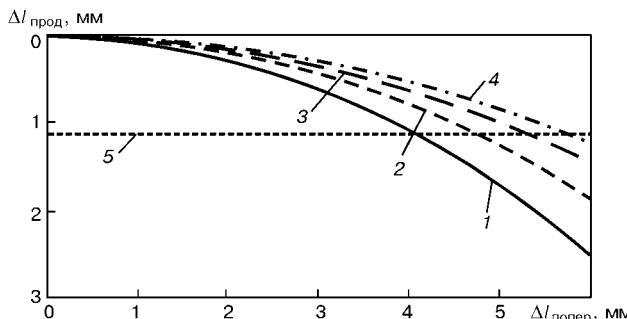


Рис. 3. Зависимость продольных $\Delta l_{\text{прод}}$ перемещений торца электрода от амплитуды его поперечных $\Delta l_{\text{попер}}$ перемещений при различных радиусах звеньев: 1–4 — радиус звена соответственно 15, 20, 25 и 30 мм; 5 — усредненная длина дуги

его поперечных перемещений при различных (15, 20, 25 и 30 мм) радиусах звеньев показана на рис. 3. Из приведенных данных следует, что с уменьшением радиуса звеньев передаточное отношение механизмов преобразования продольных / поперечных $\Delta l_{\text{прод}} / \Delta l_{\text{попер}}$ колебаний увеличивается. Однако чрезмерное уменьшение радиусов звеньев может привести к остаточной деформации сварочной проволоки. С увеличением амплитуды поперечных перемещений передаточное отношение возрастает. Это означает, что поперечные перемещения с малыми амплитудами малоэффективны. Так, при амплитуде 4 мм продольное перемещение составляет 1,2 мм. При изменении амплитуды от 4,0 до 5,5 мм оно остается по-прежнему равным 1,2 мм, так как передаточное отношение здесь близко к единице — 1,2 мм / 1,5 мм.

Для повышения надежности механизма преобразования поперечных колебаний в продольные следует использовать амплитуду поперечных перемещений от 4,0 до 5,5 мм. При таких условиях торец электрода колеблется по синусоидальному закону (рис. 4) с удвоенной (100 Гц) частотой. Чтобы торец электрода более резко приближался к сварочной ванне, целесообразно применять кулачковый механизм с амплитудой продольных колеба-

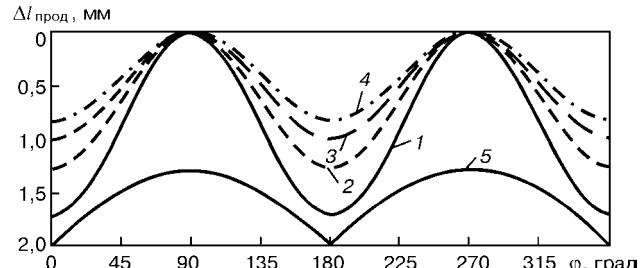


Рис. 4. Кривые продольных перемещений торца электрода в зависимости от радиуса звена и угла поворота кулачка: 1–4 — см. обозначения рис. 3; 5 — напряжение источника питания

ний 1,5 мм. Для обеспечения скорости подачи 100 имп / с при использовании синхронного двигателя с частотой вращения 3000 об / мин необходимо по длине окружности расположить два кулачка. Момент импульсной подачи проволоки может синхронизироваться с моментом провала напряжения источники питания двухполупериодного однофазного сварочного выпрямителя.

1. Управление процессом дуговой сварки путем программирования скорости подачи электродной проволоки // Б. Е. Патон, Н. М. Воропай, Б. Н. Бучинский и др. // Автомат. сварка. — 1977. — № 1. — С. 1–5, 15.
2. Воропай Н. М., Бенидзе З. Д., Бучинский В. Н. Особенности процесса сварки в CO₂ с импульсной подачей электродной проволоки // Там же. — 1979. — № 2. — С. 23–26, 36.
3. Опыт эксплуатации автомата с электромагнитным механизмом подачи проволоки // В. Н. Бучинский, З. Д. Бенидзе, А. В. Котон // Там же. — 1989. — № 11. — С. 44–45.
4. Опыт применения дуговой наплавки с импульсной подачей электродной проволоки // В. А. Лебедев, А. Е. Коротынский, В. М. Мозок, В. Г. Пичак // Там же. — 2001. — № 2. — С. 37–41.
5. Лебедев В. А. Влияние направляющего канала сварочного полуавтомата на параметры импульсной подачи электродной проволоки // Там же. — 1999. — № 2. — С. 45–48.
6. Пат. 24440A Украина, МКИ⁴ B 23 K 9/12. Способ дуговой сварки плавящимся электродом // Б. И. Носовский, М. Б. Носовский. — № 97041923; Заяв. 22.04.97; Опубл. 11.12.98.

The pulse wire feed mechanism is suggested for mechanized welding conditions. Analysis of a gear ratio of the pulse feed mechanism has been conducted, allowing evaluation of its optimal design parameters.

Поступила в редакцию 06.04.2001

МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ НАПЛАВЛЕННОГО ПОРОШКОВОЙ ЛЕНТОЙ МЕТАЛЛА

В. Д. КАССОВ, канд. техн. наук (Донбас. гос. машиностроит. акад., г. Краматорск)

Рассмотрены условия дуговой наплавки лентой, при которых обеспечиваются минимальные отходы наплавленного металла в результате последующей механической обработки.

Ключевые слова: наплавка, механическая обработка, минимальные отходы, параметры валика, порошковая лента

Одним из основных условий оптимального технологического процесса дуговой наплавки порошковой лентой является выбор геометрии наплавки, при которой получают минимум отходов при последующей механической обработке.

Цель настоящей работы — найти условия, при которых отходы наплавленного металла после чистовой проточки наплавленного тела будут минимальными (а значит, площадь сечения усиления валика после проточки должна быть максимальной). Из макрошлифов валиков, наплавленных порошковой лентой, видно, что форму сечения усиления наплавленного валика можно принять в виде прямоугольника, скругленного дугой окружности радиусом h_1 (высота усиления валика) (рис. 1), а форму сечения проплавления основного металла — в виде параболы, построенной по уравнению

$$y = \frac{4h_2}{b^2} x^2 - h_2,$$

где h_2 — глубина проплавления; b — ширина наплавленного валика.

Найдем длину отрезка MC , который и будет составлять толщину наплавленного слоя после проточки. Обозначим $H/2 - (b/2 - h_1)$ через ωh_1 . Тогда коэффициент

$$\omega = \frac{H - b + 2h_1}{2h_1}, \quad (1)$$

где H — шаг наплавки.

Имеем

$$MC = \sqrt{h_1^2 - (\omega h_1)^2} = h_1 \sqrt{1 - \omega^2}. \quad (2)$$

Обозначим относительный шаг наплавки H/b через α , а величину h_1/b через p . Тогда коэффициент ω можно выразить через α и p следующим образом:

$$\omega = \frac{b}{2h_1} \left(\frac{H}{b} - 1 + 2 \frac{h_1}{b} \right) = \frac{\alpha + 2p - 1}{2p}, \quad (3)$$

Кассов Валерий Дмитриевич — докторант ПГТУ, доцент кафедры сварочного производства Донбас. гос. машиностроит. академии.

© В. Д. Кассов, 2001

а площадь усиления валика после проточки будет равна

$$F_m = 2F_{OPMC} = Hh_1 \sqrt{1 - \omega^2} = h_1 b \alpha \sqrt{1 - \omega^2} = b^2 p \alpha \sqrt{1 - \omega^2}. \quad (4)$$

Если проточку наплавленного валика не выполнять, то, как следует из рис. 1 и формулы (4), площадь усиления валика будет максимальной при $\omega = 0$ и равной $b^2 p \alpha$. Из (3) следует, что

$$\alpha = 1 - 2p, \quad (5)$$

а площадь усиления наплавленного валика составляет

$$F_m = b^2 p (1 - 2p). \quad (6)$$

Для исследования на максимум функции (6) найдем ее производную по p и приравняв ее нулю, получим

$$(p - 2p')' = 1 - 4p = 0; \quad p = 0,25.$$

Таким образом, если проточку наплавленного валика не выполнять, то наплавку порошковой лентой необходимо вести на режимах, обеспечивающих $p = h_1/b = 0,25$. При этом $\alpha = 0,5$.

На практике значение $p = 0,25$ обычно не достигается. Но если не выполнять проточку наплавленного валика, то наплавку рекомендуется вести и в этом случае с относительным шагом α , значения которого выбираем по формуле (5).

Для получения максимальной площади сечения усиления валика после чистовой проточки (в случае, если механическая обработка производится) исследуем функцию (4) на максимум по переменной величине α . Для этого найдем ее производную с учетом того, что параметр ω также является функцией α , тогда

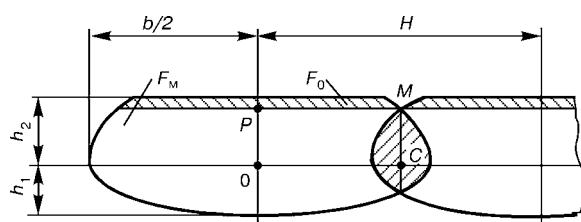


Рис. 1. К расчету параметров валика, наплавленного порошковой лентой (см. обозначения в тексте)

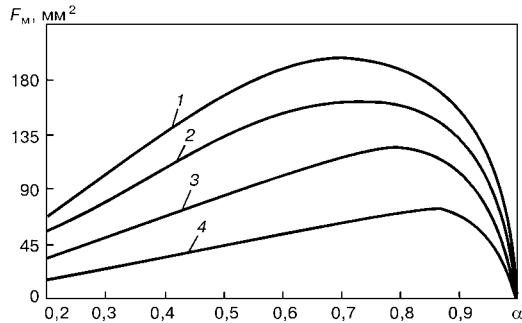


Рис. 2. Зависимость площади F_m от α и p при $b = 30$ мм: 1 — $p = 0,4$; 2 — $0,3$; 3 — $0,90$; 4 — $0,1$

$$\begin{aligned} (\alpha \sqrt{1-\omega^2})' &= \sqrt{1-\omega^2} + \alpha (\sqrt{1-\omega^2})' = \\ &= \sqrt{1-\omega^2} + \frac{\alpha}{2\sqrt{1-\omega^2}} (-2\omega) \omega' = \\ &= \sqrt{1-\omega^2} - \frac{\alpha \omega \omega'}{\sqrt{1-\omega^2}} = \frac{1-\omega^2-\alpha \omega \omega'}{\sqrt{1-\omega^2}}. \end{aligned}$$

В итоге получим уравнение

$$1-\omega^2-\alpha \omega \omega'=0.$$

Подставив вместо ω выражение (3), имеем

$$1 - \left(\frac{\alpha + 2p - 1}{2p} \right)^2 - \alpha \frac{\alpha + 2p - 1}{2p} \frac{1}{2p} = 0.$$

После преобразования этого выражения получим квадратное уравнение

$$2\alpha^2 + (6p - 3)\alpha + (1 - 4p) = 0,$$

решив которое, найдем

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{-(6p - 3) \pm \sqrt{(6p - 3)^2 - 4 \cdot 2(1 - 4p)}}{4} = \\ &= \frac{3 - 6p \pm \sqrt{36p^2 - 4p + 1}}{4}. \end{aligned}$$

Анализ данного решения показал, что необходимо взять больший корень. Тогда оптимальное значение относительного шага наплавки будет составлять

$$\alpha = 0,75 - 1,5p + 0,25 \sqrt{36p^2 - 4p + 1}. \quad (7)$$

В таблице приведены оптимальные значения шага наплавки α порошковой лентой для двух вариантов: проточка наплавленного металла не выполняется или выполняется.

На рис. 2 показана зависимость площади сечения усиления валика после механической обработки F_m от относительного шага наплавки α и параметра валика p . Видно, что максимальная площадь F_m достигается при значениях α , рассчитанных по формуле (7).

С изменением значений α от 0 до $(1 - 2p)$ площадь F_m возрастает по линейной зависимости в соответствии с формулой $b^2 p \alpha$. При дальнейшем увеличении шага α изменение значений F_m происходит по нелинейной зависимости в соответствии с формулой (4).

Conditions of arc strip surfacing, which provide a minimum discard of the deposited metal as a result of subsequent machining are considered.

Оптимальные значения относительного шага наплавки α

p	Расчет по формуле	
	(5)	(7)
0,05	0,90	0,911
0,10	0,80	0,845
0,15	0,70	0,800
0,20	0,60	0,770
0,25	0,50	0,750
0,30	0,40	0,736
0,35	0,30	0,726
0,40	0,20	0,718

Найдем площадь отходов сечения усиления наплавленного валика после чистовой проточки. На основании рис. 1 имеем

$$\begin{aligned} F_0 &= 2(h_1 - MC)(H/2 - \omega h_1) + 2 \int_0^{h_1} (\sqrt{h_1^2 - x^2} - MC) dx = \\ &= (h_1 H - 2h_1^2 \omega) (1 - \sqrt{1 - \omega^2}) + h_1^2 \arcsin \omega + \\ &\quad + h_1^2 \omega \sqrt{1 - \omega^2} - 2h_1^2 \omega \sqrt{1 - \omega^2}. \end{aligned}$$

Исходя из соотношений $H = b\alpha$ и $h_1 = bp$, получим

$$\begin{aligned} F_0 &= (b^2 \alpha p - 2b^2 p^2 \omega) (1 - \sqrt{1 - \omega^2}) + \\ &\quad + b^2 p^2 (\arcsin \omega - \omega \sqrt{1 - \omega^2}) = \\ &= b^2 p [(\alpha - 2p\omega) (1 - \sqrt{1 - \omega^2}) + \\ &\quad + p(\arcsin \omega - \omega \sqrt{1 - \omega^2})]. \end{aligned} \quad (8)$$

Из (8) видно, что если $\omega = 0$, то $F_0 = 0$, т. е. проточка наплавленного металла в этом случае не производится и отходов металла нет.

Найдем долю оставшегося металла после проточки:

$$\gamma = \frac{F_m}{F_m + F_0}.$$

Имеем

$$\begin{aligned} F_m + F_0 &= b^2 p \alpha \sqrt{1 - \omega^2} + b^2 p [\alpha (1 - \sqrt{1 - \omega^2}) - \\ &\quad - 2p\omega + 2p\omega \sqrt{1 - \omega^2} + p \arcsin \omega - p\omega \sqrt{1 - \omega^2}] = \\ &= b^2 p (\alpha - 2p\omega + p\omega \sqrt{1 - \omega^2} + p \arcsin \omega). \end{aligned}$$

Откуда

$$\gamma = \frac{\alpha \sqrt{1 - \omega^2}}{\alpha + p (\arcsin \omega + \omega \sqrt{1 - \omega^2} - 2\omega)}. \quad (9)$$

Доля оставшегося металла после проточки γ при увеличении относительного шага наплавки α уменьшается. Для больших значений параметра p значение параметра γ меньше.

Таким образом, найденные зависимости параметров наплавленного слоя порошковой ленты позволили установить условия, при которых после механической обработки обеспечивается минимальное получение отходов слоя металла.

Поступила в редакцию 05.04.2001

МАРГАНЕЦСОДЕРЖАЩИЕ НАПЛАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Л. С. МАЛИНОВ, д-р техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь),
В. Л. МАЛИНОВ, канд. техн. наук (ОАО «Азовмаш», г. Мариуполь)

Обобщены результаты работ, выполненных в ПГТУ по созданию наплавочных материалов, которые обеспечивают получение в наплавленном металле метастабильного аустенита, армированного упрочняющими фазами, а также реализацию эффекта самозакалки при нагружении. Последний обусловлен превращением аустенита в мартенсит при нагружении в процессе изнашивания.

Ключевые слова: порошковая лента, наплавленный металл, мартенсит, метастабильный аустенит, износостойкость, карбиды, карбонитриды

Одним из современных перспективных направлений сварочного производства является создание материалов с метастабильной структурой, способных под влиянием внешних воздействий к «самоорганизации» [1]. К таким материалам, получившим название «разумных», «адаптирующихся», можно отнести стали, чугуны и наплавочные материалы на их основе, которые обеспечивают получение в структуре метастабильного аустенита, при эксплуатации претерпевающего мартенситные превращения (эффект самозакалки при нагружении). Идея создания таких сплавов была высказана И. Н. Богачевым и Р. И. Минцем [2] применительно к деталям, подвергшимся кавитационному разрушению. Ими была разработана сталь 30Х10Г10, а отраслевой лабораторией УПИ им. С. М. Кирова — проволока Нп-25Х10ГКЛ, применяемая для наплавки крановых колес, плунжеров гидропрессов, роликов вагонеток и др. Однако такой наплавленный металл трудно обрабатывать резанием из-за малой стабильности аустенита; он имеет недостаточную коррозионную стойкость вследствие сравнительно невысокого содержания хрома, а наплавка для сохранения аустенитной структуры требует специальной технологии. Для улучшения обрабатываемости резанием целесообразно использовать материалы, обеспечивающие в наплавленном металле более низкое содержание углерода ($\leq 0,2\%$) и повышенную стабильность аустенита. При этом увеличения износостойкости достигают армированием аустенита карбидами или карбонитридами элементов IV и V групп Периодической системы Менделеева. В зависимости от условий эксплуатации, а также требований к механическим и служебным свойствам, регулируют уровень стабильности аустенита и количество упрочняющей фазы. Достигается это за счет изменения содержания углерода ($0,08\dots 0,16\%$); азота ($0,05\dots 0,15\%$); карбио- и нитридообразующих

элементов, например ванадия ($0,05\dots 1,0\%$) в сочетании с хромом ($13\dots 14\%$) и марганцем ($10\dots 14\%$). Важной особенностью наплавленного металла такого типа является то, что термообработка, обычно проводимая для снятия внутренних напряжений после наплавки ($600\dots 650^\circ\text{C}$), обеспечивает выделение в аустените наплавленного металла дисперсных фаз, в результате чего он дестабилизируется и претерпевает мартенситные превращения при нагружении в процессе эксплуатации. Изменяя режим термообработки, можно в широких пределах регулировать деформационные мартенситные превращения. Указанным принципом руководствовались при разработке совместно с ОАО «Азовмаш» порошковых лент ПЛ-Нп-15Х13АГ10МФС [3], ПЛ-Нп-25Х14П0Ф [4], ПЛ-Нп-20Г14АФ [5], а с УкрНИИспецсталь — проволоки сплошного сечения Св-14Х14Г12Ф [6]. Исследования, выполненные в работе [7], показали, что в условиях трения скольжения при относительно невысоких скоростях ($0,13 \text{ м/с}$) и отсутствии или небольшом разогреве трущихся поверхностей интенсивное деформационное мартенситное превращение играет существенную роль в повышении износостойкости. В случае испытаний с повышенной скоростью скольжения ($0,98 \text{ м/с}$) интенсивность мартенситного превращения при трении снижается из-за повышения температуры рабочей поверхности. В этих условиях износостойкость наплавленного металла в большей степени определяется способностью к упрочнению самого аустенита. Последняя зависит от содержания углерода, что подтверждают данные табл. 1.

Испытания износостойкости в условиях трения качения (давление 320 МПа , частота вращения роликов $0,98 \text{ м/с}$, проскальзывания — $0,09 \text{ м/с}$) показали, что большим сопротивлением изнашиванию

Таблица 1. Влияние углерода в наплавленном металле типа Х13АГ10МФС на количество мартенсита деформации и относительную износостойкость

Массовая доля углерода, %	$v = 0,13 \text{ м/с}$		$v = 0,98 \text{ м/с}$	
	Количество мартенсита деформации, %	Относительная износостойкость	Количество мартенсита деформации, %	Относительная износостойкость
0,10	28	4,2	10	3,1
0,15	19	3,8	5	4,8
0,20	12	3,3	—	5,5

Малинов Леонид Соломонович — профессор, зав. кафедрой материаловедения.

Малинов Владимир Леонидович — выпускник Мариупольского металлург. ин-та 1989 г., начальник бюро сварки ОАО «Азовмаш».

© Л. С. Малинов, В. Л. Малинов, 2001

характеризуется наплавленный металл с интенсивным деформационным мартенситным превращением. Так, в наплавленном металле 15Х13АГ10МФС при данной схеме испытаний образуется примерно 35 % мартенсита деформации, а в 20Х13АГ10МФС — приблизительно 23 %, относительная износостойкость в первом случае составляет 6,2, во втором — 5,8. В качестве эталона сравнения использовали металл, наплавленный проволокой Св-30ХГСА.

Температура нагрева наплавленного металла при термообработке ($450\ldots650^{\circ}\text{C}$), проводимой для уменьшения внутренних напряжений, неоднозначно влияет на его износостойкость. При испытаниях в условиях трения скольжения (относительно небольшие скорости), а также трения качения установлено, что нагрев на 450°C (1 ч) снижает износостойкость наплавленного металла приблизительно на 30 %, а нагрев на 650°C — повышает ее примерно на 40 % по сравнению с закаленным состоянием. Это обусловлено тем, что в первом случае аустенит стабилизируется по отношению к деформационному мартенситному превращению, а во втором — дестабилизируется в связи с выделением карбидов и карбонитридов. В последнем случае положительную роль играют дисперсные частицы фаз выделения. В условиях трения, не приводящего к значительному разогреву контактирующих поверхностей, предварительная холодная пластическая деформация повышает износостойкость наплавленного металла за счет активизации деформационного мартенситного превращения. Так, после деформации на 10 % износостойкость наплавленного металла 15Х13АГ10МФС увеличилась в два раза. Еще больший эффект дает комбинированная обработка, включающая холодную пластическую деформацию и последующий нагрев, вызывающий дисперсионное упрочнение образовавшегося мартенсита и аустенита. Износостойкость наплавленного металла в этом случае возрастает почти в три раза.

В условиях трения, сопровождающегося значительным повышением температуры (более 450°C), предварительная холодная деформация снижает износостойкость наплавленного металла. Это обусловлено переходом образовавшегося при деформации мартенсита в аустенит, что снижает сопротивление металла пластической деформации. Наплавку разработанными порошковыми лентами сечением 20×4 мм проводят под флюсами АН-348А, ОСЦ-45, АН-60 на следующем режиме: $I_{\text{сп}} = 600\ldots650\text{ A}$, $U_d = 30\ldots32\text{ V}$, $v_{\text{сп}} = 35\text{ м/ч}$. При этом обеспечивается стабильное горение дуги, хорошее формирование наплавленного валика и отделимость шлаковой корки. Указанные материалы предназначены для износостойкой наплавки крановых колес, цапф сталеразливочных ковшей, плунжеров гидропрессов, долговечность которых существенно повышается.

Применение хромомарганцевых наплавочных материалов целесообразно и для некоторых деталей, работающих при температурах $600\ldots700^{\circ}\text{C}$, что зафиксировано при использовании порошковой проволоки ПП-35ЖН, обеспечивающей

получение наплавленного металла типа 10Х13Г12АФСЮР [8].

В табл. 2 приведены сравнительные данные износ- и термостойкости, а также твердости при 20 и 600°C для наплавленного металла 10Х13Г12АФСЮР и 08Х21Н10Г6. Полученные данные свидетельствуют о том, что последний значительно уступает безникелевому [8]. Анализ стойкости валков пилигримовых станов в условиях ОАО «МК им. Ильича», длительное время наплавлявшихся проволокой ПП-35ЖН, показал, что их долговечность возросла в 1,40...1,65 раза по сравнению с валками, наплавленными проволокой Св-08Х21Н10Г6 [8]. Можно полагать, что применение хромомарганцевых наплавочных материалов эффективно для повышения долговечности инструментов горячего деформирования и деталей, работающих в специфических условиях, аналогичных условиям работы валков пилигримовых станов.

Для наплавки деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания, разработаны наплавочные материалы на основе Fe—Mn—Cr—V—C. Их особенностью является получение в структуре наплавленного металла метастабильного аустенита (в ряде случаев наряду с мартенситом), армированного карбидами хрома и ванадия. В них реализуется принцип самозакалки при нагружении. Примером может служить порошковая лента ПЛ-Нп-(300-400)Х(12-15)Г4С2Ф, предназначенная для замены более дорогой ленты ПЛ-АН-101 (300Х28Н3С3Г2).

В работах [9, 10] приведены результаты исследований по созданию хромомарганцевых наплавочных материалов для различных условий ударно-абразивного воздействия, которые характеризуются коэффициентом динамичности K_d [11], определяемым отношением твердости образца из стали 110Г13Л после износа в конкретных условиях изнашивания к его исходной твердости. Данная сталь способна накапливать энергию внешнего воздействия, упрочняясь при этом. Уровень упрочнения позволяет судить об интегральной интенсивности ударно-абразивного воздействия [11]. Исследования были выполнены с использованием метода планирования эксперимента для различных значений K_d в интервале от 1,2 до 3,5. Содержание легирующих элементов в наплавленном металле варьировалось в следующих пределах, %: углерода 1...3, марганца 2...6, хрома 6...12. В ряде случаев дополнительно вводили ванадий.

Показано, что при малых значениях коэффициента динамичности ($K_d = 1,2\ldots1,4$) в наплавленном металле содержание углерода должно составлять 2,0...2,5, марганца 2...3 и хрома примерно 12 %,

2. Свойства металла, наплавленного проволоками ПЛ-Нп 10Х13Г12АФСЮР и Св-08Х21Н10Г6

Тип наплавленного металла	Износ наплавленного металла при 600°C и давлении 15 МПа (время испытания 1 ч), мг	Термостойкость (количество циклов «нагрев—охлаждение» до появления трещин)	Твердость HRB	
			20 °C	600 °C
10Х13Г12АФСЮР	4,2...7,4	930...1080	100...110	80...89
08Х21Н10Г6	23,9...29,7	440...620	82...88	66...73

его структура должна быть преимущественно мартенситно-карбидной. Для указанных условий целесообразно использовать порошковые ленты ПЛ-Нп-230Х12Г2 и ПЛ-Нп-250Х10Г4Ф3. С повышением коэффициента динамичности необходимо уменьшать содержание углерода и увеличивать количество марганца в наплавленном металле. Так, при $K_d = 3,5$ оптимальным является следующее содержание легированных элементов в наплавленном металле, %: углерода 1,0...1,7, марганца 5...6 и хрома 12. При этом целесообразно применять порошковую ленту ПЛ-Нп-160Х12Г5. С возрастанием K_d в структуре наплавленного металла необходимо увеличивать количество остаточного аустенита и повышать его стабильность по отношению к деформационному мартенситному превращению. Установлено, что если после наплавки структура и фазовый состав наплавленного металла отличаются от оптимальных, то эффективным способом их регулирования является нормализация. Ее режимы следует выбирать с учетом интенсивности ударно-абразивного воздействия. При повышении K_d следует использовать более высокие температуры нагрева для нормализации с целью увеличения количества аустенита в структуре и степени его стабильности. Наплавку разработанными порошковыми лентами сечением 20×4 мм следует производить под флюсом АН-26 при следующих режимах: $I_{cv} = 600...650$ А; $U_d = 28...32$ В; $v_{cv} = 35$ м/ч. Указанные ленты отличаются хорошими сварочно-технологическими характеристиками.

Анализ приведенных данных показывает эффективность применения марганецодержащих наплавочных материалов, обеспечивающих получение в структуре наплавленного металла метастабильного аустенита, армированного упрочняющими фазами, и реализацию эффекта самозакалки при нагружении. Важное значение мартенситного деформационного превращения заключается в том, что на его развитие расходуется большая часть энергии внешнего воздействия, а меньшая — идет на разрушение [12, 13]. При этом происходит не только упрочнение, но и релаксация микронапряжений, затрудняющая образование и развитие микротрешин [14]. Мартенситным деформационным превращением можно управлять путем изменения химического состава наплавленного металла или ре-

жимов термообработки после наплавки, что позволяет при оптимизации его развития обеспечить наиболее высокий уровень износостойкости.

- Лякишев Н. П. Новые направления в технологии получения материалов с заданными свойствами // РАН. Металлы. — 1992. — № 2. — С. 5–8.
- Богачев И. Н., Минц Р. И. Кавитационное разрушение железоуглеродистых сплавов. — М.; Свердловск: Машгиз, 1959. — 111 с.
- А. с. 5455436 СССР, МПК В 23 К 35/368. Порошковая проволока, содержащая стальную оболочку и порошкообразную шихту / Л. С. Малинов, В. И. Коноп, К. Н. Соколов и др. — Опубл. 05.02.77, Бюл. № 5.
- Выбор состава хромомарганцевой стали с метастабильным аустенитом в качестве основы наплавленного материала / Л. С. Малинов, А. П. Чейлях, Е. Я. Харланова, Т. В. Барышникова // Изв. вузов. Черн. металлургия. — 1994. — № 8. — С. 45–46.
- Новый наплавочный материал системы С–Fe–Mn–V для повышения долговечности ходовых колес мостовых кранов / Л. С. Малинов, Е. Я. Харланова, А. А. Колечко и др. // Свароч. пр-во. — 1988. — № 9. — С. 18–20.
- Пат. 23408A Украина, МПК С 22 С 38/38. Склад дроту для износостойкой наплавки / Л. С. Малинов, В. М. Полещук, Д. О. Деркач и др. — Опубл. 02.06.98, Бюл. № 3.
- Износостойкость дисперсионно-твердеющих сталей с нестабильным аустенитом / Л. С. Малинов, В. И. Коноп, В. Д. Панин и др. // Прогрессивные методы сварки в тяжелом машиностроении и наплавки в черной металлургии: Сб. науч. ст. — Жданов: ЖДМИ, 1977. — С. 22–25.
- Повышение работоспособности валков пилигримовых станов наплавкой новой порошковой проволокой ПП-35ЖН / А. В. Ковальчук, А. И. Одаковский, Л. С. Малинов и др. // Свароч. пр-во. — 1984. — № 7. — С. 12–13.
- Малинов В. Л. Разработка экономолегированных наплавочных материалов для повышения износостойкости деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания: Дис. ... канд. техн. наук. — Мариуполь, 1999. — 135 с. — Машинопись.
- Чигарев В. В., Малинов В. Л. Выбор экономолегированных наплавочных материалов для различных условий ударно-абразивного воздействия // Автомат. сварка. — 2000. — № 5. — С. 58–60.
- Петров И. В. Исследование износостойкости наплавочных материалов при абразивном изнашивании под действием динамических нагрузок: Дис. ... канд. техн. наук. — М., 1965. — 212 с. — Машинопись.
- Малинов Л. С., Эйсмонт Т. Д. Влияние предварительной пластической деформации на кавитационную стойкость хромомарганцевых сталей // Физико-химическая механика материалов. — 1968. — Т. 4. — С. 691–695.
- Попов В. С., Брыков Н. Н., Дмитриенко Н. С. Износостойкость пресс-форм огнеупорного производства. — М.: Металлургия, 1971. — 160 с.
- Малинов Л. С. Кинетика образования эпилон-фазы в легированных железомарганцевых сплавах: Дис. ... канд. техн. наук. — Свердловск, 1963. — 144 с. — Машинопись.

Results of the work done at PGTU on making surfacing consumables to provide the deposited layer with meta-stable austenite reinforced with hardening phases and realize the effect of self-hardening under loading have been generalized. The above effect is caused by transformation of austenite into martensite under loading during the wearing process.

Поступила в редакцию 05.04.2001,
в окончательном варианте 11.06.2001

ПРОИЗВОДСТВО ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДАТЧИКОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СВАРКОЙ

Н. Н. ХОМЕНКО, д-р техн. наук (Черниг. гос. технол. ун-т)

Рассмотрены вопросы электрохимической сварки кремния со сталью применительно к узлам преобразователей давления и др. Показаны области использования датчиков, их конструктивные и технологические особенности. Представлены данные о сварочном оборудовании и пути его совершенствования.

Ключевые слова: электрохимическая сварка в твердой фазе, свариваемые узлы и материалы, сварочное оборудование, сборочно-сварочная оснастка

Стремительное развитие электронной и вычислительной техники явилось предпосылкой для широкого внедрения автоматизации и контроля самых разнообразных процессов в промышленности, медицине, научных исследованиях и быту. Однако реализация этой предпосылки в значительной мере определяется возможностями устройств для получения информации о регулируемом или контролируемом параметре или процессе. К таким устройствам относятся первичные преобразователи неэлектрических величин, в которых используются пьезо- и тензорезистивный или емкостный эффекты. С ростом автоматизации к датчикам стали предъявлять все более высокие требования. При этом особое значение придают следующим показателям: миниатюрности (возможности встраивания или ввода), дешевизне (при серийном производстве), механической прочности и герметичности. Датчиками можно пользоваться для любых измерений статического и динамического давления газов и жидкостей. Особенno удобны они в тех случаях, когда, наряду с индикацией, желательна или необходима запись типа и/или обработка сигнала. Эти измерительные устройства ныне широко используются в различных областях техники: в океанографии для измерения глубины и волнового давления океана; в машиностроении для трибологических измерений и контроля давления масла в крупногабаритных подшипниках скольжения; в производственных процессах для регистрации давления и измерения уровня жидкости; в гидравлике и пневматике для контроля и регулирования давления в гидросистемах тормозов и железнодорожного подвижного состава; в автомобилестроении для измерения давления в топливных насосах, системах двигателей внутреннего сгорания и тормозных системах; в ракетной технике для измерения давления в топливных баках ракет; в авиационной промышленности для измерения давления в гидравлических системах и в качестве вариометров; в механике грунтов для измерения давления грунтовых вод и исследования устойчивости пластичных грунтов. Дат-

чики применяются в бытовой технике, а также в медицине для исследования гемодинамики глаза и прилегающих отделов головного мозга, диагностики скоростных характеристик прохождения пульсовых волн во время сердечного цикла, объемных измерений кровообращения и др. Использование того или иного датчика в этих областях определяется прежде всего отношением его цены к эффективности. При промышленном применении указанных устройств определяющим фактором является погрешность измерений, которая при регулировании процессов должна составлять 1...2, а для задач контроля — 2...3 %. Соотношение цен датчиков общего и специального назначения составляет 1:100...1:1000.

Создание датчиков стало возможным при использовании нетрадиционных материалов (полупроводниковые материалы, стекло, сплавы, керамика, металлические сплавы), а также современных планарных микротехнологий и новых методов сварки, к которым и относится электрохимическая сварка (ЭХС) в твердой фазе (рис. 1) [1].

Преимущества этого метода сварки заключаются в следующем:

возможности непосредственного соединения металла или полупроводника со стеклом или с ситаллом без применения дорогостоящих дефицитных припоев на основе золота, индия, серебра и т. д.;

соединении материалов при температурах, более низких, чем температура пайки твердыми припоями;

соединении материалов в любых средах, включая и воздух;

эксплуатации узлов при температурах, приближающихся к температуре сварки;

ограничении времени сварки до нескольких минут;

отсутствии необходимости создавать высокие удельные усилия сжатия;

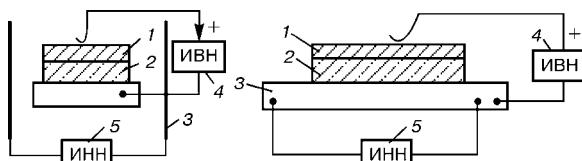


Рис. 1. Принципиальные схемы ЭХС: 1 — стекло; 2 — кремний (металл); 3 — нагреватель; 4, 5 — источники сварочного напряжения соответственно низкого и высокого

Хоменко Николай Николаевич — профессор, зав. кафедрой сварочного производства.

© Н. Н. Хоменко, 2001

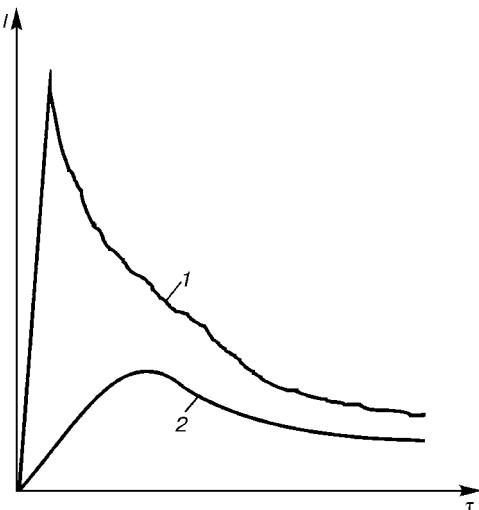


Рис. 2. Жесткий (1) и мягкий (2) режимы ЭХС

возможности получать надежные, равнопрочные и герметичные соединения.

В последнее время ЭХС получила распространение и при изготовлении плоских интегральных схем, газоразрядных приборов и других устройств.

Важным элементом неразъемного узла датчика является мембрана, изготовленная из полупроводникового кремния, на одной из поверхностей которой создается методом планарной технологии тензорезистивный мост или обкладка конденсатора. В Украине и ближнем зарубежье разработчики датчиков в конструкции узлов закладывают полупроводниковые элементы с геометрическими размерами не менее 3...4 мм, что упрощает систему сборки узлов и конструкцию токоподводящих устройств. Миниатюризация датчиков, которая является одним из требований при их использовании в биомедицинских исследованиях, потребовала некоторой перестройки в системах проектирования сборочно-сварочной оснастки, особенно при создании токоподводящей

щих и нагревательных устройств, корректировки режимов сварки. Так, для габаритных узлов приемлем жесткий режим сварки, при котором сначала сборочный узел нагревается до требуемой температуры, а затем подается сварочное напряжение. Для миниатюрных узлов необходим мягкий режим, при котором нагрев деталей до требуемой температуры проводится при включенном сварочном напряжении (рис. 2). Кроме того, для миниатюрных узлов необходимо применять меньшие сварочные напряжения, на порядок отличающиеся от напряжений жесткого режима, или их плавное повышение синхронно со снижением сварочных токов.

С помощью ЭХС можно соединять различные материалы. В таблице приведены пары свариваемых материалов, которые широко используются в конструкциях узлов датчиков разного применения, и режимы их сварки.

Развитие технологии, производство сварных узлов невозможно без сварочного оборудования и оснастки. Это оборудование наряду с основными качествами должно иметь высокую производительность, а операция его сборки должна быть нетрудоемкой, выполняться с требуемой точностью, обеспечивать возможность вакуумирования замкнутых полостей узлов и их равномерный нагрев. Вопрос трудоемкости сборочного процесса в общем решен за счет использования сменных сварочных приспособлений и сборочных кондукторов. Вопрос производительности связан с техникой нагрева [2]. Здесь наибольшую сложность представляет равномерность нагрева узлов. Температуру можно контролировать лишь контактным методом с ограниченным количеством термопар, а ее регулирование и поддержание практически можно осуществлять одним прибором.

Установки для ЭХС разнородных материалов наша промышленность не выпускает, а работающие на ряде предприятий изготовлены нами по индивидуальному заказу. Они имеют общую компоновку



Рис. 3. Блок-схема сварочной установки для ЭХС

Перечень свариваемых материалов и режимы их сварки

Материал	Марка стекла	$i, \text{ мА}/\text{мм}^2$	$\tau, \text{ мин}$	$T, ^\circ\text{C}$
Ковар (29НК)	C48-1, C48-2, C52-1	10...30	10	500
Молибден	C48-1, C48-2, C52-1	10...30	10	500
Титан	C72-4	25	5	400
Тантал	C72-4, C93-1	25	5	400
Кремний	Пирекс, ЛК-105, С35-1, С37-2	10...40	0,5...10	300...450
Германий	C48-1, C48-2, C52-1	3	2	450
Алюминий (пленка)	Кварц, С48-1, С48-2, С52-1, С93-1, С93-2, С90-1	1	1...10	400...500
Нихром	C35-1, C47-1	1	1...10	400...500
Кварц через Al, Si	Кварц	10	1...5	850
Кремний	Сапфир	1	1	450
Арсенид галлия	C52-1, C48-2	25	5...10	450
Палладий	Фарфор	100	5	400
Платина	C52-1, C48-1, C48-2	5	7	400
Кремний	Кварц	10...25	1...20	400...900

в соответствии с блок-схемой, представленной на рис. 3 (блоки в штриховой рамке применяются при необходимости). Основой всех установок является сварочный блок, характеризующийся высокой производительностью, возможностью сварки в атмосфере воздуха и вакууме, универсальностью по конструктивным особенностям свариваемых узлов и методу нагрева. Сварочный блок запитывают высоковольтным сварочным напряжением постоянного тока от специального блока питания, который снабжен системой контроля, регистрации и управления. Нагрев деталей осуществляют низковольтными нагревателями. В состав блока нагрева, кроме трансформатора, входит система контроля, регистрации и управления этим процессом. Установки специализированного назначения имеют вакуумные системы, включающие откачной пост и систему контроля и управления [3]. Большинство установок имеют отдельные сборочно-сварочные устройства, позволяющие производить ручную сборку узлов вне камеры установки. Все установки имеют ручную систему загрузки и выгрузки деталей или сборочно-сварочных устройств, а некоторые снабжены автоматической системой управления процессом сварки.

Все возрастающая потребность промышленности в датчиках первичной информации требует решения вопроса организации их выпуска. На первых порах с учетом наметившихся тенденций следует наладить производство установок с многопозиционными сборочно-сварочными приспособлениями. Однако здесь возникают два отрицательных фактора: трудоемкость сборки и невозможность управления и контроля процессом сварки. В последнее время предпринимаются попытки сварки нераздельных на кристаллы (модули) кремниевых пластин со стеклом [4]. Такая технология резко повышает производительность, но одновременно возникает проблема разделения этой сборки: нужны методы

Issues associated with electrochemical welding of silicon to steels for making units of pressure transducers and other assemblies are considered. Fields of applications of the transducers and their design and technological peculiarities are described. Data on welding equipment and ways of its upgrading are presented.

резки, которые давали бы качественную поверхность реза без сколов и трещин. В перспективе необходимо разработать автоматические и полуавтоматические сварочные установки с индивидуальной сваркой узла, особенно это относится к полупроводниковым датчикам и другим полупроводниковым приборам. Полную автоматизацию процесса сварки с применением метода распознавания топологии кристалла можно осуществить детектированием с помощью промышленной телекамеры топологии контактных площадок или реперных меток на кристаллах с последующим сравнением изготавливаемой схемы со стандартной, введенной в ЭВМ. При этом для детектирования можно использовать фотоприемные устройства. Одновременно необходимо разработать систему подачи собранного узла в прижатом состоянии в зону нагрева под сварочный электрод.

В заключение следует отметить, что ЭХС в твердой фазе является прогрессивным и наиболее приемлемым методом получения прецизионных неразъемных узлов, включающих стекло, полупроводниковые материалы и металлы, в современных приборах управления и контроля, бытовой технике, медицине.

- Хоменко Н. Н. Научные и технологические основы электрохимической сварки в твердой фазе кристаллических материалов с полупроводящими стеклами: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1997. — 43 с.
- Хоменко Н. Н., Мосеев О. А. Нагрев и нагревательные устройства установок для сварки в электрическом поле // Автомат. сварка. — 1991. — № 8. — С. 32–34.
- Хоменко Н. Н., Величко Н. А., Барбаш С. В. Управление и контроль процессом сварки в электрическом поле узлов датчиков // Приборы и системы управления. — 1993. — № 1. — С. 30–31.
- Хоменко Н. Н. Технология и материалы при производстве крупногабаритных узлов-заготовок датчиков давления // Автомат. сварка. — 1996. — № 6. — С. 31–34.

Поступила в редакцию 10.04.2001,
в окончательном варианте 01.06.2001

ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД КАК ИСТОЧНИК НАГРЕВА В ПРОЦЕССАХ СВАРКИ И ПАЙКИ (ОБЗОР)

Г. П. БОЛОТОВ, канд. техн. наук (Черниг. гос. технол. ун-т)

Приведены основные результаты исследований и разработок, направленных на совершенствование и расширение технологических возможностей тлеющего разряда как источника нагрева для сварочных процессов. Показаны перспективные способы повышения устойчивости разряда, охарактеризованы основные типы источников питания и оборудования. Указан круг технологических задач, успешно решаемых способами сварки и пайки в тлеющем разряде.

Ключевые слова: диффузионная сварка, пайка, тлеющий разряд, устойчивость, источники питания, оборудование, область применения

Специфическое сочетание физико-химических и технологических особенностей образования диффузионных сварных соединений затрудняет применение концентрированных сварочных источников энергии, предъявляет повышенные требования к локальности и регулированию интенсивности нагрева поверхностными распределенными источниками теплоты, их приспособляемости к нагреву деталей разнообразной формы и габаритов. Из используемых в настоящее время для диффузионной сварки источников энергии (индукционный, радиационный, электроконтактный и др.) наиболее полно указанным требованиям отвечает тлеющий разряд, горящий в инертных или восстановительных газах при давлении ниже атмосферного.

Попытки применения тлеющего разряда в качестве источника нагрева для диффузионной сварки и пайки металлов относятся к началу 60-х годов [1]. В этот же период были проведены эксперименты по пайке металлов [2] и зонной рафинирующей плавке кремния [3] тлеющим разрядом в водороде. Уже в первых работах [4, 5] отмечались простота оборудования, высокая эффективность и экономичность применяемого процесса. Однако вместе с благоприятными предпосылками были обнаружены и различные виды нестабильности газоразрядной плазмы, а также зависимость технологических параметров от формы и материала изделий, что потребовало изучения физико-технических особенностей плазмы тлеющего разряда как сварочного источника энергии.

В опубликованном в 1978 г. обзоре [6] и монографии [7] обобщены результаты исследований и опыт промышленного применения тлеющего разряда при сварке разнородных металлов, сплавов и неметаллических материалов; рассмотрены процессы в газоразрядной плазме средних давлений; приведены характеристики разработанного оборудования; показана перспективность применения тлеющего разряда как сварочного источника нагрева. В последующем основное внимание было удалено исследованиям энергетических характеристик тлею-

щего разряда в условиях сварки и пайки, дальнейшему изучению и расширению его технологических возможностей, в частности, за счет повышения стабильности горения разряда при изменяющихся в широких пределах режимах нагрева, а также разработке новых экономичных источников питания и созданию высокопроизводительного автоматизированного оборудования.

Сварка и пайка в нормальном тлеющем разряде производится при давлении газа $1,33 \dots 13,3$ кПа и межэлектродных расстояниях $(5 \dots 15) \cdot 10^{-3}$ м. При таких давлениях температура газа в положительном столбе разряда достигает $1500 \dots 3500$ К [8, 9], а протяженность зоны катодного падения потенциала, отделяющего положительный столб от катода (изделия), снижается до долей миллиметра [10]. В этих условиях до 80 % выделяющейся в столбе разряда электрической энергии передается посредством теплопроводности газа катоду, являющемуся активным тепловым стоком, и, наряду с действием ускоренных ионов, обеспечивает его эффективный нагрев. Благодаря суммарному действию на катод двух источников теплоты КПД нагрева достигает $0,70 \dots 0,95$ и в значительной степени зависит от давления газа (рис. 1) [11].

Специфическим свойством тлеющего разряда как поверхностного источника нагрева, существенно повышающим его технологичность, является возможность изменения в широких пределах плотности потока тепловой энергии на поверхности соединяе-

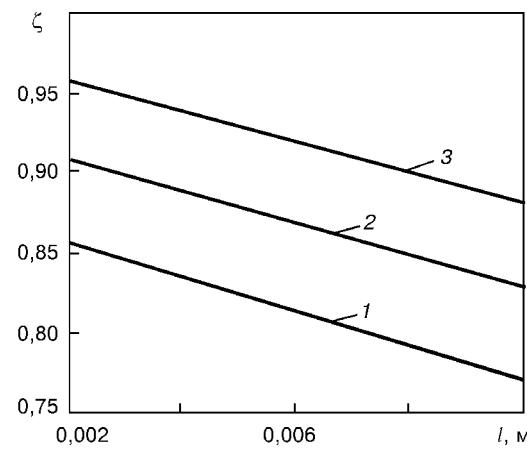


Рис. 1. Зависимость КПД нагрева тлеющим разрядом в азоте от межэлектродного расстояния l при давлении газа $p = 2,67$ (1); $8,0$ (2) и $13,3$ (3) кПа

Болотов Геннадий Павлович — выпускник ЧФ КПИ 1973 г., доцент кафедры сварочного производства.

© Г. П. Болотов, 2001

мых деталей. Изменение давления газа p в рабочей камере приводит к изменению плотности тока j в зоне нагрева в приблизительном соотношении $j \sim p^2$ [10]. Это позволяет варьированием давления газа в сравнительно небольших пределах изменять плотность тока в диапазоне от $10^{-3} \dots 10^{-2}$ до $0,1 \dots 0,5 \text{ A/cm}^2$ [6], что соответствует изменению коэффициента сосредоточенности от 0,01 до 0,50 (рис. 2). Появляется возможность производить в тлеющем разряде как равномерный плавный нагрев тонкостенных изделий [12], так и локальный достаточно интенсивный нагрев крупногабаритных заготовок [13].

Тлеющий разряд является промежуточной формой газового разряда и при определенных условиях способен переходить в его более устойчивую форму — электрическую дугу, приводящую к недопустимому перегреву и оплавлению детали. Формирование дугового разряда может вызвать эмиссионная пятнистость поверхности деталей, обусловленная наличием на ней окалины, жировых загрязнений, щелей и зазоров критического размера [6], которые способствуют локальному повышению плотности тока на катоде.

Качественная подготовка поверхности деталей перед сваркой, применение защитных газовых сред с пониженным содержанием кислорода, совершенствование конструкции узла позволяют существенно снизить вероятность образования дуги.

В условиях сварки и пайки проволочный или ленточный стальной анод выполняется в виде контура, соответствующего форме нагреваемого сечения. В этом случае плотность тока в разряде оказывается существенно неравномерной — на аноде и прианодной области она почти на порядок превышает плотность тока на катоде. В процессе работы на поверхности анода или отдельных его участках осаждаются загрязнения в виде оксидных пленок, полимеризовавшихся в разряде паров вакуумного масла и др., имеющих низкую электропроводность. Эффективная поверхность анода, через которую замыкается ток разряда, снижается, что повышает плотность тока в прианодной плазме [14]. Увеличение плотности тока на аноде до критической ($1,5 \dots 2,0 \text{ A/cm}^2$) и более способствует дальнейшему самопроизвольному сжатию плазмы появляю-

щимся собственным магнитным полем [7, 10] с развитием в ней канала дугового разряда. Устранение этого негативного фактора производится периодической очисткой или заменой анода.

Переход сильноточного тлеющего разряда в дуговой сопровождается значительными ударными токовыми перегрузками источника питания и соединяемых деталей. Для снижения таких перегрузок в цепь разряда включают сглаживающие фильтры или устанавливают специальные дугогасящие устройства, реагирующие на изменение тока или напряжения в разрядной цепи и воздействующие на них таким образом, чтобы привести их к значениям, соответствующим области существования тлеющего разряда. Применяемые устройства можно разделить на три группы: поддерживающие ток разряда на неизменном уровне [7]; кратковременно отключающие напряжение питания [15]; снижающие ток разряда на некоторое значение [16]. Формирование дугового разряда происходит за время $10^{-6} \dots 10^{-4}$ с [17]. С учетом тепловой инерции деталей быстродействие устройств может составлять $10^{-2} \dots 10^{-1}$ с.

Более эффективным способом повышения устойчивости тлеющего разряда является секционирование электродов [18, 19]. В процессах сварки и пайки применяют замену монолитного анода на секционированный [20], отдельные секции (сегменты) которого соединены с положительным полюсом источника питания через развязывающие балластные сопротивления достаточно большого уровня — $100 \dots 500 \Omega$ (рис. 3). В этом случае возникновение дуги на каком-либо участке катода или секции анода слабо влияет на режим горения тлеющего разряда на других секциях. При этом ток возникшей дуги ограничен значительным внешним балластным сопротивлением этой цепи. Воздействие дуги на соединяемые детали существенно снижается, однако не исключается возможность их повреждения при ее длительном горении.

Ограничение длительности существования возникшей дуги для системы электрически развязанных электродов достигается путем использования вращающегося электрического поля, обегающего с определенной скоростью анодные секции [21]. Возникшая на любой из секций дуга в следующий момент оказывается выключенной из электрической цепи и вынуждена погаснуть. Для предотвращения повторного возбуждения дуги на этой секции при ее последующем включении скорость вращения электрического поля задается такой, чтобы за период обращения электрического тока в межэлектродном промежутке успели исчезнуть все флюктуации, вызванные кратковременным действием дуги. Частота переключения анодных секций должна удовлетворять двум противоречивым требованиям:

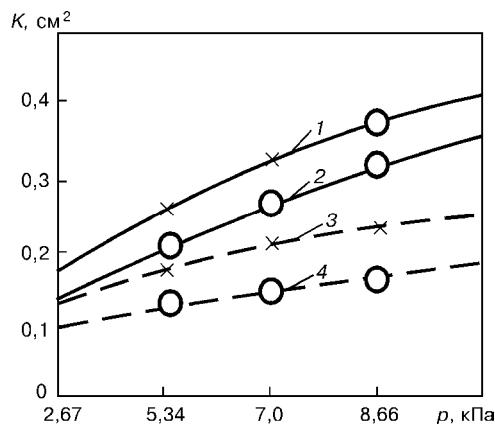


Рис. 2. Зависимость коэффициента сосредоточенности тлеющего разряда от давления газа в аргоне (1, 2) и гелии (3, 4) при $I = 2$ (2, 4) и 5 (1, 3) А

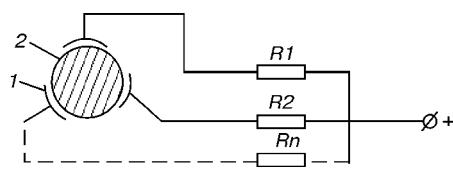


Рис. 3. Схема нагрева с использованием секционированного анода: 1 — анодные секции; 2 — катод; $R1, \dots, Rn$ — балластные сопротивления

быть достаточно высокой, чтобы ограничить длительность горения дуги на отдельной секции и соответственно снизить степень ее воздействия на изделие, и в то же время быть достаточной низкой, чтобы устранить условия для ее повторного возбуждения. Оптимальная частота переключения анодных секций для токов разряда 5...30 А составляет 500...2000 Гц, и снижается с увеличением силы тока. В качестве элементов, коммутирующих анодные цепи необходимо применять высокочастотные или импульсные тиристоры.

Для стабилизации режима горения тлеющего разряда применяют источники питания с падающими или крутопадающими внешними характеристиками. Наиболее простым вариантом получения такой характеристики является применение источника с активным балластным сопротивлением (рис. 4, а) [6]. Это сопротивление выбирают в пределах от 1/3 до полного сопротивления разряда [22], составляющего в условиях сварки 50...150 Ом. Такая схема вносит значительные потери электрической энергии — КПД источника не превышает 0,4...0,6. Однако такие источники просты в изготовлении и эксплуатации, имеют высокую надежность, невысокие стоимости и массу (до 5 кг на 1 кВт), поэтому широко применяются в промышленных и лабораторных установках невысокой мощности. Замена в источнике питания активного балласта на реактивный, в качестве которого использовали индуктивно-емкостный преобразователь [23], позволила создать внешнюю характеристику, близкую к вертикальной, и благодаря этому расширить диапазон устойчивости тлеющего разряда. Потери энергии в таком балласте заметно ниже, и КПД источника возрастает до 0,7...0,8. Однако такие источники обладают значительной массой (от 11 до 22 кг на 1 кВт в зависимости от конструкции и мощности). Они значительно сложнее и дороже источников, описанных ранее, и имеют ограниченные пределы регулирования режима, потому широкого распространения не получили.

В установках повышенной мощности (10...30 кВт) применяют более экономичные управляемые источники питания разряда на основе вентильных преобразователей (рис. 4, б) [24]. Крутопадающая характеристика таких источников создается автоматическим регулированием тока. Они имеют высокое отношение полученной мощности к массе, при этом потери энергии не превышают 10 % общей мощности источника.

Технологические возможности тлеющего разряда в сочетании с относительно простым оборудованием обусловили перспективность применения его как источника нагрева в процессах сварки давлением с подогревом. В настоящее время он применяется для диффузионного соединения углеродистых и конструкционных сталей с твердыми сплавами при изготовлении режущего и штамповочного инструмента [25, 26]; соединения технических стекол с металлами [27], цветных металлов и сплавов, кроме алюминия, [28] в узлах приборов; железокобальтовых сплавов с нержавеющими сталью при изготовлении мощных ультразвуковых преобразователей с сосредоточенными и распределенными параметра-

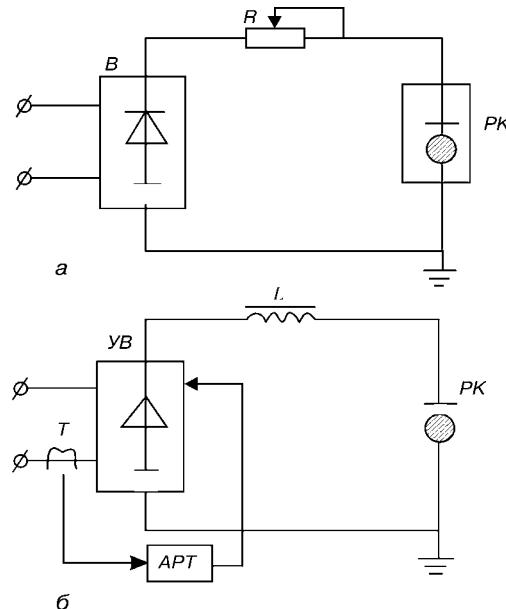


Рис. 4. Схемы источников питания тлеющего разряда с активным балластным сопротивлением (а) и на основе вентильных преобразователей (б): *B* — выпрямитель; *УВ* — управляемый выпрямитель; *APT* — автоматический регулятор тока; *PK* — разрядная камера; *R* — балластное сопротивление; *L* — сглаживающий реактор; *T* — трансформатор

ми акустического поля [13] и др. Нашел применение тлеющий разряд и для пайки металлов, начиная от низкотемпературной пайки выводов миниатюрных резисторов [29] и узлов электровакуумных приборов [30] до высокотемпературной пайки крупногабаритных узлов из сталей и твердых сплавов [12, 31]. Специфическая способность тлеющего разряда проникать в зазоры, щели, углубления создает перспективы для экономичной сварки давлением сложных сотовых и других конструкций, имеющих малую тепловую инерцию [7] благодаря их равномерному объемному нагреву. Применяют тлеющий разряд и для активации соединяемых поверхностей ионной бомбардировкой. В работе [28] отмечается, что предварительная обработка меди разрядом при токе 0,32 А и давлении газа 1,3...13,3 Па обеспечила повышенную прочность соединения. Такой широкий круг проблем, решаемых с помощью сильноточного тлеющего разряда, объясняется его хорошей адаптивностью к изменяющейся номенклатуре изделий, простой переналадкой при смене типоразмеров и формы деталей, высокой энергетической эффективностью, низкой стоимостью оборудования ввиду отсутствия высоковакуумных систем и ламповых генераторов, возможностью автоматизации процесса. К настоящему времени разработаны и находятся в промышленном использовании одно- и многопостовые установки для диффузионной сварки в тлеющем разряде мощностью 3...30 кВт [24, 32] и для пайки мощностью до 60 кВт [33], работающие в ручном и полуавтоматическом режимах. Отмечается перспективность применения тлеющего разряда как в серийном [30], так и в единичном и ремонтном [25] производствах.

Выходы

- Сильноточный тлеющий разряд является перспективным и конкурентоспособным источником

энергии в процессах соединения материалов в твердой фазе. Для расширения его технологических возможностей необходимы дальнейшие исследования энергетических характеристик разряда, способов повышения его устойчивости, разработка методов и режимов ионной очистки и активации соединяемых поверхностей.

2. Перспективным направлением является создание автоматизированных установок для сварки и пайки в тлеющем разряде и проведения комплексных технологических процессов, включающих предварительные и послесварочные операции.

1. Ванин В. С. Сварка и пайка металлов в тлеющем разряде // Автомат. сварка. — 1962. — № 4. — С. 23–25.
2. Brandt B. // J. Sci. Instr. — 1963. — № 40. — № 11. — Р. 542–543.
3. Trouzil Z. // Czeschosl. Phys. J. B. — 1962. — № 3. — Р. 227–231.
4. Диффузионная сварка в тлеющем разряде / В. И. Дятлов и др. — Л.: ЛДНТИ, 1968. — 26 с.
5. Котельников Д. И. Технология и оборудование диффузионной сварки в тлеющем разряде // Диффузионное соединение в вакууме металлов, сплавов и неметаллических материалов. — М.: МТИММП, 1970. — С. 298–303.
6. Котельников Д. И. Тлеющий разряд как источник тепла в сварочных процессах (Обзор) // Автомат. сварка. — 1978. — № 4. — С. 15–21.
7. Котельников Д. И. Сварка давлением в тлеющем разряде. — М.: Металлургия, 1981. — 116 с.
8. Голубовский Ю. Б., Флорко А. В. О роли VV и VT-процессов в механизме нагревания газа в положительном столбе разряда в азоте // Теплофизика высоких температур. — 1980. — № 18. — С. 870–873.
9. Каган Ю. М., Паскалев К. К. Газовая температура в положительном столбе разряда в гелии при средних давлениях // Журн. техн. физики. — 1974. — № 12. — С. 2585–2588.
10. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. — М.: Наука, 1971. — 543 с.
11. Болотов Г. П., Раков А. А. Повышение эффективности сварки в тлеющем разряде // Тез. докл. науч.-техн. конф. — Липецк, 1987. — С. 63–64.
12. Болькова А. И. Использование энергии тлеющего разряда в качестве источника тепла для пайки // Пайка в машиностроении. — М.: МАТИ, 1974. — С. 136–139.
13. Котельников Д. И., Болотов Г. П. Экономия припоя при изготовлении магнитострикторов // Экономия материалов в технологических процессах пайки. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. — С. 97–100.
14. Болотов Г. П., Гребениченко В. Я. Геометрические характеристики позитивного стопора тлеющего разряда постенного и зменившегося струму // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту. — 2001. — № 12. — С. 81–85.
15. Пабад-Захрягин А. А., Кузнецов Г. Д. Химико-термическая обработка в тлеющем разряде. — М.: Атомиздат, 1975. — 174 с.
16. Ecker G., Kroll W., Zoller O. // Phys. Fluids. — 1964. — № 7. — Р. 2001.
17. Hofert H. J. // Ann. der Phys. — 1939. — № 35. — С. 547.
18. Гайсин Ф. М., Сон Э. Е. Электрофизические процессы в разрядах с твердыми и жидкими электродами. — Свердловск: Изд-во Урал. ун-та, 1989. — 432 с.
19. Газовые лазеры / Под ред. Р. Н. Соловухина. — Новосибирск: Наука, 1977. — 360 с.
20. Сиваков А. Л. Управление процессом диффузионной сварки // Обмен опытом в радиопром-ст. — 1987. — № 5. — С. 58–60.
21. Болотов Г. П., Гребениченко В. Я. Совершенствование методов стабилизации сильноточного тлеющего разряда, используемого в процессах сварки и пайки // Прогрессивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва. — К.: НТУУ «КПІ», 1998. — Т. 4. — С. 303–306.
22. Ecker G. et al. // Phys. Fluids. — 1964. — № 12. — Р. 2001.
23. Котельников Д. И. Применение оборудования для сварки и пайки в тлеющем разряде. — Чернигов: ВСНТО, 1981. — 57 с.
24. Установка для диффузионной сварки в тлеющем разряде / Д. И. Котельников, Г. П. Болотов, А. П. Романенков, А. Л. Сиваков // Автомат. сварка. — 1985. — № 7. — С. 71–72.
25. Добешук М. Н. Исследование, разработка процессов диффузионной сварки твердых сплавов со сталью с применением нагрева в тлеющем разряде: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев: КПИ, 1972. — 16 с.
26. Садовников Б. В. Диффузионная сварка в тлеющем разряде твердого сплава со сталью на опытном образце серийной установки DC // Электротехн. пром-сть. Сер. электросварка. — 1982. — Вып. 4. — С. 3–5.
27. Садовский А. А. Прецизионная сварка стекла и ковара без расплавления // Свароч. пр-во. — 1973. — № 2. — С. 22.
28. Wierzschen T. Zgrzewanie dyffusyjne z zastosowaniem procesu bombardowanie jonego // Prz. Wraw. — 1975. — № 11. — S. 71.
29. Болотов Г. П. Применение тлеющего разряда для пайки выводов резисторов // Автомат. сварка. — 1990. — № 9. — С. 64–65.
30. Кузьминов Н. С., Деревянко И. А. Установка для пайки узлов ЭВП в тлеющем разряде // Электрон. пром-сть. — 1974. — № 12. — С. 67–70.
31. Зиновьева В. Ф., Гальцева С. М., Гилев В. А. Высокотемпературная пайка изделий из нержавеющих сталей с использованием тлеющего разряда // Автомат. сварка. — 1990. — № 6. — С. 60–63.
32. Котельников Д. И., Левенец В. Н., Болотов Г. П. Переносная установка для сварки в тлеющем разряде // Там же. — 1982. — № 1. — С. 74.
33. Пайка в тлеющем разряде разнородных материалов и твердых сплавов / В. Ф. Зиновьева, С. М. Гальцева, С. В. Емельянов, В. А. Гилев // Там же. — 1990. — № 11. — С. 71–73.

The paper gives the main results of investigation and development work aimed at improvement and enhancement of process capabilities of the glowing discharge as a heat source in welding processes. Promising methods for improvement of the discharge stability are demonstrated, and the main types of power sources and equipment are characterized. The range of processing tasks is outlined that are now being successfully solved by the processes of glowing discharge welding and brazing.

Поступила в редакцию 01.06.2001

УДК 621.791.4.02.015: 666.1.037.4

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СВАРКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ ДИЭЛЕКТРИКОВ С МЕТАЛЛАМИ И МЕЖДУ СОБОЙ

Л. Я. БЕРЕЗИН, канд. техн. наук (Черниг. гос. технол. ун-т)

Приведены основные стадии процесса образования сварного соединения при сварке в электростатическом поле. Рассмотрены особенности процесса применительно к его проведению и выбору параметров режима сварки диэлектриков с металлами в твердой фазе, а также технические характеристики узлов, полученных сваркой в электростатическом поле.

Ключевые слова: сварка, электростатическое поле, диэлектрики, металлы, электроразрядные процессы, режимы сварки, особенности процесса, перспективность

Успешному решению вопросов разработки прогрессивных технологических процессов получения неразъемных узлов диэлектриков с металлами и между собой в радиоэлектронике, авиа-, ракето-, судостроении, а также в космической технике способствует сварка в электростатическом поле (СЭП) большой напряженности (рис. 1).

Исследование СЭП осуществляется уже несколько десятков лет в ряде стран мира. Наиболее значительных результатов достигли в США. В СНГ эти работы наиболее активно ведутся в России и Украине, в частности в ЧГТУ.

Научные исследования, проведенные на кафедре сварочного производства ЧГТУ, позволили достичь положительных результатов в получении неразъемных, вакуумплотных соединений ситаллов (например, марки СО-115М), неорганических стекол с металлами и между собой, выявить закономерности процесса СЭП, разработать ряд технологических процессов и соответствующее сварочное оборудование для изготовления узлов газоразрядных приборов [1]. При этом для разработки реальных технологических процессов использованы сочетания материалов, приведенные в табл. 1.

В основе СЭП лежат процессы поляризации диэлектрика или диэлектрического слоя на свариваемой поверхности металла (при сварке металла с ме-

таллом), нагреветого до заданной температуры и помещенного в электростатическое поле большой напряженности. Эти процессы приводят к образованию слоя электрических зарядов высокой плотности на свариваемых поверхностях, пондеромоторному взаимодействию (ПМВ) между ними, образованию физического контакта, химических связей и последующему электрохимическому взаимодействию.

Установлено, что основной вклад в развитие и образование физического контакта вносят те виды поляризации диэлектрика, которые устанавливаются за время не более $1 \cdot 10^{-7}$ с. За этот период не менее чем на 97 % номинальной площади контакта успевает произойти образование физического контакта и химических связей. Дальнейшая выдержка свариваемого узла под напряжением способствует упрочнению соединения в основном за счет миграционной поляризации диэлектрика, продолжительность протекания которой и определяет длительность образования соединения с максимальной прочностью. В этот период реализуются процессы электродиффузии, электрохимических реакций, приводящих к образованию переходного слоя между свариваемыми материалами, характеризующегося совершенно новыми свойствами и более высокими значениями прочностных характеристик [2].

Процесс сварки может проводиться в любой газовой атмосфере: воздухе, защитных газах, вакууме. В общем случае процесс сварки осуществляется при нормальных атмосферных условиях. Необходимость использования того или иного защитного

Таблица 1. Сочетания свариваемых материалов

Сочетание свариваемых материалов	Прослойка	Толщина прослойки, мм	ТКЛР $\cdot 10^{-7}$, К $^{-1}$
CO-115M-Al	—	$\leq 3^*$	CO-115M-2(2,5...6,0) при 323...693 К;
SiO ₂ -Al-CO-115M	Al	0,001	SiO ₂ -(4...5,8) при 232...723 К;
CO-115M-Al-CO-115M	Al	0,5...1,0	Al-276,8 при 293...773 К;
CO-115M-Al-Cu	Al	<0,8	Cu-170,0 при 293...393 К
CO-115M-Al-CO-115M	Al	0,001	

П р и м е ч а н и я . 1. Здесь SiO₂ — кварцевое стекло типа КВ (ГОСТ 15130-79); CO-115M (ОСТ 3-104-77); Al — А999 (ГОСТ 11069-74). 2. Звездочкой обозначена толщина детали из алюминия.

Березин Леонид Яковлевич — выпускник ЧФ КПИ 1973 г., доцент кафедры сварочного производства, зам. декана технологического факультета.

© Л. Я. Березин, 2001

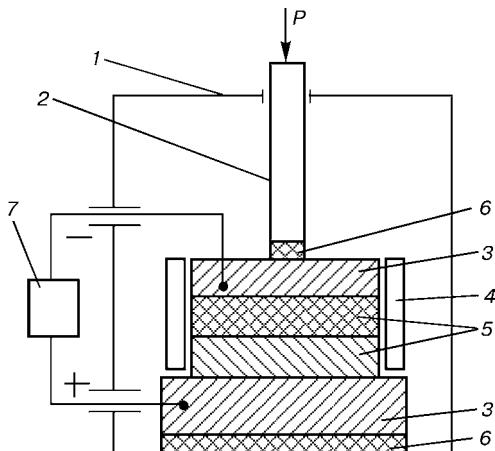


Рис. 1. Принципиальная схема СЭП: 1 — вакуумная камера (при сварке в вакууме или в защитных газах) или электропечь (при сварке в воздухе); 2 — шток для передачи механического усилия (сварка без внешнего усилия сжатия); 3 — электроды; 4 — устройство для нагрева свариваемых деталей (радиационный нагрев); 5 — свариваемые детали; 6 — изоляторы; 7 — высоковольтный источник питания

газа или их смеси, а также вакуума определяется свойствами свариваемого металла (повышенной способностью взаимодействовать с кислородом и азотом воздуха, характером пленок, образующихся на свариваемой поверхности). Например, сварку меди с неорганическим стеклом и ситаллами необходимо проводить в вакууме для исключения образования на поверхности меди рыхлой пленки оксида меди.

Исследования показали, что образованию соединения при СЭП препятствуют электроразрядные процессы (ЭРП), протекающие на поверхностях свариваемых деталей и в зазорах между ними [3].

Развитие ЭРП в плоскости сварки сопровождается появлением локальных объемов с избыточным давлением, вызывающих образование между металлом и диэлектриком воздушных «пузырей» (непроваров), в зоне которых находятся следы разрядов — прожоги. В воздушном зазоре («пузыре») образуется ионный слой газовых молекул, который, находясь у поверхности диэлектрика, частично компенсирует его поверхностные заряды, образовавшиеся при поляризации диэлектрика, ослабляет интенсивность ПМВ и способствует раскрытию микротрещин на свариваемой поверхности стекол и ситаллов.

Развитие ЭРП в зазорах у катода приводит к появлению поверхностных токов и частичных разрядов по диэлектрику, шунтирующих его. Кроме того, существенно снижается качество полированной поверхности свариваемого диэлектрика, контактирующей с катодом (рис. 1, верхний электрод), из-за электроэррозии. С этой точки зрения среда, в которой происходит процесс СЭП, должна соответствовать определенным требованиям электрической прочности (влажность не более 55 %, отсутствие в зоне сварки легкоионизирующих частиц и т. д.).

Одним из обязательных условий получения качественного сварного

соединения при СЭП является предварительная обработка свариваемой поверхности диэлектрика (механическая и химическая). Перед сваркой эта поверхность подвергается полировке до получения заданной шероховатости. Так, например, при сварке ситалла СО-115М с алюминием шероховатость поверхности ситалла должна быть не более $R_a = 0,02 \text{ мкм}$ [4]. Шероховатость поверхности диэлектрика (в общем случае зазор между свариваемыми поверхностями) на момент подачи электрического напряжения определяет характер ПМВ и ЭРП.

Предварительная химическая обработка поверхности диэлектрика в органических растворителях и неорганических растворах, кроме собственно очистки, позволяет получить заданные свойства как самой поверхности, так и приповерхностного слоя. Так, исследования 26 вариантов однократной и 20 вариантов комбинированной очистки ситалла СО-115М перед сваркой с алюминием показали, что максимальной прочности соединения достигают при комбинированной очистке ситалла в следующей последовательности: ацетон, неорганический раствор с основными свойствами, хромовая смесь. Это связано не только с эффективной очисткой, но и с активизацией процесса установления химических координационных связей между металлом и диэлектриком путем повышения кислотности поверхности неорганического стекла или ситалла, а также с активизацией процесса окислительно-восстановительной реакции между свариваемыми поверхностями с последующим образованием сложных соединений оксидов.

Кроме того, обработка неорганических стекол и ситаллов в кислых средах на заключительной стадии очистки ослабляет интенсивность ЭРП в зазорах зоны сварки, что выражается в уменьшении количества прожогов и непроваров в плоскости сварки, а также в более высокой воспроизводимости результатов экспериментов.

К параметрам режима СЭП следует отнести полярность, температуру нагрева (сварки) $T_{\text{св}}$, подаваемое на свариваемую сборку электрическое напряжение (напряженность электростатического поля между электродами $E_{\text{св}}$), скорость подачи напряжения, время выдержки под напряжением $\tau_{\text{св}}$, уровень и характер проходящего через диэлектрик тока (плотность тока $\gamma_{\text{св}}$), скорость нагрева и охлаждения, внешнее усилие сжатия $P_{\text{св.уд}}$. Диапазоны основных параметров режима сварки для ряда сочетаний свариваемых материалов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Диапазоны основных параметров режима сварки

Сочетание свариваемых материалов	$T_{\text{св}}$, К	$E_{\text{св}} \cdot 10^4$, В·м ⁻¹	$\gamma_{\text{св}} \cdot 10^{-3}$ МА·мм ⁻²	$\tau_{\text{св}}$, мин	$P_{\text{св.уд}}$, МПа
Co-115M-Al	623...723	18...20	2...3	5...10	10...25
SiO ₂ -Al-CO-115M	453...473	19...20	1,5...3,0	20...40	1...10
CO-115M-Al-CO-115M	623...723	18...20	2...3	5...10	10...25
CO-115M-Al-Cu*	623...723	18...20	2...3	5...10	10...25
CO-115M-Al-CO-115M	453...473	19...20	1,5...3,0	20...40	1...10

* Медь бескислородная.

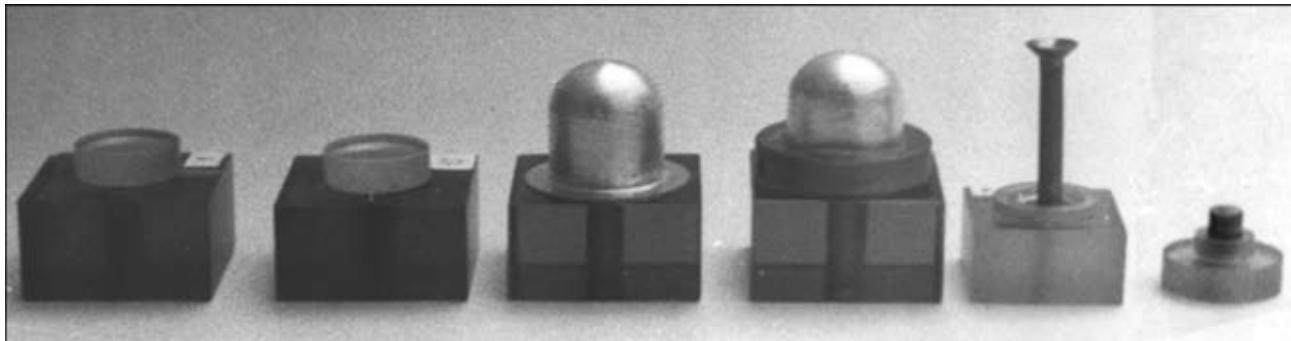


Рис. 2. Узлы газоразрядных приборов, выполненные способом СЭП

Критериями при выборе температуры сварки является сохранение конструктивных, технологических и эксплуатационных свойств свариваемых деталей, а также обеспечение полноты протекания процессов, ответственных за образование сварного соединения. Значение $T_{\text{св}}$ должно быть на 30...50 К выше температуры начала поляризации диэлектрика и в общем случае составлять $(0,2...0,4)T_{\text{пл}}$, где $T_{\text{пл}}$ — температура плавления наиболее легкоплавкого из соединяемых материалов.

Подаваемое на свариваемую сборку электрическое напряжение (напряженность электростатического поля между электродами) в основном зависит от диэлектрических свойств соединяемых диэлектриков, их толщины и должно обеспечивать протекание процессов, ответственных за образование сварного соединения. В общем случае, чем больше $E_{\text{св}}$, тем ниже температура и меньше время сварки.

Время выдержки под напряжением (время сварки) определяется теми процессами, протекание которых приводит к образованию неразъемного соединения. Причем образование физического контакта и установление химических связей определяется временем установления безынерционных видов поляризации (доли секунды). Развитие объемного взаимодействия с участием электродиффузионных и электрохимических процессов определяется временем реализации инерционных видов поляризации (в частности миграционной) и составляет от нескольких до десятков минут (в зависимости от диэлектрических и химических свойств свариваемого диэлектрика).

Установлено, что подача на свариваемые материалы напряжения после достижения температуры сварки и увеличение скорости его установления снижает влияние ЭРП, усиливает интенсивность поляризационных процессов и способствует повышению прочности соединения. Кроме того, прочность сварного соединения зависит от интенсивности и соотношения скоростей нарастания поляризационных процессов в диэлектрике и электроразрядных процессов в микрозазорах плоскости сварки.

Уровень и характер проходящего через диэлектрик тока (плотность тока) определяется его диэлектрическими свойствами, в частности диэлектрической проницаемостью, и температурой сварки. Для развития ПМВ, обеспечивающего получение качественного сварного соединения, диэлектрическая проницаемость должна составлять не менее 6, а плотность тока при выбранной температуре сварки

— не менее $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ мА} \cdot \text{мм}^{-2}$. Для сварки используют постоянный ток.

Полярность тока оказывает существенное влияние на качество соединений. При сварке металлов с диэлектриками положительный потенциал необходимо подавать на металл. В общем случае это связано с эмиссионной способностью поверхности материала в плоскости сварки, находящимся под отрицательным потенциалом. Подача отрицательного потенциала на материал с большей эмиссионной способностью (например, алюминий в случае сварки с ситаллом) при наличии микрозазоров в плоскости сварки в момент включения напряжения приводит к активизации ЭРП и уменьшению прочности.

Уровень внешнего усилия сжатия не является определяющим при СЭП. Образование физического контакта между свариваемыми материалами происходит благодаря ПМВ. В таких условиях внешнее усилие сжатия может рассматриваться как интенсифицирующий фактор, способный повысить прочность соединения до 40 % и обеспечить получение вакуумплотных соединений диэлектрик–алюминий при толщине последнего до 3 мм. Основное требование к внешнему усилию сжатия заключается в устранении зазора между свариваемыми материалами до подачи на сборку электрического напряжения. Это существенно усиливает процесс разделения зарядов в диэлектрике и последующее ПМВ. Если развитие ЭРП в плоскости сварки может быть предупреждено иным путем (например, путем использования прослоек из алюминия толщиной примерно 0,001 мм и скорости нарастания поляризационных процессов выше скорости развития ЭРП



Рис. 3. Поляризационно-оптическое обследование узлов (уровень остаточных напряжений в зоне сварки 0,5 МПа)

в микрозазорах), процесс может осуществляться и без внешних сжимающих нагрузок или они будут носить «фиксирующий» характер (предотвращать смещение заготовок при сварке).

Кроме того, установлена зависимость прочности сварного соединения (интенсификации процесса разделения зарядов в диэлектрике) от усилия сжатия и модуля упрочнения алюминиевой прослойки.

Перспективность СЭП базируется на результатах, полученных при ее использовании для изготовления узлов газоразрядных приборов (рис. 2). По назначению и материалам свариваемых узлов она сопоставима с диффузионной сваркой в вакууме, но позволяет поднять процесс сварки неметаллов с металлами и между собой на значительно более высокий технико-экономический уровень:

качественные сварные соединения разнородных материалов в твердой фазе при различии ТКЛР до 46 раз;

низкий уровень остаточных напряжений в зоне сварки. Результаты поляризационно-оптического обследования показали, что остаточные напряжения в зоне сварки составляют не более 0,4...0,8 МПа (рис. 3);

стойкость к механическим ударам и вибрациям; стойкость к термоударам при -60...+120 °C (213...393 К);

вакуумплотность при чувствительности течеискателя не менее $1 \cdot 10^{-9}$;

обеспечение самых строгих требований по прецизионности;

увеличение выхода годных изделий на 20 %;

снижение температуры сварки на 200...250 K;

The main stages of the process of formation of a welded joint in welding in an electrostatic field are described. Peculiarities of the process, as applied to its implementation and selection of parameters for welding dielectrics to metals in a solid state, as well as specifications of the assemblies made by electrostatic field welding, are considered.

повышение температуры эксплуатации узлов не менее чем на 150 K;
повышение качества сварных узлов до 50 %;
снижение стоимости сварочного оборудования до четырех раз.

Выводы

1. Сварка в электростатическом поле является перспективным способом получения вакуумплотных, прецизионных узлов из материалов с резким различием физико-химических свойств, удовлетворяющих самим жестким эксплуатационным требованиям.

2. Практическое использование указанных особенностей процесса и рекомендаций по выбору режимов сварки позволяет определить оптимальные условия для получения качественного сварного соединения, полученного сваркой в электростатическом поле.

1. Березин Л. Я., Панаев В. Г., Усыскин О. Г. Получение вакуумплотных соединений ситалл-алюминий в узлах приборов // Технология авиационного приборо- и агрегатостроения. — 1986. — № 1. — С. 23–25.
2. Котельников Д. И., Березин Л. Я. Роль электроразрядных процессов при получении неразъемных соединений металлов с неметаллами в электростатическом поле // Электронная обработка материалов. — Саратов, 1991. — С. 64–66.
3. Березин Л. Я., Панаев В. Г., Усыскин О. Г. Особенности предварительной подготовки к сварке ситалла с алюминием в узлах приборов // Технология авиационного приборо- и агрегатостроения. — 1987. — № 3/4. — С. 31–33.
4. Варенцов В. А., Коржавый А. П., Бритун В. Ф. Исследование границы электроадгезионных соединений некоторых материалов электронной техники // Электронная техника. Сер. 7. Материалы. — 1983. — Вып. 185. — С. 36–39.

Поступила в редакцию 05.04.2001,
в окончательном варианте 13.06.2001

ВНУТРЕННИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И ИХ РОЛЬ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СВАРКЕ МАТЕРИАЛОВ В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ

Н. Н. ХОМЕНКО, д-р техн. наук, Е. В. БАЛАКИРЕВА, С. В. ОЛЕКСЕНКО, инженеры (Черниг. гос. технол. ун-т)

Рассмотрены вопросы образования внутренних электрических полей в контактной зоне кремния со стеклом. Показано влияние различных факторов на образование этих полей. Представлены исследования переходной зоны сварных соединений.

Ключевые слова: электрохимическая сварка в твердой фазе, свариваемые материалы, электростатические поля, переходная зона, миграция ионов

Метод электрохимической сварки позволяет соединять ионопроводящие стекла с полупроводниками, металлами или металлическими сплавами*. Такие стекла при высоких температурах ведут себя как твердые электролиты, в которых подвижными являются положительные ионы Na^+ , образующиеся при диссоциации Na_2O . Хотя омическое поведение стекла, как твердого электролита, было изучено во всех деталях, эффектам поляризации смежных с анодом областей уделялось относительно малое внимание. При приложении постоянного электрического напряжения в процессе сварки постепенно образуется прианодный слой стекла, в котором происходит истощение натрия и как следствие образование электростатического поля большой напряженности. Электростатические поля, образованные в прианодной области стекла, создают ряд эффектов: образуют внутренние сдавливающие силы, позволяющие максимально сблизить свариваемые контактируемые поверхности материалов; создают условия миграции ионов кислорода к поверхности металла (полупроводника), при которой образуется переходной связующий оксид; снижают энергию контактной поверхности стекла. Как будет показано ниже, ширина источенной (заполяризованной) зоны имеет небольшое значение и не позволяет экспериментально исследовать распределение потенциала в точках этой области, определить ширину этой зоны и электростатическое поле внутри этой области.

Сборочный узел, включающий металлический и стеклянный элементы, и к которому прикладывается постоянное напряжение (анодом является металл), можно представить в виде простой эквивалентной электрической цепи (рис. 1), в которой прианодная область стекла является чисто емкост-

Балакирева Елена Станиславовна — выпускница ЧГТУ 2001 г.
Олексенко Сергей Владиславович — выпускник ЧТИ 1988 г.,
аспирант кафедры сварочного производства.

* Хоменко Н. Н. Промышленное применение сварки диэлектриков с нагревом в электрическом поле // Автомат. сварка. — 1986. — № 3. — С. 55–56.

© Н. Н. Хоменко, Е. В. Балакирева, С. В. Олексенко, 2001

ным сопротивлением (C_0 , R_0), а $R1$ и $C1$ параллельно соединенные — область стекла, примыкающая к катоду. Переходные процессы и их качество можно легко интерпретировать, используя кривые зависимости тока от времени (рис. 2). Такие кривые можно записывать с помощью экспериментальной установки, схема которой приведена на рис. 3.

Количественным параметром электростатического поля является его напряженность, которая достаточно сложно зависит от ряда параметров, включающих сварочное напряжение и его полярность, шероховатость контактируемых поверхностей, воздушный зазор, натриевый состав стекла, диэлектрическое свойство стекла, температуру и время сварки, ширину заполяризованной области стекла.

При приложении электрического напряжения к сборочному узлу, нагретому до температуры сварки, происходит сближение контактируемых поверхностей в результате электростатической силы, уменьшение воздушного зазора до нуля, увеличение ширины поляризованной зоны стекла, формирование и рост оксидной связующей пленки между стеклом и металлом.

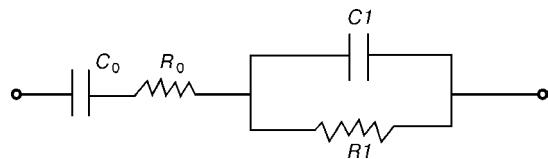


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема цепи свариваемых материалов

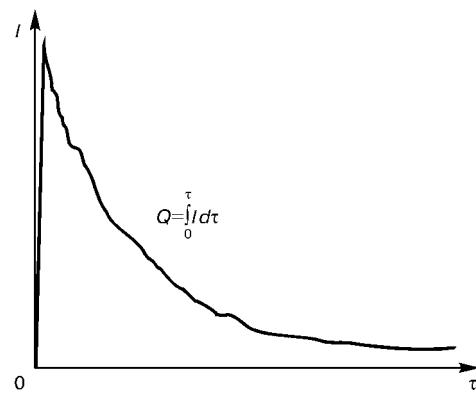


Рис. 2. Зависимость сварочного тока от времени

Отмеченные процессы связаны с количеством электричества, переносимого ионным током в процессе сварки, и может быть выражен следующими формулами:

ширина заполяризованной зоны

$$h_{3c}^i = \frac{Q_i}{qNS}, \quad (1)$$

где Q_i — количество электричества; q — заряд иона; N — количество ионов в единице объема; S — площадь контакта;

напряженность электростатического поля

$$E_{3c}^i = \frac{U}{h_{3c}^i}, \quad (2)$$

где U — сварочное напряжение;
сила электростатического поля

$$F_n^i = 0,5 E_{3c}^i E_0 (E_{3c}^i)^2; \quad (3)$$

толщина оксидной пленки

$$h_n^i = \frac{QM}{4S\rho F_\Phi}, \quad (4)$$

где M — молекулярная масса оксида; ρ — плотность оксида кремния; F_Φ — число Фарадея.

Единственный параметр, который можно легко определить экспериментально — это количество электричества, который определяется площадью, ограниченной кривой ионный ток — время (см. рис. 2).

Естественно, что напряженность и ионный ток являются функцией времени и в рационализированной системе единиц выражаются следующей формулой:

$$\frac{\partial E(h, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{EE_0} [I - j(h, \tau)], \quad (5)$$

где $E(h, \tau)$ — напряженность поля в оксиде или поляризованной области стекла на расстоянии h от металла в момент времени τ ; I — плотность начального тока; $j(h, \tau)$ — плотность тока для данных значений h и τ .

Это уравнение можно рассматривать как следствие теоремы Гаусса. Как можно заметить, важным параметром является диэлектрическая проницаемость стекла, которая может изменяться от температуры, количества оксида натрия. Согласно ана-

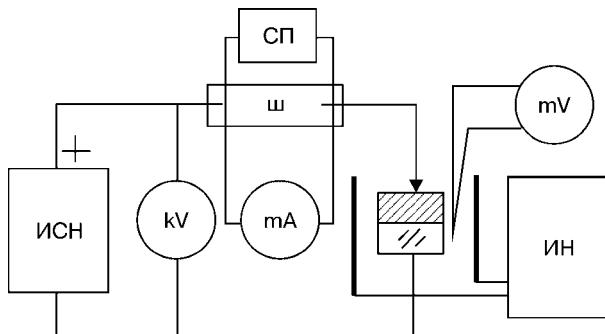


Рис. 3. Схема электрической цепи сварочной установки: СП — самописец; ИН — источник нагрева; ИСН — источник сварочного напряжения

лизу двух стекол «Пирекс» и С 48-3 она составляет значение равное 7. Изменения E в пределах $\pm 30\%$ влечет за собой отклонения в процентном отношении ширины поляризованной зоны стекла и электростатического поля.

Все указанные выше параметры могут быть определены расчетно на основе косвенных исследований, к которым можно отнести интегральный метод.

Расчеты ширины заполяризованной зоны стекла «Пирекс» в контакте с кремнием ($T = 400^\circ\text{C}$, $U = 1000$ В, $\tau = 30$ с) по (1) показали, что она составляет $(210 \dots 2364) \cdot 10^{-3}$ мкм. Электростатическое поле составляет $(4,7 \dots 0,4) \cdot 10^6$ В/мм. Сила внутреннего сжатия образцов составляет 628... 495 МПа.

Образование связующих оксидных пленок можно рассматривать исходя из представлений об ионной проводимости оксида при высокой напряженности поля, усложненной процессами, происходящими на границах раздела металлооксид и оксид-стекло.

Расчеты показали, что толщина оксидной пленки, образующейся на протяжении 30 с сварки, увеличивается с 2 до $23 \cdot 10^{-6}$ мм.

Интерес представляет влияние электростатического поля на подвижность положительных и отрицательных ионов, которая может оказывать положительное или отрицательное влияние на образование связующего продукта (оксида). Выдвинутая гипотеза о роли ионов кислорода стекла была подтверждена двумя экспериментами, в которых в качестве анода был использован ковар, а в качестве катода — стекло «Пирекс». Нагрев такой сборки в нейтральной среде до $T = 400^\circ\text{C}$ не выявил образования оксидной пленки железа. Сварка указанной пары в той же среде с приложением сварочного напряжения показало, что в контактной зоне ковар приобрел серую окраску, в то время как остальная поверхность коварового образца имела исходную блестящую окраску.

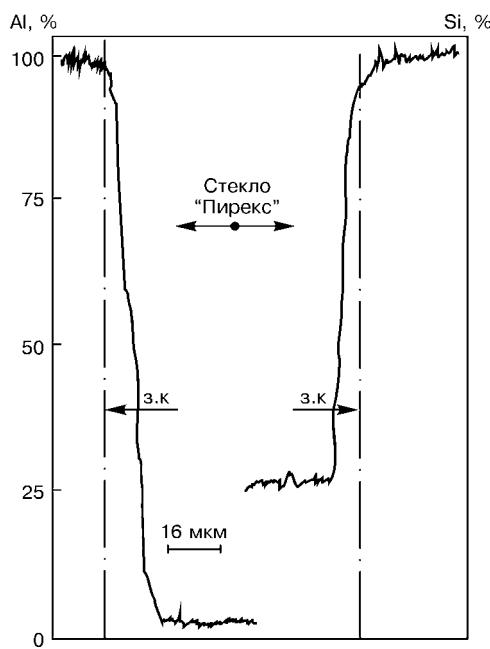


Рис. 4. Распределения алюминия и кремния в зоне соединения со стеклом «Пирекс»

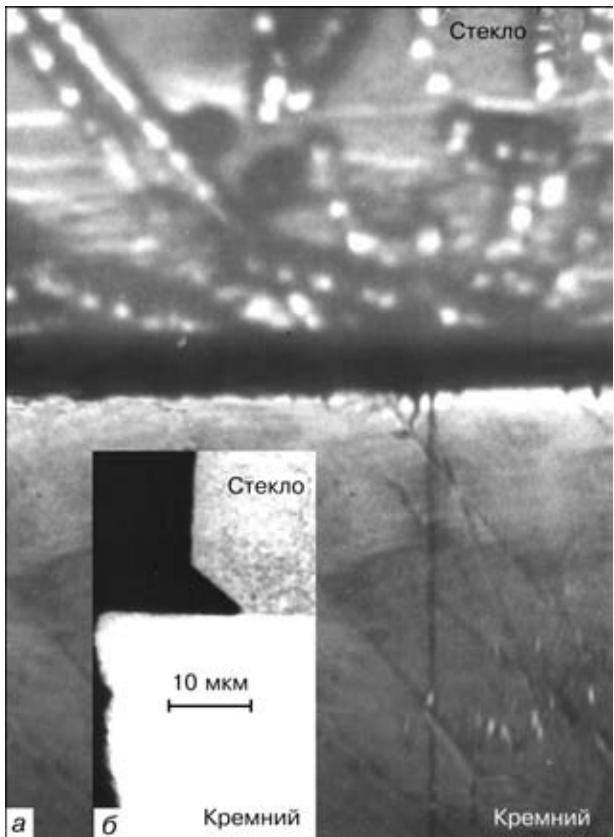


Рис. 5. Переходная зона соединения стекла «Пирекс» с кремнием $\times 200$, увел. 10: а — вид сверху; б — вид с торца

Considered are the problems associated with formation of internal electric fields in the silicon to glass contact zone. The effect of different factors on formation of such fields is shown. Investigations of the transition zone in welded joints are described.

Гипотеза о нейтрализации электростатического заряда в прианодной области стекла была также подтверждена экспериментами, в которых в качестве анода использовали кремний, алюминий и серебро. Микрорентгеноструктурные исследования переходной зоны образца, включающего кремний, алюминий и стекло «Пирекс», показали, что ионы алюминия и кремния диффундируют в стекло на небольшую глубину и скапливаются у анода (рис. 4). Характерным для этих пар является резкий спад ионного тока во времени. В то же время для серебряного анода такого спада не наблюдается. Это связано с подвижностью ионов кремния и алюминия, которая немного меньше подвижности ионов натрия. Диффузия ионов кислорода и ионов металла может частично или полностью нейтрализовать заряд в прианодной заполяризованной зоне стекла.

Независимо от механизмов миграции ионов под действием электростатического поля становится очевидным, что этот процесс вызывает заметное изменение в переходной (границной) зоне стекла с металлом. Такие изменения наблюдали при травлении шлифа стеклокремниевого образца (рис. 5).

Таким образом, расчетно-экспериментальным путем установлены значения электростатического поля в зоне контакта стекла с металлом и внутренние силы сжатия, а также роль электростатического поля в процессах миграции положительных и отрицательных ионов. Показано, что ионы кислорода стекла участвуют в образовании связующей переходной зоны между свариваемыми материалами.

Поступила в редакцию 05.04.2001

МОДЕЛИРОВАНИЕ И МАКЕТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИКИ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРОВ-СВАРЩИКОВ

А. С. БАДАЕВ, канд. техн. наук, С. В. НИКОЛАЕНКО, инж. (Чернигов. гос. технол. ун-т)

Рассмотрены вопросы моделирования и макетирования техники и технологий производства сварных конструкций в условиях учебного процесса. Представлен и описан ряд лабораторных работ по дисциплине «Производство сварных конструкций».

Ключевые слова: учебный процесс, подготовка инженеров-сварщиков, дисциплина «Производство сварных конструкций», моделирование, макетирование, технологическое оборудование, технологическая оснастка

Совершенствование подготовки специалистов связано с освоением активных методов обучения, ведущее место среди которых занимают деловые игры, имитирующие реальную производственную обстановку. С этой целью можно использовать информационные стенды, различные макеты и модели специального оборудования. Внедрение деловых игр в ходе учебного процесса позволяет студентам приобрести ряд производственных навыков.

Важное значение в учебном процессе имеет моделирование и макетирование, особенно в условиях, когда большинство сварочных производств не работает и возникают сложности не только с производственной практикой, но и с ознакомительными экскурсиями по изучению реально действующего оборудования.

Одной из профилирующих дисциплин при подготовке инженеров-сварщиков является производство сварных конструкций (ПСК). На кафедре сварочного производства разработан комплекс лабораторных деловых игр, позволяющих изучать технологию производства сварных конструкций с использованием масштабных недействующих макетов и действующих моделей оборудования, демонстрирующих функционирование рассматриваемых объектов. За основу приняты наиболее часто используемые технологические процессы и оборудование.

Результаты моделирования позволяют сделать определенные выводы об оперативных возможностях рассматриваемого технологического оборудования, необходимом составе вспомогательной оснастки, оптимальности различных вариантов технологии изготовления и т. д. Моделирование способствует предвидению и принятию обоснованных решений, а также выработке оптимальных планов.

При разработке каждой лабораторной работы решали следующие проблемы: выбор материалов и конструкций, хорошо моделирующих производс-

твенный процесс изготовления; определение типа-жа и масштабов оборудования (обычно 1:20) для заготовки, сборки и сварки; проектирование, изготовление, отладка моделей технологического процесса; внедрение деловой игры в учебный процесс; составление методических указаний.

Комплекс лабораторных работ может быть условно разделен на три группы.

I группа. Макеты. В этих работах макеты изображают оригиналы лишь с некоторой степенью внешнего подобия, но имеют все характерные черты оборудования, позволяющие запомнить его внешний вид. Для организации технологической деловой игры по выбору оптимальных инженерных решений макеты имеют электрические связи и оснащены световой и звуковой сигнализацией.

Работа 1. Оптимальное сочетание сварочных установок со сварочными приспособлениями. Макеты приспособлений (различные стенды, кантователи, врачатели и манипуляторы) установлены на столе неподвижно и подключены к электросети. Макеты установок (установка на колонне, глагольная и велосипедная тележка, порталная установка, катучая балка) свободно переносятся и подключаются штыревыми разъемами. Выбор оптимального сочетания контролируется загоранием сигнальной лампы и звуковым сигналом (рис. 1).

Работа 2. Выбор оптимальной технологии изготовления балок и блоков обечайек. Макеты заготовительного (правильные и гибочные вальцы, порталная установка для газорезки, гильотина, дробеструйная установка и др.), сборочно-сварочного (стенды для сборки полотнищ, кольцевых швов) и

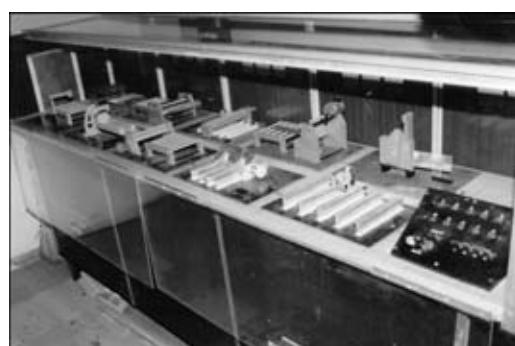


Рис. 1. Макеты механического и сварочного оборудования для изготовления двутавровых балок (линия)

Бадаев Анатолий Сергеевич — доцент кафедры сварочного производства.

Николаенко Станислав Владимирович — выпускник ЧГТУ 2000 г., аспирант кафедры сварочного производства.

© А. С. Бадаев, С. В. Николаенко, 2001

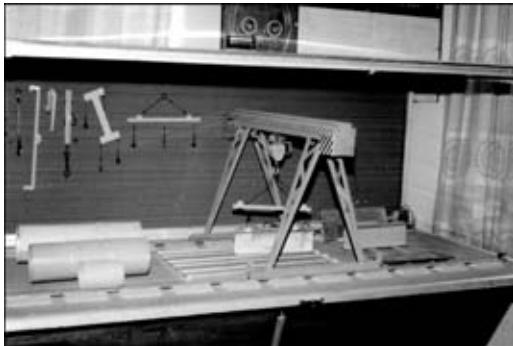


Рис. 2. Макеты транспортно-такелажных средств и приспособлений для перемещения листовых заготовок, двутавровых балок и обечаек

сварочного (стенды для сварки полотниц с двух сторон, сварки продольного и кольцевого швов и др.) оборудования представляют собой объекты, которые могут устанавливаться на столах только в одном положении. Студенты располагают макеты в определенной последовательности для двух вариантов изготовления балок или обечаек. Правильность расположения макетов контролируется герконовыми датчиками на платах и столе и высвечиваются цепочкой ламп на пульте управления.

II группа. Показательные модели. Действующие модели оборудования и макеты изделий, воспроизводящие оригинал во всех деталях как снаружи, так и внутри, используются для передачи информации о его внешнем виде и наглядной демонстрации устройства и принципа действия оборудования.

Работа 3. Силовые узлы. Для оценки усилий и оперативности работы используется комплект механических (клин, эксцентрик, талреп, пружина и рычаг) и пневматических (пневмоцилиндр и пневмокамера) прижимов. Все прижимы оснащены парными опорами, позволяющими устанавливать узлы в захваты разрывной машины для использования ее силоизмерителя. В работе наглядно демонстрируются оперативные возможности всех узлов.

Работа 4. Универсальные сборочные приспособления (УСП). Комплект УСП состоит из упоров, прижимов и опорной плиты с Т-образными пазами. Оснастка позволяет быстро выполнить простейшие приспособления для сборки и с их помощью собрать типовые сварные узлы (балка, узел фермы, рама, арматурная сетка, труба из корыт, труба с фланцем).

Работа 5. Транспортные приспособления. Построена модель эстакады цеха металлоконструкций, оснащенная действующей моделью козлового крана для переноски металла и готовых сварных конструкций. На стенке стола размещен комплект грузоподъемных приспособлений (стропы, чалочные цепи, траверсы с различными захватами, в том числе и с электромагнитами). После ознакомления с возможностями различных приспособлений путем хронометрирования производится сравнительный анализ операций транспортировки одного изделия, выполненных с их помощью (рис. 2).

Considered are the processes of simulation and modeling of the method and technology for the fabrication of welded structures under the training process conditions. Described are some laboratory works in speciality «Fabrication of Welded Structures».



Рис. 3. Макеты роботизированного комплекса по транспортировке и сварке обечаек

Работа 6. Роботизация сварочного производства. Ее модель состоит из двух частей (рис. 3):

на столе размещены два манипулятора для сварных изделий, в которых укреплены трубы. Для обслуживания манипуляторов имеются два сварочных робота, перемещаемых вдоль оси изделий. Согласно программам, роботы и манипуляторы работают либо одновременно, либо поочередно. В зависимости от задаваемых программой движений на изделиях завариваются продольные, кольцевые или спиральные швы;

на столе расположен робототехнический комплекс, который по программе собирает трубы из двух корыт с поочередной переноской, укладкой и прижатием. Завершают работу два сварочных робота, заваривающих два продольных шва.

III группа. Передача сходства формы оборудования при достаточно близком содержании моделируемых процессов. Создание действующей модели производства является наиболее трудно осуществимой задачей.

Работа 7. Участок по изготовлению блоков обечаек и двутавровых балок. Трудность создания модели действующего производства состоит в том, что нужно обеспечить хорошую наглядность обучения и показать физическую сущность процессов заготовки и сварки. Миниатюрное производство макетов сварных конструкций на действующих моделях производственного оборудования включает правильные вальцы, гильотину, гибочные вальцы, стенд для сварки продольного стыка обечайки, велосипедную тележку с плавильником (сварочной головкой), роликовый стенд, двухстоечный кондуктор-кантователь. Все оборудование связано рольгангами и расположено на трех лабораторных столах. В процессе работы могут быть получены достаточно прочные и внешне похожие на реальные двутавровая балка с четырьмя продольными швами и блок обечаек с двумя продольными и одним кольцевым швами.

Таким образом, деловые игры с использованием макетов и моделей позволяют дать студентам необходимые знания и навыки по вопросам техники и технологии производства сварных конструкций и их оптимизации.

Поступила в редакцию 06.04.2001,
в окончательном варианте 05.05.2001

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ СОЕДИНЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ С МЕТАЛЛОМ

Ю. Г. ЗАДОРОЖНЫЙ, канд. техн. наук (КБ «Контакт» г. Чернигов),
В. Я. ГРЕБЕНИЧЕНКО, инж. (Черниг. гос. технол. ун-т)

Проведена оценка взаимодействия материалов в сварном соединении пьезокерамики с медью через барьерную прослойку хрома. Определены блокирующее влияние хрома на диффузию висмута в медь, а также диффузия висмута, которая не превышает толщины барьерного слоя хрома.

Ключевые слова: диффузионная сварка пьезокерамики с медью, высокотемпературные датчики вибрации, давление, ускорение, барьерная прослойка хрома

В измерительной технике для решения специализированных задач контроля технологических процессов используются металлопьезокерамические датчики пульсации давления и пьезоакселерометры, работающие при температуре до 600 °C [1], в которых применяется пьезокерамика марки ТВ-2 [2], в основном состоящая из оксидов титана и висмута. При ее соединении с медью и в процессе эксплуатации компоненты пьезокерамики (ПК) вступают с конструкционным материалом в химическое взаимодействие, образуя в зоне контакта легкоплавкие соединения меди с висмутом, которые приводят к разрушению сварного узла. Поэтому здесь необходимо вводить промежуточные барьерные прослойки (БПр) металлов, предотвращающие это явление.

Целью работы являлось исследование переходной зоны сварного соединения висмутодержащей керамики с медью через БПр хрома.

Оценка взаимодействия керамики с металлом при сварке в твердой фазе показывает, что для анализа переходную зону сварного соединения искусственно можно разделить на три составные (рис. 1): зону диффузионного проникновения компонентов керамики в металл, зону реакционной диффузии и зону диффузионного проникновения компонентов металла в керамику. Конструктивно зоны прилегают друг к другу, а их толщина зависит от особенностей взаимодействия материалов. Зона I — проникновение компонентов керамики в металл может быть проанализирована по двойным диаграммам. Зона III — по изменению состава (структуре) керамики. Зона II — продукт химического взаимодействия входящих в керамику оксидов и металла.

В качестве материала БПр, блокирующей влияние висмута в сварном соединении, был выбран хром, что обусловлено его специфическими характеристиками. Хром обладает нерастворимостью с висмутом, имеет ограниченную растворимость с

медией и химически стойкими оксидами [3–5]. Тонкие слои хрома достаточно технологично наносят на поверхность керамики или металла вакуумным термическим испарением. Кроме того, образование химически стойких оксидов хрома в переходной зоне сварного соединения дополнительно усиливает эффект блокирования.

При изготовлении рабочих конструкций и шлифов диффузионную сварку ПК на основе титаната висмута ТВ-2 с медью проводили при температуре 860 °C, давлении сжатия 1 МПа, времени сварки 600 с, вакууме не хуже 1,3·10⁻³ Па. Медные детали перед сваркой травили в растворе серной кислоты 10 г/л и калиевого хромпика 50 г/л. Непосредственно перед сваркой детали протирали в спирте.

Шлифы сварных узлов изготавливали в соответствии с рекомендациями [5–7]. Сварные узлы шлифовали под углом около 90° к поверхности контакта сваренных материалов и полировали с применением алмазных паст (АСМ 7/10, АСМ 3/2, АСМ 1/0) в направлении ПК → Си для предотвращения наклона и попадания частиц меди в поры ТВ-2. Полученные шлифы обезжиривали в ацетоне и спирте.

Для получения микроструктуры переходной зоны в соединении ТВ-2 + Cr в качестве травителя использовали 10 %-ный раствор H₂SO₄.

Оценку переходной зоны сварного соединения ТВ-2 + Cr проводили металлографическим методом, методом фазового контраста, по изменению микротвердости в переходной зоне и сканограммам поверхности шлифа, полученным на растровом электронном микроскопе.

Характер распределения элементов в зоне соединения проводили методами оптической и растровой электронной микроскопии с использованием микроскопа JSM-35CF.

В ходе исследований переходной зоны методом фазового контраста (рис. 2) выявлено несколько

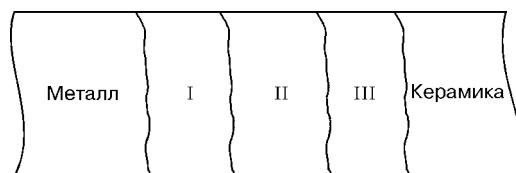


Рис. 1. Схема переходной зоны сварного соединения (обозначение I–III см. в тексте)

Задорожный Юрий Григорьевич — выпускник ЧФ КПИ 1976 г., директор КБ «Контакт».
Гребениченко Виталий Яковлевич — выпускник ЧФ КПИ 1987 г., ассистент кафедры сварочного производства.

© Ю. Г. Задорожный, В. Я. Гребениченко, 2001

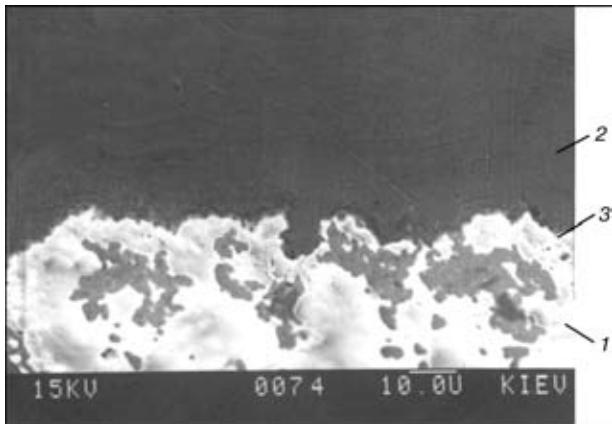


Рис. 2. Микроструктура соединения ТВ-2 + Cr + Cu (косой шлиф под углом ~ 9°, X540): 1 — пьезокерамика; 2 — медь; 3 — хром (травитель 10 %-ный раствор H₂SO₄)

фаз переходной зоны, отличающихся контрастностью. Наибольшие изменения в переходной зоне сварного соединения ПК + Cr характеризуются более светлым полем сканограммы поверхности ПК по сравнению со сканограммой исходной керамики. Это связано с увеличением среднего атомного номера ПК, что обусловлено повышением концентрации висмута в результате его удаления из зоны реакционной диффузии вследствие вытеснения висмута из его оксида хромом. Переходная зона сварного соединения распределена неравномерно к поверхности косого шлифа, что, вероятно, обусловлено неравномерно распределенной плотностью по объему ПК (пористостью). Более темное поле сканограммы по сравнению с ПК связано с уменьшением атомного номера фазы (меньше среднего ПК), что вызвано диффузией хрома в ПК. Общая протяженность зоны перехода ПК + Cr не превышает 6 мкм.

Оценить переходную зону Cr + Cu по сканограммам шлифа не представляется возможным. Изменения контраста сканограммы шлифа в переходной зоне Cr + Cu не отмечается. Это, вероятно, свя-

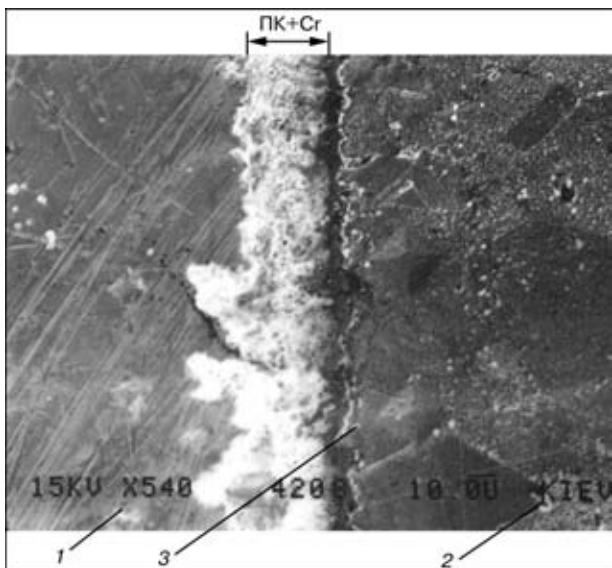


Рис. 3. Сканограмма шлифа во вторичных и отраженных электронах (косой шлиф под углом 9°, X1000): 1 — пьезокерамика; 2 — медь; 3 — переходная зона

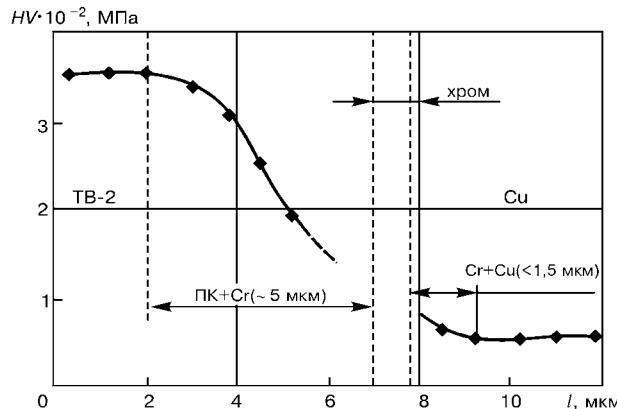


Рис. 4. Изменение микротвердости в переходной зоне соединения ТВ-2 + Cr + Cu (косой шлиф под углом ~ 9°)

зано с близкими атомными номерами элементов хрома и меди или незначительной концентрацией хрома в переходной зоне Cr + Cu, что не позволяет применить метод фазового контраста.

На рис. 3, сделанном в отраженных и вторичных электронах, отчетливо видна БПр хрома и переходная зона соединения ТВ-2 + Cr (белое поле). Зона растворения ПК достигает до 5 мкм.

Оценку переходной зоны по изменению микротвердости соединения ТВ-2 + Cr + Cu производили по методике, изложенной в работах [3, 7].

Исследования показали, что изменение микротвердости имеет место только вблизи поверхности контакта материалов (рис. 4). В зоне потемнения ПК размером до 0,1 мм изменения микротвердости ПК от среднего значения не обнаружено. Снижение микротвердости вблизи зоны перехода ПК + металл, вероятно, связано с изменением состава ПК из-за диффузионных процессов в соединении. Изменение микротвердости в ПК фиксируется на расстоянии менее 5 мкм от поверхности контакта ПК—Cr. Изменения микротвердости в меди имеют меньший размер и не превышают 1,5 мкм (рис. 4).

Микрорентгеноспектральный анализ характера распределения элементов производили на спектрометре энергетической дисперсии (СЭД) рентгеновских лучей «Линк-860» и «Ортек» по методике, приведенной в работе [8].

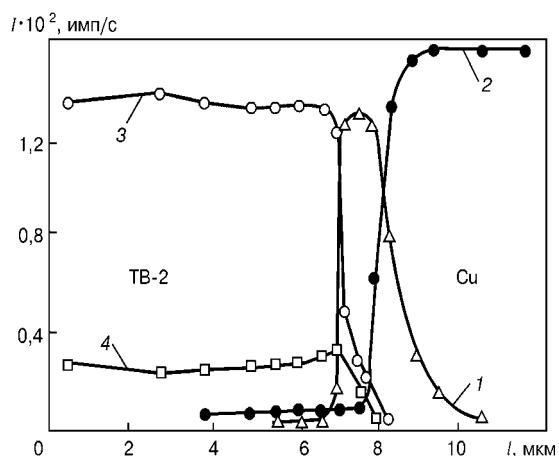


Рис. 5. Зависимость интенсивности излучения элементов в переходной зоне соединения ТВ-2 + Cr + Cu (измерение по точкам): 1 — CrK_α; 2 — CuK_α; 3 — BiK_α; 4 — TiK_α (косой шлиф под углом ~ 9°)

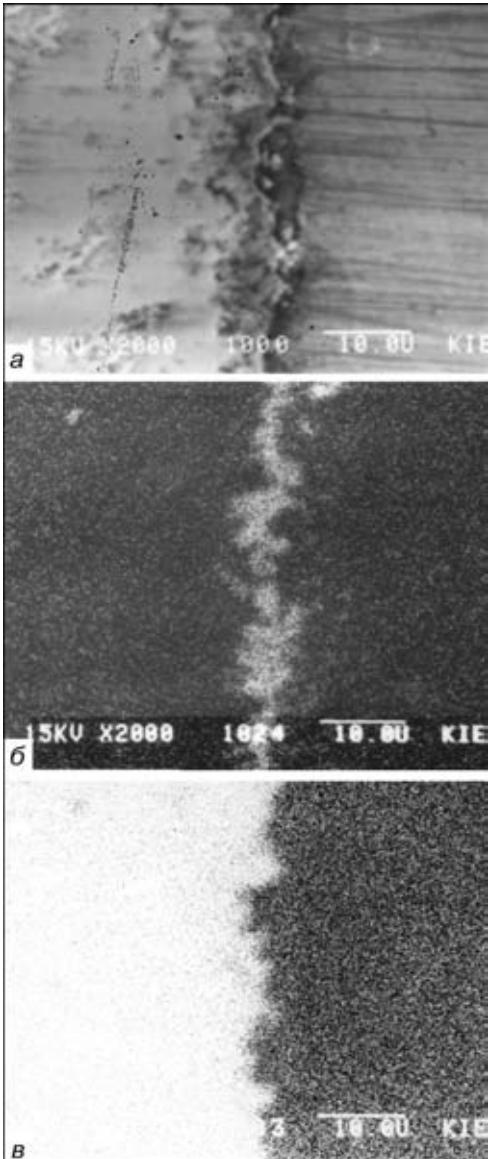


Рис. 6. Сканограммы косого шлифа соединения ТВ-2+Cr+Си в характеристическом излучении: *а* — во вторичных и отраженных электронах; *б* — то же в лучах $\text{Cr}K_{\alpha}$; *в* — то же в лучах $\text{Bi}K_{\alpha}$

Микрорентгеноспектральный анализ элементов в переходной зоне соединения проводили на СЭД по точкам. Вблизи БПр шаг точек микроанализа составлял 2...3 и 5 мкм на расстоянии более 10 мкм от БПр.

Полученные зависимости интенсивности излучения элементов (рис. 5) в зоне контакта материалов показывают, что при сварке на предельно допустимом для ПК ТВ-2 режиме хром диффундирует как в ПК, так и в медь. Проникновение хрома в ПК не превышает 1,5, а его же в медь — 2,0 мкм. Медь диффундирует через прослойку хрома в ПК на глубину до 5 мкм. Диффузия компонентов ПК ТВ-2 висмута титана значительно ограничивается БПр хрома. Проникновение висмута в соединении не превышает толщины БПр хрома, менее 0,5 мкм.

Для определения характера распределения элементов в переходной зоне сварного соединения ТВ-2 + Cr + Си производили запись изображения в характеристических лучах $\text{Cr}K_{\alpha}$ и $\text{Bi}K_{\alpha}$. Анализ сканограмм косого шлифа показал, что БПр хрома

(рис. 6, *а*) блокирует взаимное проникновение висмута и меди. На сканограммах шлифов отчетливо видно, что распределение элементов висмута (рис. 6, *в*) не пересекает распределение элементов хрома (рис. 6, *б*). Последнее характеризуется значительной неравномерностью, что, вероятно, связано с неравномерным проникновением хрома в ПК.

Проведенные измерения характера распределения элементов показывают, что переходная зона сварного соединения асимметрична. Диффузионные зоны составляют менее 3 мкм в медь и менее 6 мкм в ПК от БПр хрома. БПр хрома значительно ограничивает взаимную диффузию компонентов ПК и меди. Проникновение висмута в соединение не превышает толщины БПр хрома. Это обеспечивает эффект блокирования и исключает образование легкоплавкой эвтектики висмута и меди.

Оценку изменения структуры пьезокерамики в переходной зоне сварного соединения проводили по результатам фрактологического анализа поверхности излома соединения. Сварной металлопьезокерамический узел разрушали по ПК. Анализ проводили на образцах с поверхностью разрушения, расположенной под углом 8...15° к плоскости контакта свариваемых материалов. Это позволяет увеличить анализируемый размер зоны перехода ПК + Cr в 5...10 раз. Для получения более контрастной сканограммы на поверхность ПК напыляли никель под углом 35...40° к поверхности излома. Пленку никеля наносили для исключения образования статического разряда на поверхности анализируемой керамики и обеспечения необходимой контрастности снимка.

На рис. 7, *а* показана структура излома, включающая переходную зону соединения ТВ-2 + Cr. На поверхности излома отчетливо видна фаза, отличная по структуре излома от ПК ТВ-2. Для уточнения состава фазы проведен ее микрорентгеноспектральный анализ. Измерения проводили в точках излома, характерных для ПК, фазе с измененной структурой и переходном слое. Сравнение результатов измерения интенсивности излучения элементов у фазы с измененной структурой показали, что она дополнительно включает элементы хрома и меди (рис. 7, *б*). Оценка протяженности фаз с измененной структурой, проведенная по фрактограмме, показала, что изменения по поверхности излома ПК не превышают 15 мкм. Это, учитывая наклон поверхности излома к плоскости сварки, соответствует протяженности переходной зоны соединения ПК + Cr, равной 3...4 мкм.

Проведена оценка блокирующих свойств БПр. В процессе диффузионной сварки или термообработки при эксплуатации висмут диффундирует через БПр хрома. В результате взаимодействия висмута и меди образуется легкоплавкая эвтектика с температурой плавления $T_{\text{пл}} = 271^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{пл}}$ висмута равна 270°C). При охлаждении в результате различия между коэффициентами термического расширения ПК и меди в зоне контакта материалов появляются термические напряжения, имеющие максимальные значения в зоне контакта материалов [3]. При образовании между прослойкой хрома и медью эвтектики меди и висмута соединение будет

разрушаться, причиной чего является наличие жидкой фазы в контакте между свариваемыми материалами. Таким образом, максимальное время эксплуатации сварного соединения ТВ-2 + Cr + Cu будет ограничено временем образования эвтектики меди и висмута.

В процессе диффузионного массообмена прослойка хрома «рассасывается» в свариваемых материалах. При этом ее эффективная толщина увеличивается. Толщина БПр возрастает за счет образования переходных слоев Cr + Cu и Cr + ПК, которые также обладают повышенным «сопротивлением» диффузии висмута. Со стороны ПК от БПр — это многокомпонентная шпинель на основе компонентов ПК и химически стойкого оксида хрома. Со стороны меди от БПр — это зона диффузионного легирования меди хромом. Оценивая распределение элементов БПр в сварном соединении, по сканограмме шлифа в характеристическом излучении (см. рис. 6, б) можно видеть, что она увеличилась в 1,5...2,0 раза. Исходная до сварки толщина БПр хрома равна 0,4...0,5 мкм. По сканограмме шлифа 0,8...1,1 мкм.

Минимальное время блокирования БПр хрома образования легкоплавкой эвтектики висмута и меди включает: 1) время диффузии висмута через прослойку хрома; 2) время ожидания [9]. Оценить время диффузии висмута через хром в медь, можно использовав зависимость из [9]

$$\tau_d = \frac{\delta}{2D}, \quad (1)$$

где δ_d — толщина БПр хрома (эффективная); D — коэффициент диффузии висмута через хром.

Оценить время ожидания, связанное с образованием новой фазы, нельзя, так как неизвестна толщина новой фазы.

Коэффициент диффузии висмута через прослойку хрома определяли по методу Матано—Больцмана. Для чего использовали полученную экспериментальную зависимость интенсивности излучения элементов в переходной зоне сварного соединения от длины шлифа (см. рис. 5). Расчет проводили по формуле из [9]:

$$D = -\frac{1}{r} \tau_{cb} \frac{dx}{dc} \int_0^c x dc, \quad (2)$$

где τ_{cb} — время сварки; dx/dc — угол наклона касательной к концентрационной кривой; $\int_0^c dc$ — площадь под кривой распределения элементов.

Коэффициент диффузии висмута через прослойку хрома при температуре $T = 877^\circ\text{C}$ равен $2,6 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2/\text{с}$.

Расчет минимального времени блокирования БПр хрома образования легкоплавкой эвтектики меди и висмута проводили без учета времени ожидания при образовании новой фазы в соединении. Для толщины БПр, равной 1 мкм, допустимое время блокирования равно

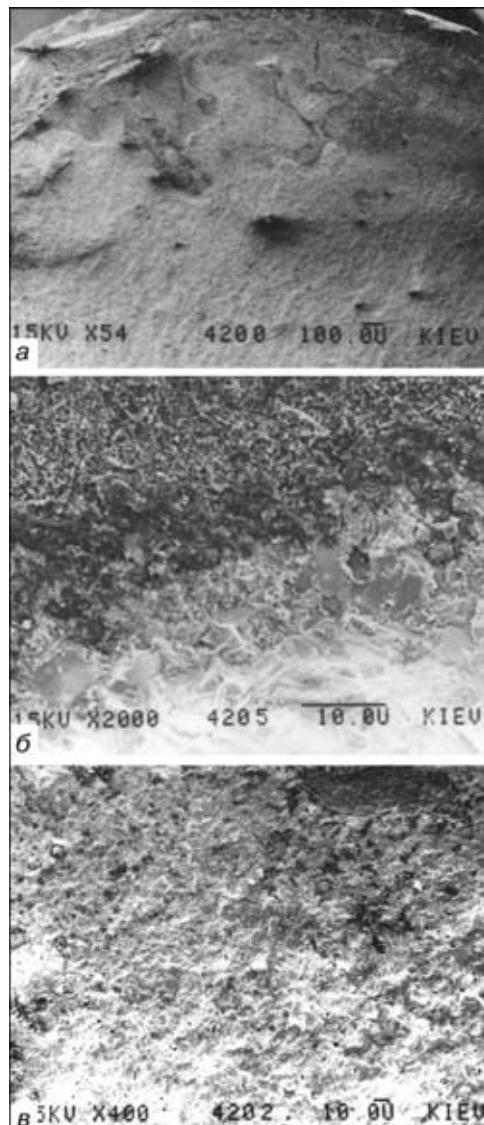


Рис. 7. Фрактограмма поверхности излома сварного соединения ТВ-2 + Cr + Cu (во вторичных и отраженных электронах): а — сварное соединение; б — переходная зона ПК + Cr, ×2000; в — переходной зоны ПК + Cu, ×400

$$\tau_{ma} = \frac{\delta}{2D} = \frac{(1 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 2,6 \cdot 10^{-16}} = 1,9 \cdot 10^3 (\text{с}), \quad (3)$$

в течение которого БПр хрома будет сохранять эффект блокирования и препятствовать образованию жидкой фазы (эвтектики меди и висмута) в сварном соединении.

Выходы

1. Оценка взаимодействия материалов в сварном соединении ПК + Cr + Cu при диффузионной сварке на режиме, близком к предельно допустимому для ТВ-2, показала, что хром, обладающий взаимной нерастворимостью с висмутом, ограниченной растворимостью с медью и высокой стойкостью к окислению, обеспечивает блокирующее влияние висмута в соединении ПК + Cu.

2. Измерения протяженности переходных зон, характера распределения в них элементов, изменения структуры ПК у соединений ТВ-2 + Cr + Cu, через БПр хрома толщиной 0,45 мкм, показали, что

протяженность диффузионных зон ПК + Cr и Cr + + Cu соответственно лежит в пределах менее 2 и 6 мкм. В переходной зоне ПК + Cr формируется фаза с большим, чем у ПК, размером зерна протяженностью до 4 мкм; проникновение висмута в хром не превышает толщину БПр, что исключает образование легкоплавкой эвтектики меди и висмута и обеспечивает блокирование.

1. Джагупов Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике. — Л.: Машиностроение, 1986. — 256 с.
2. А. с. 497267 СССР, МКИ С 04 В 35/00. Керамические материалы / Ю. А. Вусевкер, Л. Т. Еремин, Ю. В. Гуревич и др. — Опубл. 1975, Бюл. № 48.

Interaction of materials in a bond between piezoceramics and copper, made through a chromium barrier interlayer, has been evaluated. The blocking effect of chromium on diffusion of bismuth into copper, as well as the value of diffusion of bismuth, which is not in excess of thickness of the chromium barrier layer, have been estimated.

3. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка материалов. — М.: Машиностроение, 1981. — 271 с.
4. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии: Пер. с англ. — М.: Мир, 1985. — 486 с.
5. Смитз К. Дж. Металлы / Пер. с англ. под ред. С. Г. Глаузова. — М.: Металлургия, 1980. — 447 с.
6. Биркс Л. С. Рентгеновский микроанализ с помощью электронного зонда. — М.: Металлургия, 1966. — 216 с.
7. Коваленко В. С. Металлографические реактивы: Справочник. — М.: Металлургия, 1971. — 107 с.
8. Кальнер В. Д., Зильберман А. Г. Практика микрозондовых методов исследования металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1981. — 216 с.
9. Лариков Л. Н., Исачев В. И. Диффузия в металлах и сплавах. — Киев: Наук. думка, 1987. — 510 с.

Поступила в редакцию 06.04.2001

The advertisement features a large circular graphic with a gear design. Inside the circle, the text "22 - 26 жовтня" (October 22 - 26) is at the top left, and "Машинобудування для всіх галузей промисловості" (Machine building for all industries of industry) is written diagonally across the bottom right. The main title "КИЇВМАШ" is in large, bold letters, with "2001" in a larger font below it. To the left of the main title, there is smaller text: "ТРЕТЬЯ НАЦІОНАЛЬНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА". At the very bottom of the circle, there is contact information: "МСП, 03680, м. Київ, пр-т Академіка Глушкова, 1", "Національний комплекс "Експоцентр України\"", "Тел.: (044) 251-91-13, 251-91-14", "Факси (044) 251-91-11 (12)", "E-mail:sarapulova@nvc.ukrsat.com", and "www.expocenter.com.ua". Above the circle, the text "НАЦІОНАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС "ЕКСПОЦЕНТР УКРАЇНИ"" is displayed, along with the logo of the National Complex "ExpoCenter Ukraine". Below the main circle, there are several logos for different organizations: "Автоматична сварка", "Сварщик", "УКРАЇНА", "Всесвітні виставки", "ГЕРМАНІЯ", "ЕСТОНІЯ", and "СТОЛІТНІЙ".

УДК 621.791.52

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДАЕМЫХ В ВАКУУМЕ

В. И. СЕРДЮК, инж. (Чернигов. НПП «Дельта-С»), **О. В. ГНАТЮК**, инж. (Чернигов. гос. технол. ун-т)

Рассмотрены вопросы создания качественных покрытий различного назначения на полимерах, стеклах, металлах. Показаны пути совершенствования технологических процессов нанесения покрытий.

Ключевые слова: вакуумное термическое напыление, качество вакуумных покрытий, новые технологии, оборудование

Ранее процессы обработки материалов с использованием научноемких технологий традиционно считались дорогостоящими и применялись преимущественно в таких отраслях промышленности, как оборонная, космическая, ядерная энергетика и т. д. В последние годы спрос на эти технологии возросла при изготовлении продукции, но при этом возникла необходимость учета технических и экономических сторон использования таких технологий.

Практика показывает, что при решении конкретных технологических задач периодически приходится сталкиваться с взаимоисключающими требованиями. Например, требуется получить покрытие или оптически прозрачное и отличающееся минимальным электросопротивлением (для систем экранирования от радиопрослушивания), или высокой прочности на мягкой подложке (опоры трения, различные фрикционные узлы), или тонирующее большой площади ($2\dots 5\text{ м}^2$) с высокой степенью равномерности и т. д.

Первоочередным фактором получения качественного покрытия является высокая адгезия с подложкой. Фактически решение данного вопроса относится к диффузионной сварочной технологии, которая предусматривает получение равномерного соединения двух материалов (в нашем случае наносимого слоя и подложки). Данный процесс можно рассматривать как исправление дефекта в твердом теле, а сварку — как способ ликвидации такого дефекта. Но в отличие от канонического случая, когда свариваемые материалы характеризуются сродством (взаимная растворимость, малая разность КЛР), материал подложки по своим физико-механическим свойствам довольно часто существенно отличается от наносимого покрытия (металл+полимер, металл+стекло, полупроводник+металл) [1, 2].

Достаточно обширным является арсенал средств и технологий нанесения покрытий. Ниже рассматриваются два примера, демонстрирующих, что не всегда прямой перенос традиционных технологий позволяет получать новую продукцию заданного качества. В каждом конкретном случае необходимо

Сердюк Валерий Иванович — выпускник ЧФ КПИ 1982 г., директор НПП «Дельта-С».
Гнатюк Олег Валентинович — выпускник ЧФ КПИ 1977 г., зав. лабораториями кафедры сварочного производства.

© В. И. Сердюк, О. В. Гнатюк, 2001

учитывать особенности того или иного способа нанесения покрытий. Проблема состоит в том, что в классической теории нанесения декоративных, упрочняющих, функциональных покрытий большинство авторов основываются на законе Рауля [3]:

$$\frac{P_A - P}{P_A} = N_B (N_A + N_B) = n_B,$$

где P_A — давление насыщенных паров компонента A ; P — давление паров компонента A с примесью; N_A , N_B — число молей компонентов A , B ; n_B — молярная доля примеси B .

Суть этого закона состоит в том, что при увеличении содержания легирующего компонента B давление паров наносимого основного компонента A снижается пропорционально росту молярной доли компонента B .

Пренебрежение основными постулатами этого закона привело, в частности, к тому, что на законодательном уровне (ТУ 01.003986001-94) в разряд стандартных отнесена технология испарения конечной навески алюминия из вольфрамового испарителя для получения отражающего слоя на зеркалах. Скрытым дефектом этой технологии оказалось нанесение покрытий из интерметаллида, что неизбежно при испарении конечных навесок из-за ограниченной взаимной растворимости алюминия в вольфраме. На практике только 15...20 % изначально наносимого материала (для установок типа УВН-15, УВ-18) соответствует требованиям ГОСТ 17716-91 по отражающим свойствам, остальное — это переходящий фракционированный слой интерметаллида. Долговечность такого покрытия крайне низкая, потускнение, отслоение отражающего слоя зафиксировано через 1,5...2,0 мес эксплуатации.

Для устранения подобного дефекта предложена частичная модернизация оборудования и изменение технологического процесса. Доработка оборудования заключается в установке оригинальных систем ионной очистки и тигельного испарения (монтируются практически на весь парк вакуумного оборудования СНГ). Система ионной очистки снабжена дифференциальным натекателем и позволяет выполнять обработку поверхностей для нанесения покрытий аномальным ионным разрядом. Режим очистки ($U = 5000\dots 7000\text{ В}$, $I = 0,5\dots 1,5\text{ А}$) характеризуется такой эффективностью, что даже резистивный способ испарения позволяет достичь прочности сцепления покрытия на уровне 250...270 МПа. Ис-

пользование тиглей из алюмооксидной керамики сводит влияние материала испарителя на наносимое покрытие практически к нулю.

Второй пример нерационального использования технологических возможностей оборудования состоит в получении упрочняющих покрытий на основе нитрида титана на металлорежущем инструменте. Согласно существующему типовому технологическому процессу «Покрытия ионноплазменные для режущего инструмента» (ОСТ 4.054.070–85), очистка покрываемых поверхностей производится способом импульсной бомбардировки ионами распыляемого материала катода. Высокая эффективность такой очистки сопровождается отрицательным явлением — значительным зональным нагревом поверхности детали при большом давлении остаточных газов в вакуумной камере. Такого рода воздействие, а также раздельность процессов очистки и нанесения покрытия приводят к образованию на поверхности детали вторичных оксидов, очагов с глубоким диффузионным внедрением карбидов, к росту зерна, появлению микротрещин. Микротвердость полученного покрытия не превышает 16000 МПа. Существенное изменение технологии приводит к значительному повышению микротвердости покрытия (в среднем до 25000 МПа). Суть изменения заключается в реализации непрерывного процесса, совмещающего очистку и нанесение. Посредством придания подложке постоянного отрицательного потенциала удается достичь того, что высокоэнергетические частицы, попадая на подложку

и внедряясь в нее, могут нейтрализоваться и отражаться как нейтральные или метастабильные частицы. Это позволяет вызвать вторичную электронную эмиссию с распылением материала подложки.

Установлено, что при реализации такого способа очистки стабилизация ионного тока при напряжении ускорения 3 кВ и давлении азота в камере 5 Па происходит уже через 5 мин. Это дает возможность сократить процесс обработки в два раза при значительном улучшении качества покрытия. Устройство плавного регулирования, разработанное для установки «Булат-6», позволило достичь скорости осаждения покрытия на детали диаметром 30 мм до 12...17 мкм/ч.

Таким образом, не следует практиковать «слепой» перенос технологий вакуумного осаждения, применяемых в производстве с нанесением функциональных покрытий на изделия сходного типа.

Нежелательно брать за основу сопутствующие технологические процессы, поставляемые в качестве рекомендуемых совместно с вакуумным оборудованием, так как универсальность чаще всего вредит качеству.

1. Кречмар Э., Шварц Г. Напыление металлов, керамики и пластмасс. — М.: Машиностроение, 1966. — 432 с.
2. Костржицкий А. И., Лебединский О. В. Многокомпонентные вакуумные покрытия. — М.: Машиностроение, 1987. — 208 с.
3. Кучеренко Е. Т. Справочник по физическим основам вакуумной техники. — Киев: Вищ. шк., 1981. — 264 с.

Considered are the issues associated with production of different- application quality coatings on polymers, glasses and metals. Shown are the ways of improving the coating deposition processes.

Поступила в редакцию 06.04.2001

УДК 621.791.754

ТРЕТЬЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ВОДОРОДНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ»

14–18 мая в Донецке состоялась Третья международная конференция «Водородная обработка материалов» (ВОМ-2001), которая проводилась под патронатом Совета Межпарламентской ассамблеи стран-участниц СНГ и Донецкой облгосадминистрации. Соучредителями конференции выступили Международная инженерная академия (МИА), Международная ассоциация по водородной энергетике (МАВЭ), Государственный комитет промышленной политики Украины, Министерство образования и науки Украины, а также другие организации. Конференцию поддержали крупные промышленные предприятия Украины — ОАО «Харцызский трубный завод», ОАО «Металлургический завод «Азовсталь», ОАО «Концерн «Стирол», а также 14 журналов США, России и Украины. В состав Международного почетного комитета вошли ученые с мировыми именами: президент МАВЭ Т. Н. Везироглы (США), вице-президент Королевской ирландской Академии наук Ф. Льюис (Великобритания), президент МИА Б. В. Гусев (Россия), академик НАН Украины И. К. Походня (Украина), руководители ряда центральных ведомств, крупных предприятий и организаций Украины и России. Международный научно-организационный комитет возглавлял, как и на предыдущих конференциях ВОМ, академик МИА, профессор В. А. Гольцов (ДонГТУ, Донецк).

Конференция была посвящена 80-летию Донецкого государственного технического университета. В ее работе приняли участие около 130 человек из 60 организаций Украины, России, США, Великобритании, Польши, Испании, Японии, Ливии; было заслушано и обсуждено более 90 аудиторных докладов и около 30 стендовых. От ИЭС им. Е. О. Патона участвовала небольшая делегация (5 сотр.), представившая 7 докладов.

На открытии конференции участников приветствовали ректор ДонГТУ, профессор А. А. Минаев, академик НАН Украины И. К. Походня, президент Инженерной академии наук (ИАУ) А. И. Васильев, представитель Донецкой облгосадминистрации С. В. Кольцов. Профессору Т. Н. Везироглы (США) — одному из основоположников крупномасштабной концепции об экологически чистой водородной энергетике — был вручен диплом почетного доктора ДонГТУ, а профессору Ф. Льюису (Великобритания) — медаль и диплом МАВЭ за открытие эффекта при диффузии водорода в палладии и его сплавах, получившего название «эффект Льюиса». Дипломами МАВЭ был награжден также ряд наиболее активных участников водородного движения.

Генеральное направление конференции формулировалось так: водород и материалы — эффективность и безопасность современных водородоемких производств и проблемы перехода к водородной цивилизации будущего. Работа конференции традиционно проходила в двух секциях. В первой рассматривались вопросы теории и технологии водородной обработки материалов: водород как постоянный и временный легирующий элемент, его растворимость, диффузия и влияние на свойства материалов; индуцированные водородом фазовые превращения, эффекты, явления; пути и перспективы улучшения физических, механических и химических свойств металлических и неметаллических материалов.

Во второй секции обсуждалась проблема деградации механических свойств металлов под влиянием водорода.



Приветственное слово академика НАНУ И. К. Походни на открытии конференции

Освещались вопросы дегазации металлов. Особое внимание уделялось водородной хрупкости, водородной стресс-коррозии и флокенам в стали. Рассматривались технологии предупреждения водородной деградации свойств сталей и сплавов. В отличие от предыдущих конференций ВОМ работа этой секции значительно интенсифицировалась: увеличилось представительство производственных предприятий (металлургических, химических, трубопроводного транспорта), возросло количество докладов, подготовленных их сотрудниками.

В докладе, прочитанном на пленарном заседании конференции перед началом работы секций, академик И. К. Походня обобщил мировой опыт по проблеме наиболее опасного влияния водорода при изготовлении стальных конструкций — холодного растрескивания сварных соединений; представил результаты новых исследований, выполненных в ИЭС по этой проблеме, изложил пути ее решения.

В секционных докладах от ИЭС им. Е. О. Патона были представлены: новая физическая модель водородной хрупкости стальных изделий (В. И. Швачко); результаты экспериментального изучения водородных ловушек в сварных швах (С. Н. Степанюк) и роли водорода в обра-





зовании трещин при сварке труб большого диаметра из штапковых сталей (О. Д. Смиян).

К началу конференции вышел двухтомник трудов.

Состоялась презентация книги на английском языке, являющейся коллективным трудом авторов из десяти стран мира, «Успехи водородной обработки материалов». В ней изложены последние достижения в исследованиях взаимодействия водорода с металлическими и другими материалами. Главу «Водород в сварочных процессах» написали И. К. Походня и В. И. Швачко.

Как и на предыдущих конференциях ВОМ, слаженно и эффективно работали оргкомитет и рабочая группа ВОМ-2001. Кроме участия в официальных заседаниях, делегаты

имели возможность неформального общения: работал «Клуб водородчиков», проводились выездные заседания секций. Новинкой было рекламное представление спонсоров и других заинтересованных в рекламе организаций участниц конференции.

Итоговыми документами ВОМ-2001 стали Договор о сотрудничестве и координации деятельности по проблемам и перспективам водородной энергетики между ДонГТУ, МАВЭ, МИА и ИАУ, а также Меморандум «О переходе от водородной экономики к водородной цивилизации».

В. И. ШВАЧКО, канд. физ.-мат. наук

УДК 621.791.01

1-я Всеукраинская научно-техническая конференция молодых ученых

22–24 мая на базе кардиологического санатория «Ворзель» (пгт Ворзель, Киевская обл.) прошла 1-я Всеукраинская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии», организованная по инициативе Совета научной молодежи ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. В ее работе приняли участие более 60 молодых ученых и специалистов, которые представляли 12 научных, учебных организаций и предприятий из шести городов Украины. Среди участников были представители из ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины; Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины; НТУУ «Киевский политехнический институт»; Института сверхтвердых материалов им. В. М. Бакуля НАН Украины; Черниговского государственного технологического университета; Приазовского государственного технического университета (г. Мариуполь); АНТК «Антонов» (г. Киев); ОАО «Металлургический завод «Азовсталь» (г. Мариуполь); ОАО «Алчевский металлургический комбинат»; Института импульсных процессов и технологий НАН Украины (г. Николаев); Украинской инженерно-педагогической академии (г. Харьков); Института проблем прочности НАН Украины.

С приветственным словом к участникам конференции обратился академик НАН Украины И. К. Походня.

На конференции были заслушаны доклады по таким направлениям: прогрессивные технологии сварки и соединения материалов; прочность, надежность и долговечность сварных конструкций; технологии наплавки, нанесения покрытий и обработка поверхности; процессы специальной электрометаллургии; новые конструкционные и функциональные материалы; техническая диагностика и неразрушающий контроль; автоматизация процессов сварки и смежных технологий; фундаментальные исследования физико-химических процессов (термодинамика, кинетика, микроструктура, фазовые превращения, электронная структура, свойства).

Всего было заслушано более 50 докладов. Значительная часть их была представлена учеными и специалистами ИЭС им. Е. О. Патона. Тематика их отражала особенности новых методов сварки, технологии электронно-лучевого переплава, методов и средств контроля и автоматизации сварочных процессов. Наибольший интерес был проявлен к докладам, посвященным фундаментальным металлофизическим исследованиям различных участков соединения при сварке, наплавке, а также после термообработки.

Доклады, представленные ФТИМС, осветили новинки в области спецэлектрометаллургии, а также лазерной наплавки и лазерного получения аморфных и квазиаморфных покрытий. Специалисты из НТУУ «КПИ» рассмотрели вопросы прочности и надежности материалов и соединений, нанесения покрытий и повышения срока эксплуатации режущего инструмента. Специалисты ИСМ им. В. М. Бакуля представили доклады по исследованию структур, образующихся при пайке, созданию нового сверхтвердого режущего инструмента и контролю качества обработанной поверхности. Представители ЧГТУ рассказали о работах по порционированию энергии технологической плазмы, а также сварке кремния со стеклом.

Многие доклады вызвали оживленные дискуссии, что свидетельствует о заинтересованности молодых ученых и специалистов чаще встречаться, обсуждать научные и практические результаты их деятельности.

По решению специальной комиссии три лучших доклада были отмечены дипломами и денежными премиями, установленными Международной ассоциацией «Сварка», которые вручил на закрытии конференции академик НАН



Лауреаты 1-й Всеукраинской конференции

Украины Л. М. Лобанов. Диплома I степени и первой премии был удостоен С. Н. Степанюк (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины) за доклад «Особенности холодного растягивания при сварке высокопрочных низколегированных сталей», диплома II степени и второй премии — А. Б. Лесной (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины) за доклад «Численное моделирование гидродинамики и теплообмена при кристаллизации отливок электронно-лучевого переплава», диплома III степени и третьей премии — Е. Н. Бердникова (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины) за доклад «О взаимосвязи структурных параметров с механическими свойствами разнородных соединений, выполненных сваркой давлением».

Участники отметили высокий уровень организации и проведения работы конференции. В частности, плодотворную работу оргкомитета конференции молодых ученых, членов Совета научной молодежи ИЭС им. Е. О. Патона: М. Т. Панько, В. Ю. Хаскина, Е. Н. Бердниковой, В. Е. Федорчука, О. В. Махненко, С. В. Рымара. Большая поддержка в проведении конференции оказана дирекцией ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

Проведение конференции стало возможным благодаря спонсорской благотворительной поддержке коммерческих организаций, а также организаций-членов НТК ИЭС им. Е. О. Патона, в частности акционерного банка «Национальные инвестиции»; инженерного центра «Сварка давлением» ИЭС им. Е. О. Патона; Опытного завода сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона; ООО «Технолуч»; научно-инженерного центра «Экспловелд»; научно-инженерного центра «Электрошлаковые технологии» ИЭС им. Е. О. Патона; научно-технического центра «Сварка и контроль в области атомной энергетики»; фирмы «Инппат»; научно-исследовательского центра «Патон — Азовмаш» ИЭС им. Е. О. Патона; НПО «Червона хвиля»; МО «Интерм»; ООО «Электра»; товарищества «Эпис».

Учитывая мнения участников конференции, Совета научной молодежи и дирекции ИЭС им. Е. О. Патона принято предложение о ежегодном проведении научно-технических конференций молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии», возможно и международных, именуя их «Патоновскими чтениями».

М. Т. Панько, канд. техн. наук

УДК 621.791.009(100)

Научно-техническая конференция «Инженерия поверхности и реновация изделий»

29–31 мая в Феодосии прошла Международная научно-техническая конференция «Инженерия поверхности и реновация изделий», организованная Ассоциацией технологов-машиностроителей Украины. В ее работе приняли участие ученые и специалисты Российской Федерации, Латвии, Белоруссии и Украины. Украину представляли Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского (г. Харьков); Восточноукраинский национальный университет и ОАО «Луганск ПТИМаш» (г. Луганск); Луцкий государственный технический университет (г. Луцк), а также ИЭС им. Е. О. Патона, Института сверхтвердых материалов им. В. М. Бакуля (г. Киев) и др.

На конференции были рассмотрены наиболее актуальные проблемы, связанные с восстановлением и ремонтом поверхности изделий, а также формированием оптимальной поверхности. Большая группа докладов была посвящена технологиям, которые повышают свойства рабочих поверхностей, работоспособность и надежность деталей машин. В докладах участников конференции рассматривались вопросы состояния поверхности, адгезионного сцепления наносимых при ремонте покрытий с матричны-

ми сталью или сплавами, а также улучшения эксплуатационных характеристик поверхностных слоев, прошедших реновационную обработку.

Было заслушано достаточно много докладов, посвященных способам и технологиям нанесения поверхностных покрытий напылением, наплавкой, а также и поверхностного упрочнения электроэррозионной, плазменной, термодиффузационной обработкой; обработкой трением и пр. При этом многие из них имеют достаточно хорошее теоретическое обоснование, зачастую с использованием аппарата математического моделирования.

К недостаткам представленных докладов следует отнести отсутствие статистической обработки результатов экспериментов, что вызывает некорректную интерпретацию результатов по характеристикам и свойствам обработанных поверхностей как при механических испытаниях, так и в условиях, максимально приближенных к нагрузкам, возникающим в процессе эксплуатации. В основном это связано с отсутствием надежных и аттестованных методик испытания.

Повышенный интерес участников конференции вызвали доклады сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона Ю. Н. Тюрина, М. Л. Жадкевича (5 докладов) и Ю. Н. Ланкина, А. А. Бондарева и др. (2 доклада), посвященные модификации поверхности инструмента и тяжело нагруженных изделий в металлургии, детонационному нанесению покрытий, электролитно-плазменному поверхностному упрочнению, а также микроплазменному нанесению упрочняющих материалов на поверхность лопаток турбин с последующим плавлением поверхностного слоя электронным лучом в вакууме.

О новых разработках электронно-лучевого восстановления и поверхностного упрочнения роторов и деталей компрессоров газотурбинных двигателей, которые были внедрены на предприятиях отрасли, сообщил В. А. Гейкин (3 доклада), заместитель директора ОАО «Научно-исследовательского института технологии и организации производства двигателей» (г. Москва).



Участники конференции



Выступление канд. техн. наук В. В. Бобро

Несомненный интерес вызвало сообщение директора ООО «СПТехникорд» (г. Люберцы), на котором не только разрабатываются многоцелевые, гибкие шнуровые присадочные материалы, но и выпускаются специализированные установки для газопламенного напыления с использованием этих присадочных материалов.

Представлял интерес доклад директора ОАО «Феодосийский приборостроительный завод» канд. техн. наук В. В. Бобро, посвященный практическому применению науки о инженерии поверхности в производстве. На этом

предприятии разработаны и производятся современные приборы бытового и промышленного назначения.

Анализ результатов конференции показал, что намечается возврат к детонационным технологиям нанесения покрытий, но уже на новом уровне. Было представлено много докладов, в которых рассматривались технологии газотермического нанесения покрытий с применением нового детонационного оборудования. Например, Национальный аэрокосмический университет представил серию докладов о высокочастотной детонационной технологии нанесения покрытий и оборудованию.

Работа конференции была хорошо организована, в чем большая заслуга директора Ассоциации технологов-машиностроителей Украины д-ра техн. наук С. А. Клименко. К началу работы оргкомитет издал сборник докладов, куда вошли 232 доклада и сообщения по вопросам инженерии поверхности и реновации изделий.

Согласно общему мнению обмен опытом и научными достижениями в такой важной отрасли, как инженерия поверхности и реновация изделий, должен стать традиционным и проводиться с участием не только представителей стран СНГ, но и специалистов более широкого круга, включая страны Западной Европы.

А. А. Бондарев, д-р техн. наук

УДК 621.791.92



15-Й МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПЛАНЗЕЕ СЕМИНАР

С 28 мая по 1 июня в г. Ройтте (Австрия) состоялся 15-й Международный Планзее семинар, который 50 лет назад основал профессор Пауль Шварцкопф. Основная тема семинара в течение многих лет оставалась неизменной — производство и применение изделий из тугоплавких металлов и спеченных карбидов. За всю историю существования семинара на нем было заслушано более 2000 докладов, опубликованных в сборниках.

Основным организатором всех этих семинаров являлось предприятие «Планзее» — один из крупнейших в Европе и мире изготовитель порошков, проката и изделий из тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена, ниobia, tantalа, рения и др.) и карбидов (вольфрама, титана, ванадия, хрома и др.), а также композиционных материалов на их основе, филиалы которого размещены в 14 странах мира. На семинарах обсуждаются современные достижения в технологии их производства, к которым относятся методы порошковой металлургии, пайки, сварки, нанесения различных видов покрытий; вопросы материаловедения тугоплавких металлов и тугоплавких соединений (карбидов, нитридов, силицидов и др.); результаты фундаментальных исследований и изучения свойств материалов данных классов.

В семинаре приняли участие 506 делегатов из 36 стран, в том числе (24 от России, 11 от Украины и 3 от Беларуссии). Наиболее активное участие приняли Германия (112 чел.), Австрия (109 чел.), США (50 чел.) и Япония (24 чел.). Программа семинара включала разделы по современным достижениям порошковой металлургии в области создания новых высокоэффективных материалов, в том числе для энергетики, транспорта, освещения; по новейшим разработкам режущего инструмента для экстремальных условий; обсуждались современные концепции разработки новых твердых материалов. При рассмотрении путей развития этой области техники в XXI веке особое внимание

было уделено созданию нанокристаллических материалов для инструментальной и других отраслей промышленности. Наиболее интересные доклады по этому направлению были представлены участниками из Германии (фирма H. C. Starck, Фраунгоферовский институт), России (Институт тугоплавких и твердых металлов, Институт материаловедения РАН), Украины (Институт материаловедения НАНУ). Так, показано, что использование нанокристаллических твердых сплавов WC-Co позволяет повысить их твердость до 22000...23000 МПа и увеличить износостойкость в 2...3 раза.

Значительная часть выступлений на семинаре была посвящена тематике нанесения покрытий. В них, в частности, рассматривалась разработка и применение алмазных и алмазоподобных, а также оксидных и Ti-B-C-N покрытий, получаемых методами осаждения из газовой фазы; композиционных покрытий, например, (Ti-Al-N)-Si₃N₄, называемых из паровой фазы, и др.

Интерес участников семинара вызвал доклад, представленный от ИЭС им. Е. О. Патона, д-ра техн. наук А. Л. Борисовой, по разработке технологии нанесения карбидованадиевых покрытий для инструмента.

Одной из приоритетных тем семинара было применение методов распыления и напыления для получения готовых изделий, в частности, формообразующей оснастки. Была отмечена перспективность этого направления, связанная со значительным сокращением затрат, а также с возможностями формирования при этом мелкозернистой структуры материала. В работе этой секции был представлен доклад д-ра техн. наук Ю. С. Борисова, посвященный разработке технологии производства пресс-форм для изготовления изделий из полимеров методом плазменного напыления.

Ю. С. Борисов, д-р техн. наук