

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. Патон

Ученые ИЭС им. Е. О. Патона
С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),
Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,
А. Т. Зельниченко, В. В. Кныш,
И. В. Кривцун, Ю. Н. Ланкин,
Л. М. Лобанов,
В. Д. Позняков,
И. А. Рябцев, К. А. Ющенко

Ученые университетов Украины
В. В. Дмитрик, НТУ «ХПИ», Харьков,
В. В. Квасницкий, НТУУ «КПИ», Киев,
В. Д. Кузнецов, НТУУ «КПИ», Киев
М. М. Студент, Физ.-механ. ин-т
им. Г. В. Карпенко НАНУ, Львов
Зарубежные ученые
Н. П. Алешин
МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ
Гуань Цяо
Ин-т авиационных технологий, Пекин, Китай

А. С. Зубченко
ОКБ «Гидропресс», Подольск, РФ
М. Зиниград
Ун-т Ариэля, Израиль
В. И. Лысак
Волгоградский гос. техн. ун-т, РФ
У. Райсген
Ин-т сварки и соединений, Аахен, Германия
Я. Пилярчик
Ин-т сварки, Гливице, Польша
Г. А. Туричин
С.-Петербургский гос. политехн. ун-т, РФ

Редакторы
Т. В. Юштина (отв. секр.), Н. А. Притула
Электронная верстка
И. Р. Наумова, А. И. Сулима, Д. И. Середа

Адрес редакции
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ
03680, Украина, Киев-150,
ул. Казимира Малевица, 11
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277
Факс: (38044) 200 5484, 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Учредители
Национальная академия наук Украины,
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ,
МА «Сварка» (издатель)

Свидетельство о государственной
регистрации КВ 4788 от 09.01.2001
ISSN 0005-111X

Журнал входит в перечень утвержденных
Министерством образования и науки
Украины изданий для публикации трудов
соискателей ученых степеней

За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности не несет

Цена договорная

Издается ежемесячно

СОДЕРЖАНИЕ

К 90-летию со дня рождения И. К. Походни 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- Ющенко К. А., Булат А. В., Скорина Н. В., Марченко А. Е., Самойленко В. И., Каховский Н. Ю. Влияние вида связующего на технологичность изготовления и свойства покрытых электродов типа Э-08Х20Н9Г2Б 5
- Ермоленко Д. Ю., Головка В. В. Расчетная и экспериментальная оценка формирования первичной структуры металла шва с тугоплавкими инокулянтами 14
- Власов А. Ф., Макаренко Н. А., Волков Д. А. Интенсификация дуговых и электрошлаковых процессов сварки путем введения экзотермической смеси 19
- Марченко А. Е. Экспериментальные исследования разнотолщинности покрытия электродов при опрессовке 26
- Левченко О. Г., Безушко О. Н. Математическое моделирование химического состава сварочного аэрозоля при ручной дуговой сварке высоколегированными электродами 35
- Прилуцкий В. П., Ахонин С. В., Шваб С. Л., Петриченко И. К., Радкевич И. А., Руханский С. Б., Антонюк С. Л. Восстановительная наплавка деталей из титанового сплава ВТ22 39
- Жудра А. П., Ворончук А. П., Кочура В. О., Федосенко В. В. Влияние режимов наплавки порошковыми лентами на геометрические параметры наплавленных валиков 43
- Марченко А. Е., Скорина Н. В., Киселев М. О., Грачевский В. В. Исследование структуры жидких стекол для сварочных электродов методом ядерной магнитной спектроскопии 49

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- Слободянюк В. П. Производство сварочных материалов предприятиями корпорации «ПлазмаТЕК» 55
- Сидлин З. А. Контроль гранулометрического состава порошков, применяемых в производстве сварочных материалов 60
- Бабинец А. А., Рябцев И. А. Порошковая проволока для износостойкой наплавки тонколистовых конструкций 64
- Костин А. М., Мартыненко В. А., Малый А. Б., Квасницкий В. В. Адгезионно-активные жаропрочные износостойкие материалы КМХ и КМХС 68
- Пустовойт С. В., Скорина Н. В., Петрук В. С. Состояние и тенденции развития рынка сварочных электродов в Украине 73

Информация

- Производство порошковых проволок в компании «ТМ.ВЕЛТЕК» 79
- Становление и развитие фирмы «ВЕЛМА» — производителя оборудования для изготовления электродов 81
- Пути расширения рынка сбыта сварочных материалов 82

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор
Б. Є. Патон

Вчені ІЕЗ ім. Є. О. Патона
С. І. Кучук-Яценко (заст. гол. ред.),
В. М. Липодаєв (заст. гол. ред.),
Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,
О. Т. Зельніченко, В. В. Книш,
І. В. Кривцун, Ю. М. Ланкін,
Л. М. Лобанов,
В. Д. Позняков,
І. О. Рябцев, К. А. Ющенко

Вчені університетів України
В. В. Дмитрик, НТУ «ХПІ», Харків,
В. В. Квасницький, НТУУ «КПІ», Київ,
В. Д. Кузнєцов, НТУУ «КПІ», Київ
М. М. Студент, Фіз.-механ. ін-т
ім. Г. В. Карпенка НАНУ, Львів

Зарубіжні вчені
М. П. Альошин
МДТУ ім. М. Е. Баумана, Москва, РФ
Гуань Цяо
Ін-т авіаційних технологій, Пекін, Китай
О. С. Зубченко
ДКБ «Гідропрес», Подільськ, РФ
М. Зініград
Ун-т Арієля, Ізраїль
В. І. Лисак
Волгоградський держ. техн. ун-т, РФ
У. Райсген
Ін-т зварювання і з'єднань, Аахен,
Німеччина
Я. Пілярчик
Ін-т зварювання, Глівіце, Польща
Г. А. Туричин
С.-Петербурзький держ. політехн. ун-т, РФ

Редактори
Т. В. Юштіна (від. секр.), Н. А. Притула
Електронне верстання
І. Р. Наумова, А. І. Суліма, Д. І. Середа

Адреса редакції
ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ
03680, Україна, Київ-150,
вул. Казимира Малевича, 11
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277
Факс: (38044) 200 5484, 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Засновники
Національна академія наук України,
ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ,
МА «Зварювання» (видавець)

Свідцтво про державну
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001
ISSN 0005-111x

Журнал входить в перелік затверджених
Міністерством освіти і науки України
видань для публікації праць
здобувачів вчених ступенів

За зміст рекламних матеріалів редакція
журналу відповідальності не несе

Ціна договірної

Видається щомісячно

ЗМІСТ

До 90-річчя від дня народження І. К. Походні 3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

Ющенко К. А., Булат О. В., Скорина М. В., Марченко А. Ю., Самойленко В. І., Каховський М. Ю. Вплив виду зв'язувального на технологічність виготовлення та властивості покритих електродів типу Э-08Х20Н9Г2Б 5

Єрмоленко Д. Ю., Головка В. В. Розрахункова та експериментальна оцінка формування первинної структури металу шва з тугоплавкими інокулянтами 14

Власов А. Ф., Макаренко Н. О., Волков Д. А. Інтенсифікація дугових та електрошлакових процесів зварювання шляхом введення екзотермічної суміші 19

Марченко А. Ю. Експериментальні дослідження різновшчинності покриття електродів під час опресування 26

Левченко О. Г., Безушко О. М. Математичне моделювання хімічного складу зварювального аерозолі при ручному дуговому зварюванні високолегованими електродами 35

Прилуцький В. П., Ахонін С. В., Шваб С. Л., Петриченко І. К., Радкевич І. А., Руханський С. Б., Антонюк С. Л. Відновлювальне наплавлення деталей з титанового сплаву BT22 39

Жудра О. П., Ворончук О. П., Кочура В. О., Федосенко В. В. Вплив режимів наплавлення порошковими стрічками на геометричні параметри наплавлених валиків 43

Марченко А. Ю., Скорина М. В., Кисельов М. О., Грачевський В. В. Дослідження структури рідких стекел для зварювальних електродів методом ядерної магнітної спектроскопії 49

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

Слободянюк В. П. Виробництво зварювальних матеріалів підприємствами корпорації «ПлазмаТЕК» 55

Сідлін З. А. Контроль гранулометричного складу порошоків, що застосовуються у виробництві зварювальних матеріалів 60

Бабінець А. А., Рябцев І. О. Порошковий дріт для зносостійкого наплавлення тонколистових конструкцій 64

Костін О. М., Мартиненко В. О., Малий О. Б., Квасницький В. В. Адгезійно-активні жароміцні зносостійкі матеріали КМХ та КМХС 68

Пустовойт С. В., Скорина М. В., Петрук В. С. Стан і тенденції розвитку ринку зварювальних електродів в Україні 73

Інформація

Виробництво порошкових дротів в компанії «ТМ.ВЕЛТЕК» 79

Становлення та розвиток фірми «ВЕЛМА» — виробника обладнання для виготовлення електродів 81

Шляхи розширення ринку збуту зварювальних матеріалів 82

К 90-летию со дня рождения И. К. Походни



24 января исполняется 90 лет со дня рождения Игоря Константиновича Походни — известного ученого в области металлургии и технологии металлов, материаловедения и электросварки, выдающегося общественного деятеля, организатора науки, академика Национальной академии наук, достойного представителя всемирно известной научной школы, созданной Е. О. Патоном и руководимой Б. Е. Патоном. С именем И. К. Походни связаны фундаментальные исследования физико-химических процессов дуговой сварки, новых высокопроизводительных процессов изготовления материалов для ее реализации, создание научной школы в области металлургии и технологии, которые внесли большой вклад в развитие теории дуговой сварки, разработки новых наукоемких технологий и прогрессивных сварочных материалов, в становление современного их производства.

Подростком Игорь Константинович попал в горнило Второй мировой войны, пережил бомбардировки, голод, холод, тяжелую работу в эвакуации, но при этом нашел силы для продолжения учебы и уже в октябре 1944 г. поступил в Киевский политехнический институт. Обучение в КПИ проходило в тяжелое время — разрушенные учебные корпуса, неотапливаемые общежития, скудное питание, но закалка военных лет позволила преодолеть все трудности. Помогала огромная жажда знаний, которую поддерживали в молодых сердцах такие известные ученые как В. Г. Свечников, Ф. П. Белянкин, Н. Н. Доброхотов, В. Н. Гриднев, Н. А. Кильчевский, О. И. Кухтенко, О. С. Смогоржевский, В. И. Явойский, К. К. Хренов и др.

После окончания КПИ И. К. Походня был направлен в крупнейший промышленный центр Украины — на Донбасс, где прошел большую производственную школу на Донецком машиностроительном заводе. Именно там, при внедрении разработанного в ИЭС способа автоматической сварки под флюсом применительно к изготовлению горно-шахтного оборудования, началась его деятельность в области сварки.

Свои смелые, инициативные решения молодой начальник бюро сварки доложил на выездной сессии Отделения технических наук АН УССР в Краматорске. Этот доклад привлек внимание руководителей ИЭС, и послужил основанием для приглашения в аспирантуру.

С этих пор жизнь и деятельность И. К. Походни были неразрывно связаны с Институтом электросварки им. Е. О. Патона и Национальной академией наук Украины. Формирование молодого научного сотрудника проходило в сравнительно небольшом коллективе института, который под руководством Евгения Оскаровича Патона, выдающегося ученого и инженера, объединял таких творческих людей и беспрельдно преданных своему делу ученых, как А. М. Макара, И. И. Фрумин, Б. И. Медовар, А. Е. Аснис, Б. С. Касаткин, В. И. Труфяков, Б. А. Мовчан и др.

В эти годы были получены данные о средней температуре сварочной ванны при сварке под флюсом, о распределении температуры в ванне, о взаимосвязи температуры ванны с ее химическим составом. Эти результаты во всем мире признаны основополагающими, такими, которые существенно повлияли на развитие теоретических основ дуговой сварки и наплавки.

Возглавив отдел физико-химических процессов в сварочной дуге, И. К. Походня сосредоточил внимание на исследовании металлургических, электрофизических проблем сварки, на разработке низкотоксичных сварочных материалов и технологии их промышленного производства. Под его руководством было создано современное, оснащенное новейшим оборудованием экспериментальное производство сварочных материалов, деятельность которого дала возможность резко сократить время от возникновения научной идеи к ее широкому внедрению в практику, были созданы мощные специализированные цеха по производству электродов

и реконструирован ряд существующих электродных предприятий. Благодаря объединению усилий ученых-сварщиков и металлургов, проектировщиков и производителей удалось за короткое время решить большую народнохозяйственную задачу — обеспечить страну высокопроизводительными низкотоксичными электродами.

Проведенные под руководством И. К. Походни исследования дали возможность создать ряд порошковых проволок разного назначения, которые имеют оригинальные композиции и конструкции оболочки. Разработка самозащитных порошковых проволок стала новым шагом в технике и технологии сварочного производства, их применение дало возможность решить проблему механизации сварочных процессов при монтаже, в открытых цехах, в полевых условиях, на стапелях.

Исследование технологических особенностей изготовления порошковой проволоки послужило теоретической базой для создания современной промышленной технологии их изготовления. Были спроектированы и построены высокомеханизированные цеха для производства порошковой проволоки в Украине и России, отечественные технологические линии, оборудование, «ноу-хау» поставлялись по лицензионным соглашениям фирмам США, ФРГ, Франции, Японии, ЧССР, ВНР, НРБ, Аргентины, Китая.

Изучение основных закономерностей формирования металла шва, легирования и кристаллизации сварочной ванны в условиях искусственного охлаждения ее поверхности и сменного положения в пространстве, проведенное под руководством академика И. К. Походни, дало возможность создать прогрессивную технологию и оборудование для дуговой сварки неповоротных стыков труб, позволившую автоматизировать процесс и в 3-6 раз повысить его производительность.

Возглавляемый И. К. Походней коллектив специалистов приложил немало усилий для проведения работ по реконструкции и оснащению новым современным оборудованием Опытного завода сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона, организации производства на нем электродов, порошковых проволок, сварочных флюсов, наплавочных материалов с целью содействия продвижению на рынок новых разработок института.

Развитие выдвинутых им идей по внепечной обработке металлических расплавов привело к совершенствованию методов инжекционной металлургии, которые широко применяются на металлургических заводах Украины и России.

Академик НАН Украины И. К. Походня — автор и соавтор более 900 научных работ, в том числе 28 монографий, 8 из которых изданы в США, Великобритании, Китае, Чехословакии, 118 изобретений, 158 зарубежных патентов, 6 патентов Украины.

Страна по заслугам оценила его труд, отметив Государственными премиями СССР и Украины, правительственными наградами.

Коллеги Игоря Константиновича отмечали присущие ему талант ученого, большую трудоспособность, увлеченность делом, принципиальность, порядочность, скромность, чуткость. Эти черты характера способствовали формированию его высокого авторитета и уважения среди сотрудников и друзей.

Немало коллег, как ветеранов, так и молодежи, испытывают чувство самой глубокой благодарности к Игорю Константиновичу за то участие, которое он принимал в решении их жизненных проблем.

Весь жизненный путь и опыт работы академика НАН Украины И. К. Походни служит примером продолжателям его дела в преодолении трудностей нашего времени, в дальнейшем развитии научных идей, сформулированных с его участием.

В. В. Головки

В настоящий выпуск журнала вошли статьи научно-технического и производственного характера, подготовленные специалистами в области разработки, производства и применения сварочных и наплавочных материалов. Среди авторов ученики и последователи академика И. К. Походни, руководители и специалисты ряда предприятий–производителей сварочных материалов. Читатели журнала найдут возможность ознакомиться также с состоянием современного рынка сварочных материалов в Украине, примерами успешной организации производства и реализации продукции, рекомендациями по повышению конкурентноспособности отечественных сварочных материалов.

От редакции

УДК 621.791.75.042

ВЛИЯНИЕ ВИДА СВЯЗУЮЩЕГО НА ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СВОЙСТВА ПОКРЫТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ТИПА Э-08Х20Н9Г2Б

К. А. ЮЩЕНКО, А. В. БУЛАТ, Н. В. СКОРИНА, А. Е. МАРЧЕНКО, В. И. САМОЙЛЕНКО, Н. Ю. КАХОВСКИЙ
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

Изложены и проанализированы результаты исследований свойств электродных обмазочных масс, покрытий и электродов рутил-основного вида, предназначенных для сварки высоколегированных Cr-Ni сталей в зависимости от состава литийсодержащего жидкого стекла. Показано, что использование Li-Na-K жидкого стекла для производства таких электродов позволяет существенно улучшить их санитарно-гигиенические свойства за счет снижения удельных выделений высокотоксичных соединений шестивалентного хрома. Одновременно использование Li-Na-K стекла приводит к значительному понижению гигросорбционной способности покрытия, при этом его прочность и стойкость против растрескивания при сварке не ухудшаются, а пластичность и ударная вязкость металла шва несколько улучшаются. Показатели технологичности в изготовлении и сварочно-технологические свойства сравниваемых электродов находятся на одном уровне. На основании результатов исследований модернизирован состав покрытия и технология изготовления электродов АНВ-35. Библиогр. 23, табл. 9, рис. 2.

Ключевые слова: высоколегированные Cr-Ni стали, дуговая сварка, покрытые электроды, связующие материалы, технологические свойства электродных масс, прочность и гигроскопичность электродных покрытий, сварочно-технологические и гигиенические свойства электродов, химический состав и структура наплавленного металла, механические свойства металла шва

В течение многих десятилетий в ИЭС им. Е. О. Патона под руководством академика НАН Украины И. К. Походни проводились исследования, направленные на снижение удельных выделений и токсичности аэрозолей, образующихся при сварке электродами общего назначения. Основные результаты обобщены в работах [1, 2]. В течение 2013–2015 гг. под его же руководством изучены возможности улучшения санитарно-гигиенических характеристик электродов специального назначения за счет вариации типов применяемого связующего.

При ручной дуговой сварке высоколегированных Cr-Ni сталей содержащиеся в свароч-

ном аэрозоле (СА) высокотоксичные соединения шестивалентного хрома (ПДК 0,01 мг/м³) [3] средствами принудительной вентиляции не всегда удается полностью удалить из воздуха рабочей зоны сварщиков. А при выполнении ремонтных работ внутри емкостной аппаратуры и колонного оборудования на предприятиях нефтехимической и химической промышленности принудительная вентиляция часто вообще не может быть использована.

После того, как экспериментальными исследованиями была установлена мутагенная природа СА, содержащего соединения шестивалентного хрома, в мире постоянно уделяется исключительно большое внимание улучшению санитарно-гигиенических свойств электродов, предназначенных для сварки высоколегированных Cr-Ni сталей. Успешное реше-

* Работа выполнена по инициативе академика НАН Украины И. К. Походни. В работе принимали участие инженеры О. И. Фольборт и А. И. Радченко.

Таблица 1. Химический состав (мас. %) и характеристики жидких стекол

Вид жидкого стекла	Силикатный модуль, отн. ед.	SiO ₂	Li ₂ O	Na ₂ O	K ₂ O	С.о.*	Плотность, г/см ³ /вязкость, МПа·с
K–Na	2,88	27,85	-	3,90	9,25	41,00	1,43/ 590
Li–Na–K	2,19	27,75	1,80	7,00	3,60	40,15	1,38/530
Li–Na	2,75	30,20	2,70	5,17	1,00	39,07	1,39/525
Li	3,60	22,80	3,15	-	-	25,95	1,25/ 535

* С.о. – сухой остаток жидкого стекла.

ние этой проблемы, несомненно, зависит от знания фундаментальных характеристик, а также условий образования СА при сварке указанных сталей.

Из отечественных и зарубежных публикаций [4–9] следует:

- хром (второй после марганца металл по значению упругости пара при температурах дугового сварочного процесса) переходит в твердую составляющую сварочного аэрозоля (ТССА) из электродного и основного металла, а также из металлических составляющих электродного покрытия;

- интенсивность перехода и валентность хрома в ТССА зависят от его содержания в плавящемся металле и электроде, от вещественного состава шлакообразующей части покрытия и образующегося из нее шлака. Чем выше содержание хрома в стали и, следовательно, в сварочном материале, тем больше хрома в ТССА. Исходя из действующих санитарных норм, с опасностью эмиссии хрома следует считаться при сварке сталей, содержащих более 5 % хрома. Флюсующие материалы, как правило, тормозят испарение хрома. Поэтому при прочих равных условиях общее содержание хрома в ТССА при сварке в защитном газе, даже с высокой окислительной способностью, выше, чем при сварке покрытыми электродами. При этом шестивалентной модификации хрома в ней не обнаружено;

- по существующей классификации соединения хрома в СА делятся на растворимые и нерастворимые в воде. Каждая из названных разновидностей включает соединения из трех- или шестивалентного хрома. При сварке покрытыми электродами для сварки нержавеющей сталей общая доля хрома в ТССА колеблется от 3 до 7 %, из них от 60 до 90 % приходится на растворимые его соединения, представляющие собой, как правило, хроматы калия и натрия;

- наибольшие уровни эмиссии соединений шестивалентного хрома в зону дыхания сварщика наблюдаются при использовании электродов с основным, меньшие — электродов с рутил-основным и наименьшие — электродов с рутиловым покрытием. Между общим уровнем эмиссии ТССА и содержанием в ней шестивалентного хрома нет однозначной связи. Первый связывают с напряжением (мощностью) дуги и газообразу-

ющей способностью покрытия, второй — с его окислительной способностью;

- инструментальными методами доказано, что хроматная (растворимая) форма соединений шестивалентного хрома в сварочном дыме вызывается силикатами натрия и калия, находящимися в составе электродного покрытия или в сердечнике порошковой проволоки. Не имеет значения источник поступления щелочных оксидов в покрытие — жидкое стекло, полевой шпат или слюда. При сварке электродами с литиевым силикатом растворимые соединения шестивалентного хрома в составе ТССА не выявляются;

- роль CaF₂ в образовании соединений шестивалентного хрома не выяснена, хотя имеется определенная корреляция между эмиссией шестивалентного хрома и растворимых фторидов. Уменьшение в электродном покрытии соотношения CaCO₃/CaF₂ приводит к возрастанию эмиссии аэрозоля и содержания в нем соединений Cr⁺⁶. Вместе с тем хроматы калия в ТССА обнаружены при сварке электродами, в покрытии которых отсутствует CaF₂;

- у электродов, которые с целью полного подавления эмиссии Cr⁺⁶-ионов изготовлены на литиевом силикате, выявлен ряд весьма значительных технологических и эксплуатационных недостатков. В частности, существенно ухудшается стабильность горения дуги, в результате чего такими электродами нельзя осуществить сварку на переменном токе. Прочность покрытия катастрофически понижается, оно растрескивается при сварке, в результате чего ухудшается защита расплавленного металла от окружающей среды. Судя по зарубежным публикациям, указанные недостатки электродов можно устранить совершенствованием состава покрытия и настройкой технологических приемов их изготовления. Разработаны и выпускаются необходимые литийсодержащие жидкие стекла [10, 11], а также новые марки электродов. Вместе с тем на рынке электроды с улучшенными санитарно-гигиеническими показателями, которые надежно удовлетворяют требованиям промышленного потребителя, еще не появились.

Цель настоящей работы заключается в следующем:

- определение пути уменьшения эмиссии в составе СА соединений Cr⁺⁶ за счет технологиче-

ских приемов изготовления электродов, в том числе определение оптимального соотношения литиево-натриево-калиевой составляющих в жидкостекольном связующем, при которых не происходят изменения технологических показателей электродов и процесса сварки;

уточнение роли составляющих покрытия, в частности, CaF_2 , в образовании соединений Sr^{+6} в составе ТССА.

Объект и методики экспериментов. Исследовали электроды марки АНВ-35 (тип Э-08Х20Н9Г2Б по ГОСТ 10051–75) с рутил-основным покрытием. Для их изготовления использовались материалы, по химическому и гранулометрическому составу соответствующие требованиям нормативно-технической документации. Диаметр стержня 3 мм, покрытия 4,95...5,15 мм, длина 350 мм. Химический состав и характеристики жидких стекол, выбранных для проведения запланированных исследований в ходе предварительных опытов, приведены в табл. 1.

Поскольку силикаты лития нерастворимы в воде, их водные растворы синтезировали путем проведения химической реакции взятых в нужном соотношении водного раствора гидрата лития с порошком водной кремниевой кислоты при температуре 50...60 °С. Доведенные до заданных характеристик, их смешивали с Na и K–Na жидкими стеклами, полученными автоклавным растворением соответствующих силикатных глыб.

Обмазки готовили в интенсивном смесителе в течение 3 мин. Их свойства оценивали по величине пластической прочности P_m , характеризующей твердость электродной массы в состоянии брикета и покрытия, только что нанесенного на стержень, а также значению и равномерности давления истечения P_e через фильеру диаметром 4 мм и длиной 40 мм. Указанные показатели оценивали с использованием конического автопластомера ОБ2059 и капиллярного вискозиметра ОБ1435, разработанных и изготовленных в ИЭС им. Е. О. Патона. Методики описаны в работе [12].

При этом считали, что наилучшие свойства имеет обмазка, которая при одинаковом давлении экструзии характеризуется более высокой пластической прочностью.

Прочность обезвоженного покрытия электродов определяли методом трехточечного изгиба цилиндрических образцов диаметром 4 мм и длиной 50 мм, изготовленных путем экструдирования обмазочной массы [13]. Обезвоживание образцов проводили путем их сушки-прокалки при температурах 200, 300, 350 и 400 °С в течение часа.

Гигроскопичность покрытия оценивали по кинетике сорбции влаги при кратковременной (8 ч) и длительной (2 недели) экспозиции образцов

электродов в гидростате при температуре 20 °С и относительной влажности воздуха 84 %. Количество абсорбированной влаги определяли путем взвешивания образцов с интервалом времени 1 и 24 ч; прирост массы относили к массе сухого покрытия.

Сравнительную оценку влияния связующего на способность покрытия противостоять растрескиванию в процессе сварки определяли, используя следующую методику. Сварку экспериментальными электродами осуществляли от выпрямителя ВДУ-504 на обратной полярности ($I_{\text{св}} = 90...100 \text{ А}$). Для каждого варианта проводили минимум три эксперимента путем непрерывного оплавления электродов длиной 350 мм до огарка длиной 50, 130 и 200 мм. После охлаждения до комнатной температуры поверхность покрытия каждого огарка осматривали и определяли количество и длину трещин в соответствии с требованиями ГОСТ 9466–75, п. 3. При отсутствии браковочных признаков оценивали стойкость покрытия против отколов, сбрасывая огарок на стальную плиту с высоты 0,5 м. Отколы любого размера на рабочей части покрытия испытуемого образца (за исключением огарка длиной 50 мм) не допускаются.

Сварочно-технологические свойства электродов сравнивали по стабильности горения дуги, качеству формирования швов и отделимости шлаковой корки, которые определяли при сварке и наплавке на пластины из стали 12Х18Н10Т постоянным током обратной полярности от выпрямителя ВДУ 504 ($U_{\text{x.x}} = 80 \text{ В}$).

Стабильность горения дуги оценивали по стандартным отклонениям тока и напряжения дуги (σ_I и σ_U) от среднестатистических показателей ($I_{\text{ср}}^{\text{д}}$ и $U_{\text{ср}}^{\text{д}}$). Их получали с помощью включенного в сварочную цепь анализатора нестационарных процессов типа АНП-2 [14], позволяющего в режиме реального времени считывать, накапливать и статистически обрабатывать цифровую информацию об изменениях тока и напряжения.

Качество формирования металла оценивали по средним значениям коэффициента формы шва $K_{\text{ф}}^{\text{ср}}$, представляющего собой отношение ширины шва к его высоте [15]. Соответствующие измерения выполняли на валиках, наплавленных опытными электродами на поверхности пластин в нижнем, вертикальном и потолочном положениях с поперечными колебаниями электродов амплитудой 7...8 мм.

Отделимость шлаковой корки определяли согласно методике [16] по показателю $\Phi_{\text{ср}}^0$, представляющему собой среднее значение угла принудительного раскрытия кромок стыкового соединения пластин, при котором шлаковая корка

полностью отделяется от поверхности корневого шва.

Влияние типа связующего на химический состав и структуру наплавленного металла, а также механические свойства металла шва оценивали в соответствии с требованиями ГОСТ 9466–75. Для этого экспериментальными электродами выполняли восьмислойные наплавки, в которых методом диффузионной спектрометрии (спектрометр ДФС-51) определяли содержание С, Cr, Ni, Mn, Nb, S и Р, а магнитометрическим методом (магнитометр МФ-10И) — содержание α -фазы (δ -феррита). Для определения содержания кислорода, водорода и азота из верхних слоев наплавки вырезали по девять цилиндрических образцов с диаметром и длиной 5 мм. Анализ выполняли на установках LECORO-316, LECORN-402 и LECOTN-114 методом восстановительного плавления [17].

Механические свойства металла шва оценивали в соответствии с ГОСТ 9466–75. Для этого экспериментальными электродами были сварены стыковые соединения пластин из стали 12Х18Н10Т. Сварку осуществляли постоянным током обратной полярности ($I_{\text{св}} = 80 \dots 90 \text{ А}$) от выпрямителя ВДУ 504. Из указанных соединений были вырезаны по три образца типа II и IX по ГОСТ 6996–66 для испытаний на статическое растяжение и ударный изгиб, соответственно. Определяли пределы текучести, прочности и относительное удлинение ($\sigma_{\text{т}}$, $\sigma_{\text{в}}$ и δ_5), а также ударную вязкость на образцах с острым надрезом (КСИ).

Химический состав шлаков определяли методом рентгеноспектрального анализа на приборе X' Unique II Philips, а удельные выделения твердой составляющей сварочного аэрозоля (ТССА) — методом полной фильтрации (по три экспе-

Таблица 2. Технологические характеристики электродных обмазок (характер течения — равномерный)

Связующее		Пластическая прочность P_m , МПа	Показатели экструзии	
Тип	Доза, %		Давление P_e , МПа, при расходе Q , см ³ /с	
			1	10
K–Na	23,1	0,25	32,5	37,0
Li–Na–K	24,0	0,72	33,5	35,5
Li–Na	24,0	0,75	34,0	42,5
Li	25,7	0,90	18,5	21,0

римента на каждый вариант электродов). Использовали фильтры из ткани Петрянова марки ФПП15-1,5 [16]. Пробы ТССА для химического анализа осаждали на фильтры АФА-ХА-18 [17–19]. Все эксперименты проводили в специальной камере в одинаковых условиях — при наплавке на пластины из стали 12Х18Н10Т постоянным током обратной полярности ($I_{\text{св}} = 90 \dots 100 \text{ А}$).

Результаты исследований. Результаты оценки технологических показателей электродных обмазочных масс приведены в табл. 2.

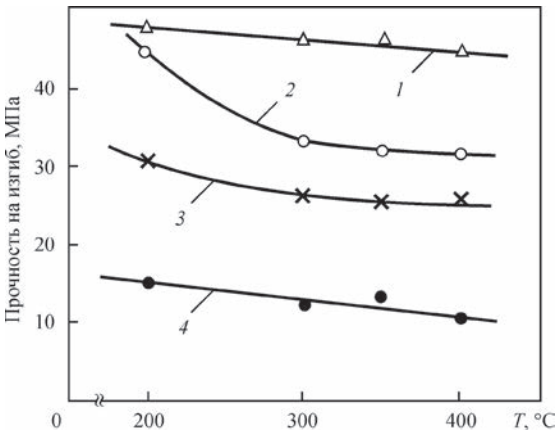


Рис. 1. Влияние вида жидкого стекла и температуры прокалики на результаты испытаний прочности покрытия при изгибе: 1 — K–Na; 2 — Li–Na–K; 3 — Li–Na; 4 — Li

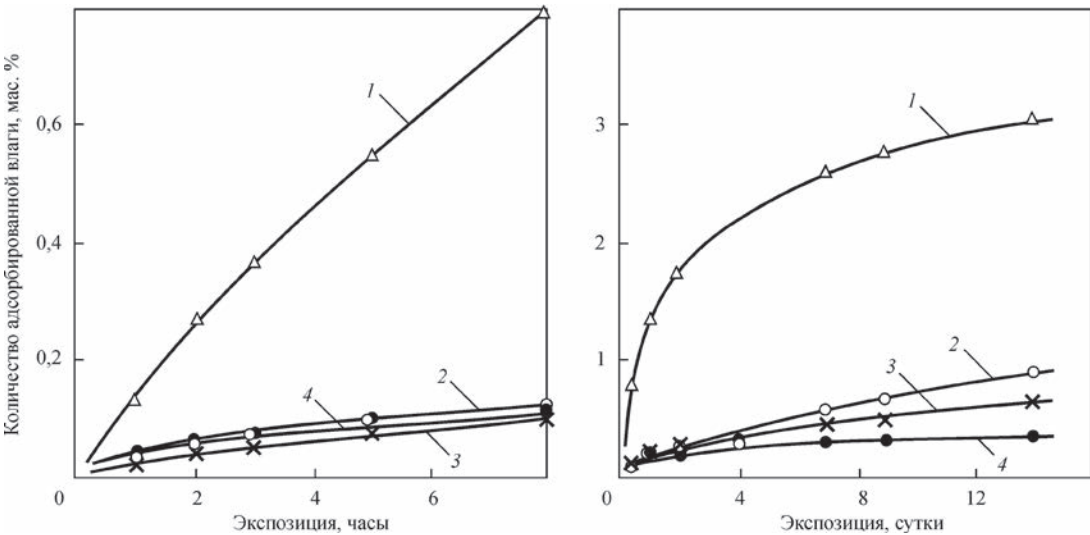


Рис. 2. Влияние вида связующего на кинетику сорбции атмосферной влаги электродными покрытиями (обозначения те же, что и на рис. 1)

Таблица 3. Влияние типа связующего на склонность покрытия электродов к растрескиванию при сварке

Тип связующего	Диаметры электрода/покрытия, мм	Длина огарка, мм	Средняя длина трещин, образующихся в покрытии электродов от		Характер растрескивания покрытия
			втулочки, мм	контактного конца, мм	
K–Na	3,0/5,00	60	-	-	Трещины образуются спустя 50...60 с после прекращения сварки
		136	-	25	
		225	27	30	
Li–Na–K	3,0/5,05	62	-	-	Трещины образуются во время сварки и развиваются после ее прекращения
		134	5	27	
		222	30	38	
Li–Na	3,0/4,95	64	-	20	Избыточная хрупкость покрытия до-, во время и после сварки
		135	34	27	
		223	35	40	
Li	3,0/5,15	64	-	-	
		135	-	-	
		227	-	-	

Таблица 4. Сварочно-технологические свойства электродов

Вид жидкого стекла	Коэффициент формы шва $K_{\text{ф}}^{\text{ср}}$ при наплавке в положениях			Отделимость шлаковой корки $\varphi_{\text{ср}}^{\circ}$	Статистические характеристики режима сварки			
	нижнем	вертикальном	потолочном		$I_{\text{д}}^{\text{ср}}$, А	$\sigma_{\text{д}}$, А	$U_{\text{д}}^{\text{ср}}$, В	$\sigma_{U_{\text{д}}}$, В
K–Na	3,1	2,8	2,6	4	96,5	14,5	20,3	4,0
Li–Na–K	3,1	2,8	2,5	5	96,0	14,5	21,0	4,1
Li–Na	3,2	2,6	2,5	6	95,2	14,8	22,0	4,2
Li	2,8	2,5	2,3	8	94,3	18,2	23,5	5,7

Видно, что по сравнению с калиево-натриевым жидким стеклом, которое обычно используется для изготовления электродов АНВ-35, литийсодержащие связующие обеспечивают более высокую пластичность электродной обмазки. Это проявляется почти в трехкратном повышении их пластической прочности при равноценном давлении экструзии.

Результаты испытаний прочности покрытия приведены на рис. 1. Видно, что независимо от типа связующего увеличение температуры прокатки образцов приводит к уменьшению их прочности. Максимальную прочность покрытия обеспечивает K–Na жидкое стекло. При использовании Li–Na–K, Li–Na и Li видов связующих она понижается соответственно на 11, 22 и 80 %. В случае Li–Na–K и Li –Na связующих степень понижения прочности не является критической, в отличие от образцов, изготовленных на литийсвязующем.

Результаты сравнения гигросорбционных характеристик покрытий, изготовленных на разных жидких стеклах, приведены на рис. 2.

Видно, что по сравнению со стандартным K–Na жидким стеклом литийсодержащие связующие обеспечивают более низкую (в 6...8 раз) гигроско-

пичность электродного покрытия. В этом отношении они очень мало отличаются от чисто литиевого связующего. Такой эффект, по-видимому, обусловлен сжатием кремнийкислородной сетки при имплантации в нее ионов лития и согласуется с известной практически полной неспособностью ионов лития к гидратации.

Результаты испытаний склонности покрытия опытных электродов к растрескиванию приведены в табл. 3. Согласно табл. 3 допустимая (с точки зрения качества сварки) склонность электродного покрытия к растрескиванию обеспечивается при использовании K–Na и Li–Na–K связующих. Использование Li–Na связующего неприемлемо из-за растрескивания покрытия при сварке, а Li стекла — из-за его избыточной хрупкости. Следует обратить внимание на корреляцию полученных результатов со значениями прочности покрытий, приведенными на рис. 1.

Показатели сварочно-технологических свойств электродов приведены в табл. 4. Судя по ним, изменение состава комбинированных жидких стекол (K–Na, Li–Na–K или Na–Li) не влияет на коэффициент формы шва в любом положении сварки (разница значений $K_{\text{ф}}^{\text{ср}}$ не превышает 7 %).

Таблица 5. Химический состав (мас. %) и структура наплавленного металла

Вид жидкого стекла	C	Cr	Ni	Mn	Si	Nb	S	P	α-фаза, %
K–Na	0,053	20,1	10,2	1,3	1,0	0,7	0,011	0,022	7,5
Li–Na–K	0,053	19,6	9,9	1,3	1,1	0,7	0,010	0,021	6,5
Li–Na	0,051	19,9	10,1	1,3	1,0	0,7	0,010	0,022	6,0
Li	0,048	19,5	9,3	1,2	1,0	0,7	0,011	0,028	6,0
Требования ГОСТ 10052–75	0,05...0,12	18,0...22,0	8,0...10,5	1,0...2,5	<1,3	0,7...1,3	<0,020	<0,030	2,0...8,0

Таблица 6. Содержание газов в наплавленном металле, мас. %

Вид жидкого стекла	H	N	O
K–Na	0,0015	0,067	0,062
Li–Na–K	0,0014	0,072	0,058
Li–Na	0,0012	0,079	0,051
Li	0,0010	0,082	0,045

Статистические показатели режимных параметров горения дуги изменяются при этом более системно. Так, по мере увеличения массовой доли лития в жидком стекле (от 0 до 2,7 %), среднестатистические значения напряжения возрастают (от 20,3 до 22,0 В), а тока — уменьшаются (от 96,5 до 95,2 А), в то время как стандартные отклонения и тока σ_{I_d} и напряжения σ_{U_d} при этом возрастают, соответственно, от 14,5 до 14,8 А и от 4,0 до 4,2 В. Тем не менее, вариации этих показателей не выходят за пределы 8 %, что согласуется с выводами, сделанными в работе [20]. Неблагоприятное влияние лития, особенно на показатель рассеяния напряжения дуги, можно считать критическим только в случае полного отсутствия Na_2O и K_2O в жидком стекле.

Более заметно влияние состава жидкого стекла на отделимость шлаковой корки. Если ограничиться рассмотрением только литийсодержащих жидких стекол, то показатель отделимости ухудшается по мере возрастания доли лития в жидком стекле в 1,5 раза; если же принять в расчет

результаты испытаний электродов, изготовленных и на чисто литиевом стекле, указанный показатель ухудшается в 2 раза.

Результаты тестирования химического состава и структуры металла, наплавленного экспериментальными электродами, приведены в табл. 5, содержания газов — в табл. 6, а механических свойств металла шва — в табл. 7. По химическому составу наплавленного металла и содержанию α -фазы все электроды практически одинаковы и соответствуют типу Э-08Х20Н9Г2Б по ГОСТ 10052–75. Вместе с тем выявлено, что использование Li-содержащих связующих приводит к снижению в наплавленном металле содержания кислорода и водорода и повышению азота. По нашему мнению, это обусловлено повышением восстановительной емкости шлаков.

Средние (из трех результатов) значения показателей механических свойств металла шва приведены в табл. 7. Согласно полученным данным использование Li-содержащих связующих взамен стандартного K–Na жидкого стекла позволяет существенно повысить относительное удлинение и ударную вязкость металла шва, что можно объяснить снижением в нем содержания кислорода и повышением азота (см. табл. 6).

Химический состав шлаков, экспериментальных электродов, приведен в табл. 8. Из нее следует, что химический состав сварочного шлака до-

Таблица 7. Механические свойства металла шва (температура 20 °С)

Вид жидкого стекла	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	KCU (Дж/см ²)	KCV (Дж/см ²)
K–Na	567,1	709,5	29,5	-	88,5
Li–Na–K	513,7	702,9	35,3	-	117,7
Li–Na	535,0	713,1	33,3	-	129,3
Li	507,3	708,2	38,5	-	122,3
Требования ГОСТ 10052–75	Не регламентировано	540	>22	78	Не регламентировано

Таблица 8. Химический состав шлаков (мас. %)

Вид жидкого стекла	TiO ₂	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	CaF ₂
K–Na (0)	30,9	16,1	15,3	1,1	5,4	1,6	5,4	7,1	1,9	1,0	2,5	11,2
Li–Na–K (1,80)	30,8	16,5	14,5	1,3	5,6	1,6	5,6	7,0	1,9	1,0	1,3	12,7
Li–Na (2,70)	30,0	16,7	11,5	1,6	5,3	1,1	5,4	7,5	1,8	1,9	0,8	16,1
Li (3,15)	31,3	16,1	10,9	1,4	5,5	1,6	5,4	7,1	1,9	-	0,5	17,9

Примечание. В скобках указана доля Li₂O. Доля V₂O₅ – 0,1 %, ZrO₂ – 0,4 %. Фракционное соотношение оксидов хрома в шлаках не определяли.

Таблица 9. Показатели эмиссии и химический состав ТССА

Вид жидкого стекла	Общие выделения ТССА		Массовая доля, %, в ТССА					
	Интенсивность V_a , г/мин	Удельные G_a , г/кг	Cr ⁺⁶	Cr ⁺³	Mn	Ni	F _p	F _{np}
K–Na (0 %)	0,50	11,58	1,96	2,62	4,81	1,47	11,68	1,30
Li–Na–K (0,7 %)	0,45	10,10	1,77	2,67	5,27	1,38	10,24	1,69
Li–Na–K (1,8 %)	0,35	7,28	1,44	2,82	5,69	1,29	10,35	1,88
Li–Na (2,7 %)	0,26	5,52	0,89	3,04	5,73	1,62	11,65	1,34
Li (3,2 %*)	0,20	4,52	Не выявлен	3,91	5,20	1,39	5,76	1,56

Примечание. В скобках указана массовая доля Li₂O в жидком стекле.

статочно сильно зависит от вида жидкого стекла. Наибольшие изменения проявились в виде:

- пятикратного уменьшения доли K_2O в шлаке при переходе от $K-Na$ к Li -жидкому стеклу (это вызвано, с одной стороны, уменьшением доли K_2O в жидком стекле и, в то же время, испарением K_2O);

- увеличения в 1,6 раза доли CaF_2 в шлаке, что, несомненно, вызвано уменьшением улетучивания фтора при переходе от $K-Na$ к Li жидкому стеклу;

- уменьшения в 1,4 раза доли CaO .

Остальные составляющие, в том числе доля Cr_2O_3 , сохранялись на постоянном уровне.

Результаты испытаний санитарно-гигиенических характеристик экспериментальных электродов обобщены в табл. 9. Для их изготовления использовали другой набор жидких стекол.

Видно, что использование литийсодержащих связующих вместо $K-Na$ жидкого стекла заметно улучшает санитарно-гигиенические показатели электродов. Это проявляется в понижении эмиссии ТССА и содержания в аэрозоле наиболее вредной составляющей – шестивалентного хрома. Степень улучшения санитарно-гигиенических показателей тем больше, чем выше доля литиевой составляющей в жидком стекле. Наибольший эффект достигнут при использовании $Li-Na$ и Li -силикатов. В сравнении с $K-Na$ аналогом удельная эмиссия ТССА и ее интенсивность уменьшается в 2 раза для $Li-Na$ и в 2,5 раза для чисто Li -силиката. Содержание канцерогенного шестивалентного хрома в ТССА при использовании $Li-Na$ связующего уменьшается в 2,2 раза, а при использовании чисто Li -связующего шестивалентный хром в составе ТССА не обнаружен.

Изменения вещественного состава шлаков, в частности, увеличение доли CaF_2 и эквивалентное уменьшение доли CaO при переходе от $K-Na$ к Li жидким стеклам сопровождаются понижением интенсивности эмиссии Cr^{+6} в состав СА.

Рассмотрим приведенные результаты подробнее.

Титанистые шлаки характеризуются специфическими физико-химическими свойствами. Они образуются низшими оксидами титана разной валентности, способными включать в свою структуру в жидком и твердом состоянии большое количество оксидов с близкими параметрами кристаллической решетки (FeO , MnO , MgO , NiO , V_2O_5 , Cr_2O_3 , Al_2O_3), исключая CaO , который образует с TiO_2 перовскит, достаточно тугоплавкое химическое соединение, и SiO_2 , с которым связывают возникновение в титанистых (в том числе и сварочных) шлаках рентгеноаморфной стеклообразной фазы [21]. Поэтому закристаллизовавшиеся титанистые шлаки, даже существенно отличающиеся между собой по химическому составу,

могут быть весьма похожими друг на друга по кристаллической структуре. В отличие от других сварочных шлаков они характеризуются низкой окислительной способностью, а электроды с рутиловым покрытием, предназначенные для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей, характеризуются самыми высокими санитарно-гигиеническими свойствами.

Литиевое жидкое стекло усиливает восстановительную способность титановых шлаков, поскольку, исходя из современных представлений, в структуре литиевых силикатов нет так называемого свободного кислорода. Весь кислород связан с атомами кремния сильными силоксановыми связями, а структура расплава характеризуется самым высоким показателем связности (добротности) Q^4 [22]. Наличие K - и Na -оксидов и CaF_2 в покрытии рутил-основного типа существенно усложняет эту картину, в принципе, подавляя благоприятное влияние низших оксидов титана и лития на санитарно-гигиенические характеристики электродов.

Оксиды натрия и особенно калия испаряются из расплавленных сварочных шлаков легче, чем оксиды лития. Это можно объяснить, сравнивая коэффициенты поверхностного натяжения щелочных силикатов лития, натрия и калия. По данным работы [23] поверхностное натяжение расплава $Li_2O \cdot SiO_2$ (315 МДж/см^2) значительно больше, чем расплавов $Na_2O \cdot SiO_2$ и $K_2O \cdot SiO_2$ (288 и 236 МДж/см^2 , соответственно). Нет сомнения в том, что расплав $Li_2O \cdot SiO_2$ с большим поверхностным натяжением будет испаряться менее интенсивно, чем силикатов натрия и калия. Щелочные оксиды взаимодействуют с CaF_2 , образуя летучие растворимые фториды и обогащая расплав оксидом кальция. Последний образует с оксидом титана перовскит, обедняя расплав полутормными оксидами титана и уменьшая, таким образом, его восстановительную емкость. Это, в свою очередь, облегчает образование шестивалентных ионов хрома. В наименьшей мере эта схема реализуется в шлаках электродов, изготовленных на литиевом жидком стекле, и это подтверждается составами шлаков, которые приведены в табл. 8.

Проведенные исследования позволили откорректировать базовую рецептуру покрытия электродов АНВ-35 — главным образом путем ограничения в ней доли оксидов калия, натрия и кальция и использования $Li-Na-K$ жидкого стекла. Модернизированные электроды — АНВ-35МК по комплексу характеристик, включая гигиенические, значительно превосходят электроды АНВ-35.

Выводы

1. На примере электродов с покрытием рутил-основного вида типа Э-08Х20Н9Г2Б изучено влияние литийсодержащего жидкого стекла на технологичность изготовления, сварочно-технологические свойства электродов, химический состав наплавленного металла и механические свойства металла шва. Установлено, что оптимальную совокупность технологических и сварочных характеристик электродов обеспечивает применение Li–Na–K связующего с 1,5 % литиевой составляющей.

2. Использование Li–Na–K связующего вместо K–Na жидкого стекла позволяет примерно в 2 раза уменьшить выделение в составе ТССА высокотоксичных соединений Cr^{+6} , в 7...8 раз понизить гигроскопичность электродного покрытия, на 17 % увеличить относительное удлинение и на 30 % ударную вязкость металла шва. При этом технологические показатели изготовления и сварочно-технологические свойства электродов остаются без изменений.

3. Благоприятное влияние оксидов лития на снижение эмиссии в составе СА соединений Cr^{+6} обусловлено повышением восстановительной емкости шлака за счет блокирования процессов образования фторидов калия и натрия, а также титанитов калия.

4. Неблагоприятное влияние CaF_2 с точки зрения эмиссии шестивалентных ионов хрома следует объяснять тем, что реакция образования фторидов калия сопровождается повышением CaO в шлаке, т. е. показателя его основности. Это приводит к увеличению свободного кислорода в шлаке. В то же время с увеличением доли CaO в шлаке восстановительная емкость шлака уменьшается еще и потому, что все большая доля высших оксидов титана координируется с CaO (это подтверждается образованием перовскита в закристаллизованном шлаке), в то время как доля низковалентных оксидов титана, характеризующихся меньшей окислительной способностью, при этом эквивалентно уменьшается.

5. В расчете на использование Li–Na–K связующего модернизирован состав покрытия электродов марки АНВ-35. Новой модификации электродов присвоен индекс АНВ-35МК. По комплексу характеристик, включая гигиенические, они значительно превосходят электроды с базовым покрытием.

1. Металлургия дуговой сварки: процессы в дуге и плавление электродов / И. К. Походня, В. Н. Горпенюк, С. С. Миличенко [и др.] // Киев: Наукова думка, 1990. – 224 с.
2. Походня И. К. Сварочный аэрозоль – факторы влияния, физические свойства, методы анализа / И. К. Походня, И. П. Гуденя // Автоматическая сварка. – № 6. – 2011. – С. 39–43.

3. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности: ГОСТ 12.1.007–76 ССБТ. – [Введ. 01.01.1977].
4. Санитарно-гигиенические характеристики покрытых электродов для сварки высоколегированных сталей / К. А. Ющенко, О. Г. Левченко, А. В. Булат [и др.] // Автоматическая сварка. – 2007. – № 12. – С. 44–47.
5. Левченко О. Г. Вплив електродного покриття на гігієнічні характеристики аерозолів, що утворюються при зварюванні високолегованих сталей / О. Г. Левченко, А. В. Булат, О. М. Безушко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Гірництво. – 2010. – Вип. 19. – С. 171–177.
6. Kawada K. Experimental Investigations on Hazard of Lithium in Welding Fume. / K. Kawada, M. Kobayashi. – (Intern. Inst. of Welding; Doc. JJW/JJS VIII-286–79).
7. Investigations on Chromium in Stainless Steel Welding Fumes / I. Kimura, M. Kobayashi, T. Godai [et al.] // Welding Research Supplement – 1979. – № 8. – P. 195–204.
8. Åström H. Advanced development techniques for coated electrodes / H. Åström // Welding Review International. – 1993. – Vol 12, № 2. – P. 72, 74, 76.
9. Griffiths T. Binder developments for stainless electrodes / T. Griffiths, A. Stevenson // Welding Review. – 1989. – Vol 8, № 3. – P. 192, 194, 196.
10. Inobond. Spezial silicates for welding consumables / Company Brochure «Van Baerle» (Switzerland). – P. 4.
11. CristalTME. A new generation of stainless steel MMA electrodes / Company Brochure «Air Liquide/Oerlikon» (France). – P. 4.
12. Марченко А. Е. О реологических методах оценки технологических свойств электродных обмазочных масс / А. Е. Марченко // Информационные материалы (СЭВ. Координационный центр по проблеме «Развитие научных основ и разработка новых технологических процессов сварки, наплавки и термической резки материалов и сплавов для получения сварных конструкций и создания эффективных сварочных материалов и оборудования»). – 1978. Вып. 1 (13). – С. 121–128.
13. Марченко А. Е. О физико-химической природе прочности электродных покрытий и технологических путей ее обеспечения / А. Е. Марченко: сб. докл. V Междунар. конф. «Сварочные материалы, технологии, производство, качество, конкурентоспособность». – Артемовск–Киев, 2010. – С. 78–99.
14. Металлургия дуговой сварки. Процессы в дуге и плавление электродов; под ред. И. К. Походни. – К.: Наукова думка, 1990. – 222 с.
15. Сидлин З. А. Современные типы покрытых электродов и их применение для дуговой сварки / З. А. Сидлин, В. Д. Тарлинский. – М.: Машиностроение, 1984. – 63 с.
16. А. с. 407689 СССР. Способ оценки отделимости шлаковой корки / В. Н. Липодаев, В. А. Бойко, Ю. Н. Каховский [и др.]. – Опубл. 28.08.1973.
17. Калинюк В. В. Організація процесу аналізу титанових сплавів на вміст кисню, азоту, водню та вуглецю / В. В. Калинюк // Метрологія та прилади. – 2011. – № 2. – С. 50.
18. МУ 1927–78. Методические указания. Гигиеническая оценка сварочных материалов и способов сварки, наплавки и резки металлов. – М.: Минздрав СССР, 1980. – 15 с.
19. МУ 4945–88. Методические указания по определению вредных веществ в сварочном аэрозоле (твердая фаза и газы). – М.: Минздрав СССР, 1990. – 150 с.
20. Ślania J. Badania porównawcze elektrod otulonych wysokostopowych ERWS 19-9 L produkowanych przy zastosowaniu nowego szkła wodnego modyfikowanego tlenkiem litu / J. Ślania, B. Ślajak // Biuletyn Instytutu Spawalnictwa. – 2006. – № 6. – S. 48–53.
21. Руднева А. В. Фазовые превращения в процессе восстановления двуокиси титана в шлаковых системах / А. В. Руднева, М. С. Модель // Известия АН СССР. Металлургия и горное дело. – 1963. – № 1. – С. 59.
22. Марченко А. Е. Эволюция представлений о природе и свойствах жидкого стекла, важных в производстве сварочных электродов / А. Е. Марченко, Н. В. Скорина,

М. О. Киселев: сб. докл. междунар. конф. «Сварочные материалы: технологии, производство, качество, конкурентоспособность». – Агой, 7–10 июня 2010. – К., 2010, С. 100–106.

23. Перминов А. А. Влияние замены окиси натрия оксидами других металлов на поверхностное натяжение силикатных расплавов и их адгезию к твердой стали / А. А. Перминов, С. И. Попель, Н. С. Смирнов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1961. – № 12. – С. 5–8.

К. А. Ющенко, О. В. Булат,
М. В. Скорина, А. Ю. Марченко,
В. І. Самойленко, М. Ю. Каховський

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ВПЛИВ ВИДУ ЗВ'ЯЗУВАЛЬНОГО НА ТЕХНОЛОГІЧНІСТЬ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТИХ ЕЛЕКТРОДІВ ТИПУ Э-08Х20Н9Г2Б

Викладені і проаналізовані результати досліджень властивостей електродних обмазувальних мас, покриттів і електродів

рутил-основного виду, призначених для зварювання високолегованих Cr-Ni сталей залежно від складу літіймісткого рідкого скла. Показано, що використання Li-Na-K рідкого скла для виробництва таких електродів дозволяє істотно поліпшити їх санітарно-гігієнічні властивості за рахунок зниження питомих виділень високотоксичних з'єднань шестивалентного хрому. Одночасно використання Li-Na-K скла призводить до значного пониження гігросорбційної здатності покриття, при цьому його міцність і стійкість проти розтріскування при зварюванні не погіршуються, а пластичність і ударна в'язкість металу шва дещо покращуються. Показники технологічності у виготовленні та зварювально-технологічні властивості порівнюваних електродів знаходяться на одному рівні. На підставі результатів досліджень модернізовано склад покриття та технологію виготовлення електродів АНВ-35. Библиогр. 23, табл. 9, рис. 2.

Ключові слова: високолеговані Cr-Ni сталі, дугове зварювання, покриті електроди, зв'язувальні матеріали, технологічні властивості електродних мас, міцність і гігроскопічність електродних покриттів, зварювально-технологічні і гігієнічні властивості електродів, хімічний склад та структура наплавленого металу, механічні властивості металу шва.

Поступила в редакцію 04.07.2016

НОВАЯ КНИГА

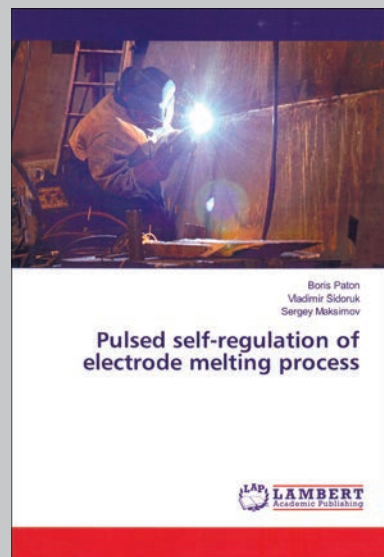
Boris Paton, Vladimir Sidoruk, Sergey Maksimov. PULSED SEF-REGULATION OF ELECTRODE MELTING PROCESS. – LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2016. – 92 с. – ISBN: 978-3-659-87249-5 (на англ. яз.)

Б. Патон, В. Сидорук, С. Максимов. ИМПУЛЬСНОЕ САМОРЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА

В книге раскрывается сущность, и даются примеры использования физического явления импульсного саморегулирования процесса дугового плавления металлического электрода, подаваемого в зону дуги с постоянной скоростью. Процесс имеет колебательный характер с контролируемыми значениями сварочного тока в импульсе и паузе, соответственно — с переменной скоростью плавления электрода. После уменьшения длины дуги ниже определенного значения, которому отвечает наперед заданное «реперное» значение напряжение дуги, сварочный источник самопроизвольно повышает ток, причем импульсно, его значение становится в несколько раз больше средневзвешенного значения тока. В результате этого скорость плавления электрода становится больше скорости его подачи, и длина дуги увеличивается. Соответственно возрастает и напряжение дуги. После того, как это напряжение превысит «реперное» значение, сварочный источник самопроизвольно «сбрасывает» ток до уровня, существенно ниже средневзвешенного его значения. В результате скорость плавления электрода становится существенно меньше скорости его подачи, и длина дуги уменьшается. После снижения напряжения дуги ниже «реперного» его значения сварочный ток вновь увеличивается. Цикл колебательного процесса плавления электрода повторяется.

Самопроизвольная реакция сварочного источника питания на изменение длины дуги обеспечивается формой кривой его вольт-амперной характеристики (ВАХ). Ниже точки «реперного» значения напряжения на кривой ВАХ последняя имеет «жесткий» или «пологопадающий» вид. Выше «реперного» значения напряжения ВАХ имеет вид «крутопадающей» кривой.

С книгой можно ознакомиться в библиотеке ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.



РАСЧЕТНАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРВИЧНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ШВА С ТУГОПЛАВКИМИ ИНОКУЛЯНТАМИ

Д. Ю. ЕРМОЛЕНКО, В. В. ГОЛОВКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрена возможность управления структурой и свойствами металла шва высокопрочных низколегированных сталей с помощью введения в сварочную ванну дисперсных тугоплавких иноксидов в качестве поверхностно активных элементов. Описана методика проведенных экспериментальных исследований по введению различных тугоплавких иноксидов (TiC, TiN, SiC, TiO₂, Al₂O₃, ZrO₂, MgO) в сварочную ванну при сварке высокопрочных низколегированных сталей. Приведены результаты исследований влияния вводимых иноксидов на параметры первичной структуры и основные механические свойства металла исследованных швов. Кратко рассмотрена модель взаимодействия тугоплавких иноксидов с фронтом кристаллизации. Было проведено сравнение параметров первичной структуры металла шва с тугоплавкими иноксидными, полученных путем экспериментальных исследований и вычислительного эксперимента. Результаты данного сравнения показали адекватность предложенной модели взаимодействия тугоплавкого иноксидного с фронтом кристаллизации. Библиогр. 9, табл. 2, рис. 7.

Ключевые слова: дуговая сварка, высокопрочные низколегированные стали, дендритная структура, первичная структура, дисперсные тугоплавкие иноксиды, кристаллизация

Введение в сварочную ванну тугоплавких иноксидов в качестве поверхностно активных частиц является перспективным способом оптимизации структуры и свойств металла шва высокопрочных низколегированных (ВНЛ) сталей за счет управления параметрами структуры и, соответственно, механическими свойствами металла шва. Известно [1, 2], что размер зерен первичной структуры оказывает влияние на характер процессов $\gamma \rightarrow \alpha$ превращений. Если в дисперсной дендритной структуре зарождение α -фазы начинается на границах зерен аустенита в верхней области бейнитного превращения, то для более крупных дендритов характерным является зарождение феррита внутри первичных зерен на границах с неметаллическими включениями при температурах близких к завершению бейнитного превращения [3, 4].

В предыдущих работах [5, 6] была предложена модель кристаллизации, которая позволяет моделировать качественные изменения дендритной структуры металла шва в зависимости от поверхностных свойств вводимых иноксидов. Для верификации данной модели проводились экспериментальные исследования влияния дисперсных тугоплавких иноксидов, выступающих в роли поверхностно активных частиц, на первичную структуру и механические свойства металла шва ВНЛ сталей.

Методика. Для исследования влияния тугоплавких иноксидов на величину межфазной энергии в процессе кристаллизации и формирова-

ния конечной структуры металла шва при сварке ВНЛ сталей изготавливались сварные швы с различными тугоплавкими иноксидными. Для сварки в среде защитного газа (Ar + CO₂) использовалась порошковая проволока диаметром 1,6 мм. Сборку и сварку стыковых соединений из листов стали Ст3сп толщиной 20 мм выполняли в соответствии с требованиями ISO 14171:2010 [7] на постоянном токе обратной полярности 240...250 А при напряжении на дуге 31...32 В. Скорость сварки выдерживали в пределах 10...12 м/ч. Иноксиды вводились в сердечник порошковой проволоки. Проводилось 2 серии экспериментов. В первой серии экспериментов в качестве тугоплавких иноксидов вводились карбиды и нитриды TiC, TiN, SiC, во второй серии экспериментов вводились оксиды TiO₂, Al₂O₃, ZrO₂, MgO. Базовая система легирования C-Mn-Cr-Ni-Mo-Si-Cu (без введения тугоплавких иноксидов), реализованная в вариантах НН-0 (первая серия экспериментов, погонная энергия 20...23 Дж/см) и НН-20 (вторая серия экспериментов, погонная энергия 26...28 Дж/см), имела целью формирование металла швов с бейнитной структурой, которая по своим механическим свойствам соответствует низколегированной стали категории прочности K65 (табл. 1).

При выборе типа иноксидов для исследований исходили из их поверхностной активности при взаимодействии с расплавом на основе железа. Размер иноксидов выбирался с учетом их последующего растворения в расплаве металла сварочной ванны. Характеристики материалов,

Таблица 1. Результаты измерения параметров первичной структуры металла швов и их механические свойства

Тип инокулянта	Номер шва	Среднее значение размера первич- ных дендритов $\lambda_{1\text{эксп.}}$, мкм	Угол смачивания инокулянта распла- вом железа θ , град	Временное сопро- тивление разруше- нию σ_B , МПа	Ударная вязкость, KCV , Дж/см ²	
					+20 °C	–20 °C
–	НН-0	25,23	–	774	92	74
TiC	НН-6	26,89	125	715	112	85
TiN	НН-7	23,10	132	712	55	40
SiC	НН-9	30,20	82	726	85	65
–	НН-20	34,94	–	693	97	75
TiO ₂	НН-22	41,63	≈ 0	709	85	60
Al ₂ O ₃	НН-23	31,60	40	728	82	50
MgO	НН-24	27,22	123	644	103	69
ZrO ₂	НН-25	29,41	102	622	120	73

Таблица 2. Свойства тугоплавких инокулянтов $T_{пл}$ и их краевые углы смачивания расплавом железа θ [8]

Тип инокулянта	Температура плавления, $T_{пл}$, °C	Поверхностное натя- жение жидкой фазы σ_1 , мДж/м ²	Краевой угол смачивания θ , град	Работа адгезии W_a , мДж/м ²
TiC	3260	1780	125	760
TiN	2930	1780	132	590
SiC	2730	1780	82	2030
TiO ₂	1843	1780	≈ 0	3560
Al ₂ O ₃	2044	1785	40	3155
ZrO ₂	2715	1785	102	1020
MgO	2852	1810	123	825

выбранных для проведения экспериментов, приведены в (табл. 2).

Первичную структуру металла шва исследовали методами оптической металлографии (оптический микроскоп «НЕОРНОТ-30») на полированных образцах, протравленных в кипящем растворе пикрата натрия $C_6H_2(NO_2)_3ONa$ в воде. Исследовали микроструктуру последнего прохода многопроходного металла шва (т. е. литую структуру). Образцы вырезали в направлении перпендикулярном продольной оси шва таким образом, чтобы на поверхности шлифа были видны дендриты, которые вырастали в направлении наибольшего термического градиента в сварочной

ванне (рис. 1). Механические свойства металла сварных швов определяли согласно ГОСТ 6996–66 [9].

При исследовании первичной структуры по изображениям, полученным методом оптической микроскопии, определяли размеры столбчатых дендритов (размеры λ_1 на рис. 2). Размеры вторичных дендритов не определяли, так как они крайне слабо выражены при данных условиях сварки. Изображения характерных дендритных структур исследуемых образцов приведены на рис. 1. Результаты измерения параметров первичной структуры и механических свойств исследованных образцов приведены в табл. 1.

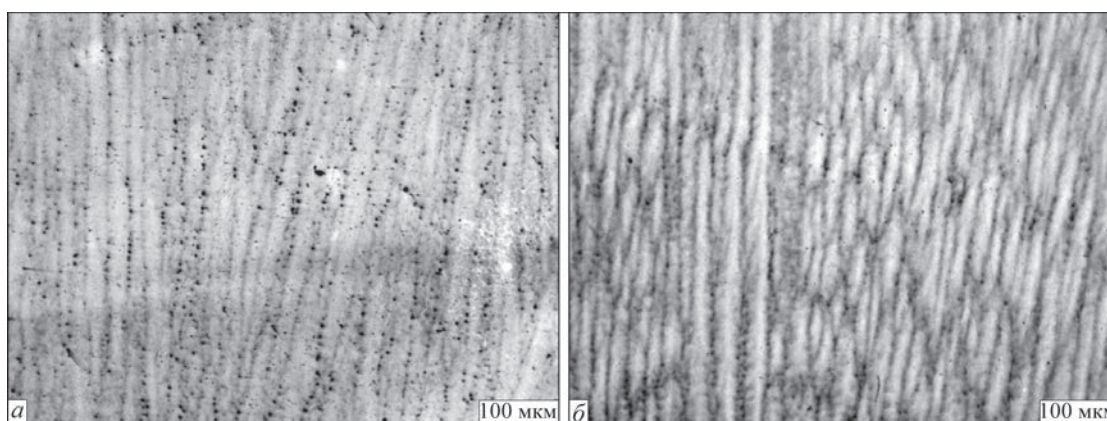


Рис. 1. Первичная структура (×320) металла шва исследованных образцов: а — образец НН-23; б — образец НН-25

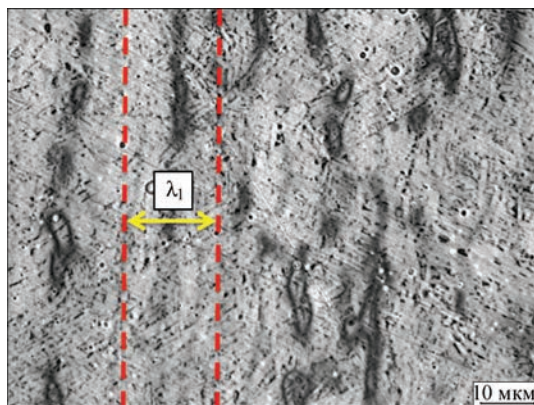


Рис. 2. Первичная структура ($\times 1000$) исследуемого образца: λ_1 — расстояние между осями первичных дендритов

На рис. 3 и 4 показаны графики зависимости параметров первичной структуры от угла смачивания тугоплавких иноксулянтов расплавом железа для первой и второй серии экспериментов соответственно. Полученные результаты говорят о том, что с помощью введения тугоплавких иноксулянтов в сварочную ванну в качестве поверхностно активных элементов возможно управлять параметрами первичной структуры, в частности размером первичных дендритов. Уменьшение размера столбчатых дендритов с увеличением угла смачивания связано с уменьшением локальной скорости кристаллизации в зоне контакта тугоплавкого иноксулянта с расплавом металла сварочной ванны. Однако уменьшение локальной скорости кристаллизации в зоне контакта расплава и иноксулянта также подразумевает качественное изменение морфологии первичной структуры металла шва. Данное предположение подтверждается экспериментально при анализе изображений первичной структуры металла швов с иноксулянтами, имеющими различные углы смачивания расплавом металла сварочной ванны. Это различие можно увидеть на рис. 1. При инокулировании металла шва оксидом алюминия Al_2O_3 наблюдаются

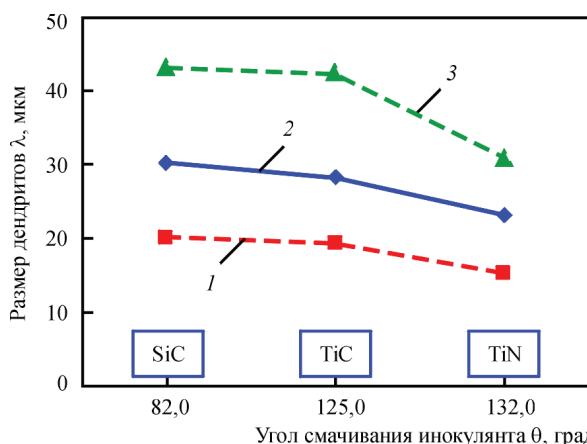


Рис. 3. Зависимость параметров первичной структуры от угла смачивания тугоплавких иноксулянтов расплавом железа первой серии экспериментов: 1 — минимальные значения; 2 — усредненные; 3 — максимальные

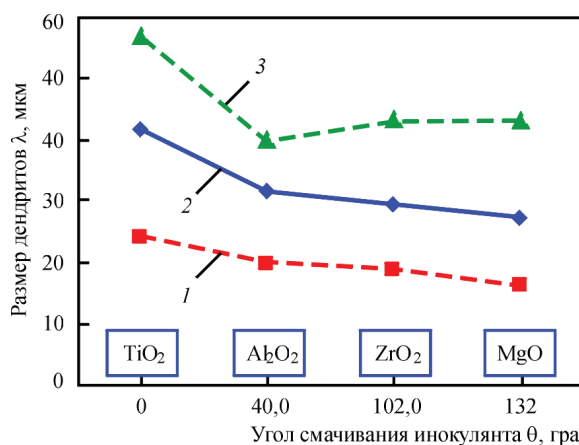


Рис. 4. Зависимость параметров первичной структуры от угла смачивания тугоплавких иноксулянтов расплавом железа второй серии экспериментов: 1 — минимальные значения; 2 — усредненные; 3 — максимальные

преимущественно прямые столбчатые дендриты, пролегающие через всю видимую область снимка (рис. 1, а). А при инокулировании металла шва оксидом циркония ZrO_2 наблюдаются короткие столбчатые дендриты, образованные в результате конкурирующего роста (рис. 1, б).

Расчетные эксперименты. В основу модели взаимодействия тугоплавких иноксулянтов с фронтом кристаллизации была положена база данных, построенная на массиве экспериментальных результатов. Эта модель описывает взаимодействие тугоплавкого иноксулянта с границей раздела фаз на фронте кристаллизации, в результате которого происходит изменение межфазной энергии, что приводит к изменению локальной скорости движения фронта кристаллизации. В модели принято, что тугоплавкие иноксулянты распределены равномерно в объеме сварочной ванны с некоторым коэффициентом ϕ ($0 \leq \phi \leq 1$). Также принято, что тугоплавкие иноксулянты являются неподвижными в процессе кристаллизации и имеют одинаковый размер, который сопоставим с размером ячейки использованной вычислительной сетки ($\approx 0,4$ мкм). Параметр распределения тугоплавких иноксулянтов в металле сварочной ванны ϕ был принят равным 0,3 для всех вычислений; данный выбор основан на результатах работы [5].

На рис. 5 показано визуальное соответствие дендритных структур образцов НН-0 и НН-20, полученных экспериментальным способом и путем расчетного эксперимента. Следует отметить, что в результате расчета были получены структуры, отражающие морфологию дендритной структуры реальных образцов.

Измерения расстояния между осями первичных дендритов $\lambda_{1расч.}$ образцов с добавлением различных тугоплавких иноксулянтов (TiC , TiN , SiC , TiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO), полученные путем вычислительного эксперимента, проводились анало-

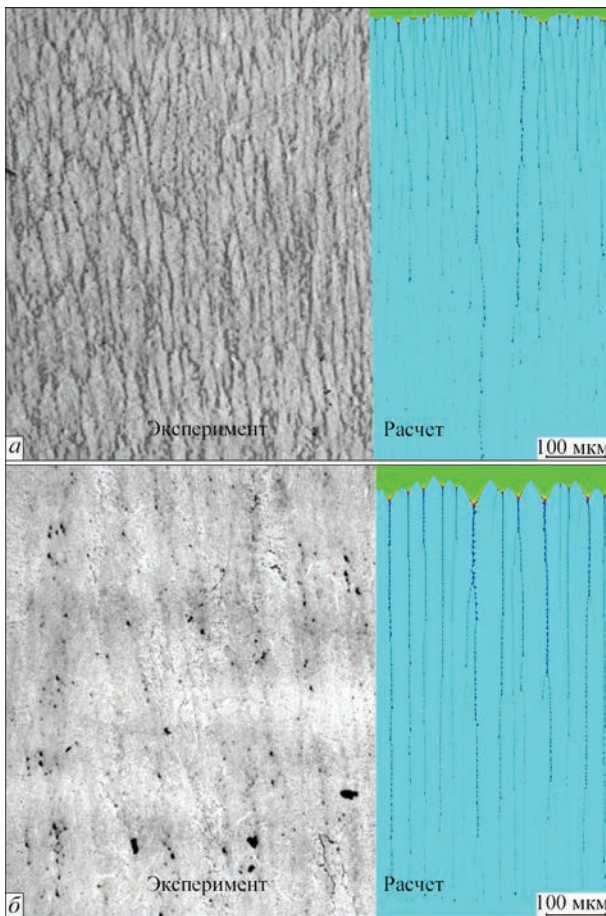


Рис. 5. Визуальное соответствие первичной структуры образцов HH-0 (а) и HH-20 (б) с первичной структурой, полученной путем вычислительного эксперимента

гично методике обработки изображений первичной структуры, полученных методом оптической металлографии (рис. 2).

На рис. 6 и 7 представлено сравнение размеров дендритов первичной структуры, полученных расчетным $\lambda_{\text{расч.}}$ и экспериментальным путем $\lambda_{\text{эксп.}}$ для образцов первой и второй серии соответственно. Проанализировав данные зависимости, можно сделать вывод о том, что тенденция уменьшения расстояния между осями первичных дендритов с увеличением угла смачивания тугоплавких инокулянтов расплавом металла сварочной ванны сохраняется в соответствии с полученными экспериментальными данными, описанными выше. Таким образом, следует предположить, что предложенная математическая модель и разработанное на ее основе программное обеспечение позволяют получить адекватные прогнозы параметров первичной структуры металла шва ВПНЛ сталей.

Средняя ошибка данных, полученных путем вычислительного эксперимента, составляет около 25 %. Такую разницу в полученных результатах следует связать с выбором параметра распределения тугоплавких инокулянтов в металле сварочной ванны ϕ равным 0,3, что, видимо, не точно соответствует условиям проведенных экс-

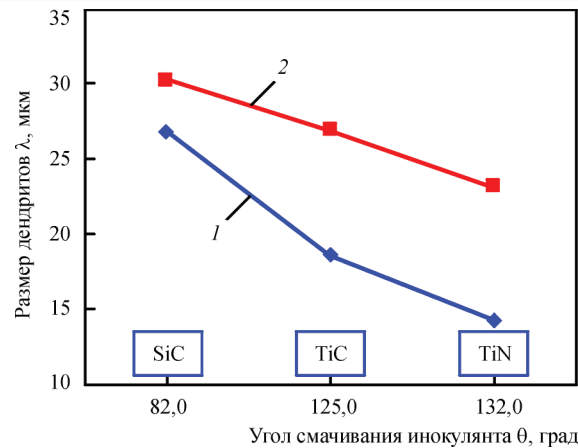


Рис. 6. Сопоставление экспериментальных и расчетных результатов измерения параметров первичной структуры металла швов образцов первой серии экспериментов: 1 — $\lambda_{\text{расч.}}$; 2 — $\lambda_{\text{эксп.}}$

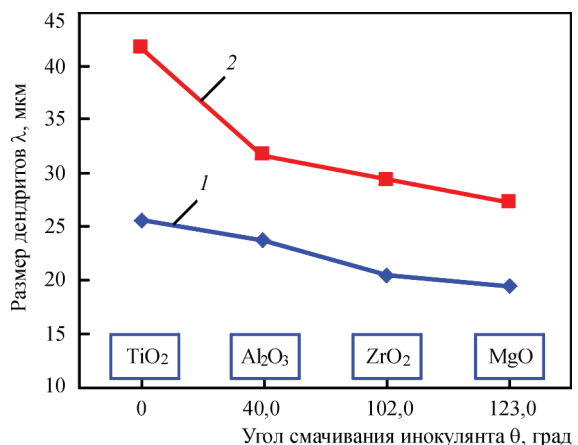


Рис. 7. Сопоставление экспериментальных и расчетных результатов измерения параметров первичной структуры металла швов образцов второй серии экспериментов: 1 — $\lambda_{\text{расч.}}$; 2 — $\lambda_{\text{эксп.}}$

периментальных исследований. Незначительное увеличение ошибки с увеличением угла смачивания инокулянта расплавом металла сварочной ванны следует связать с изменением характера их распределения в металле шва за счет качественного изменения морфологии дендритной структуры при введении инокулянтов с высокими углами смачивания. Данные замечания следует учесть в дальнейшей разработке модели.

Выводы

Предложенная модель влияния тугоплавких инокулянтов как поверхностно активных частиц на процесс кристаллизации металла сварочной ванны подходит для прогнозирования размерных параметров и морфологии первичной структуры металла швов ВПНЛ сталей. Разработанное на основе данной модели программное обеспечение позволяет выбрать тугоплавкие инокулянты и их количество для оптимизации параметров первичной структуры металла шва, а как следствие — его

механических свойств в соответствии с поставленными требованиями.

1. Головки В. В. Влияние введения в сварочную ванну титаносодержащих инокулянтов на структуру и свойства металла швов высокопрочных низколегированных сталей / В. В. Головки, С. Н. Степанюк, Д. Ю. Ермоленко // Автоматическая сварка. – 2015. – № 2. – С. 16–20.
2. Головки В. В. Технология сварки высокопрочных низколегированных сталей с введением титаносодержащих инокулянтов / В. В. Головки, С. Н. Степанюк, Д. Ю. Ермоленко // Наноразмерные системы и наноматериалы: исследования в Украине / [Коллективная монография; под. ред. А. Г. Наумовца]. – НАН Украины. – К.: Издательский дом «Академпериодика», 2014. – 768 с, 4 с. ил. – ISBN 978-966-360-260-8. – С. 395–399.
3. Influence of aluminum content on the characterization of microstructure and inclusions in high-strength steel welds / W. Vanovsek, C. Bernhard, M. Fiedler, G. Posch // Welding in the World. – 2013. – V. 57, Issue 1. – P. 73–83.
4. Effects of soluble Ti and Zr content and austenite grain size on microstructure of simulated heat affected zone in Fe–C–Mn–Si alloy / ISIJ International. – 2011. – V. 51, № 9. – P. 1542–1533.
5. Ермоленко Д. Ю. Прямое численное моделирование развития дендритной структуры металла шва при сварке плавлением высокопрочных низколегированных сталей с учетом влияния дисперсных тугоплавких инокулянтов / Д. Ю. Ермоленко, А. В. Игнатенко, В. В. Головки // Автоматическая сварка. – 2016. – № 12. – С. 15–22.
6. Галенко П. К. Изотермический рост кристаллов в переохлажденных бинарных сплавах / П. К. Галенко, М. Д. Кривилев // Математическое моделирование. – 2000. – Т. 12. – № 11. – С. 17–37.
7. ISO 26304:2011: Welding consumables. – Solid wire electrodes, tubular cored electrodes and electrode- flux combinations for submerged arc welding of high strength steels. – Classification.

8. Панасюк А. Д. Стойкость неметаллических материалов в расплавах / А. Д. Панасюк, В. С. Фоменко, Т. Г. Глебова. – К.: Наукова думка, 1986. – 351 с.
9. ГОСТ 6996–66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств.

Д. Ю. Ермоленко, В. В. Головки

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.

03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

РОЗРАХУНКОВА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ФОРМУВАННЯ ПЕРВИННОЇ СТРУКТУРИ МЕТАЛУ ШВА З ТУГОПЛАВКИМИ ІНОКУЛЯНТАМИ

Розглянуто можливість управління структурою і властивостями металу шва високоміцних низьколегованих сталей за допомогою введення в зварювальну ванну дисперсних тугоплавких інокулянтів як поверхнево активних часток. Описана методика проведених експериментальних досліджень по введенню різних тугоплавких інокулянтів (TiC, TiN, SiC, TiO₂, Al₂O₃, ZrO₂, MgO) в зварювальну ванну при зварюванні високоміцних низьколегованих сталей. Наведено результати досліджень впливу введення інокулянтів на параметри первинної структури і основні механічні властивості металу досліджених швів. Коротко розглянута модель взаємодії тугоплавких інокулянтів з фронтом кристалізації. Було проведено порівняння параметрів первинної структури металу швів з тугоплавкими інокулянтами, отриманих шляхом експериментальних досліджень та обчислювального експерименту. Результати даного порівняння показали адекватність запропонованої моделі взаємодії тугоплавкого інокулянту з фронтом кристалізації. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: дугове зварювання, високоміцні низьколеговані сталі, дендритна структура, первинна структура, дисперсні тугоплавкі інокулянти, кристалізація

Поступила в редакцію 19.10.2016

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є. О. ПАТОНА НАНУ
МІЖНАРОДНА АСОЦІАЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ»

**Міжнародна конференція
ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ – СЬОГОДЕННЯ І МАЙБУТНЄ**

Присвячується 100-річчю
Національної академії наук України

5 – 6 грудня, 2018 р.
Україна, м. Київ

Голова:
академік НАН України Л. Лобанов

НАУКОВІ НАПРЯМКИ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Технології, матеріали і обладнання для зварювання і споріднених процесів
- Міцність зварних конструкцій, теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформуючих станів та їх регулювання
- Вдосконалення зварних конструкцій, автоматизація їх розрахунку і проектування, оцінка і подовження ресурсу
- Нові конструкційні матеріали
- Неруйнівний контроль і технічна діагностика
- Інженерія поверхні
- Зварювання в медицині – технології, обладнання; наноматеріали і нанотехнології
- Проблеми екології зварювального виробництва
- Спеціальна електрометалургія
- Стандартизація, сертифікація продукції зварювального виробництва, підготовка і атестація спеціалістів

Відправлення тез доповідей для участі в роботі конференції – до 01.11.2017 р.

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України
вул. Казимира Малевича (Боженка), 11, м. Київ, 03680
тел.: (38044) 200-60-16, 200-47-57, факс: (38044) 528-04-86
E-mail: office@paton.kiev.ua
www.paton.kiev.ua | www.patonpublishinghouse.com

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДУГОВЫХ И ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫХ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СМЕСИ

А. Ф. ВЛАСОВ, Н. А. МАКАРЕНКО, Д. А. ВОЛКОВ

Донбасская государственная машиностроительная академия. 84313, г. Краматорск, ул. Шкадинова, 72.

E-mail: sp@dgma.donetsk.ua

Доказано, что введение в покрытие электродов экзотермической смеси до 53,4 % приводит к увеличению коэффициентов: расплавления стержня, наплавки, скорости плавления электродов и расплавления покрытия электродов. Повышение толщины покрытия электродов, содержащих 44,4 % экзотермической смеси, от 0,5 до 2,6 мм приводит к увеличению количества экзотермической смеси и коэффициента наплавки, к снижению значения коэффициента расплавления стержня, увеличению массовой скорости плавления покрытия. Доказано, что эффективным способом повышения производительности электрошлаковых процессов является использование экзотермического флюса: окалины, ферросплавов, алюминиевого порошка и стандартного флюса (АНФ-6 и др.) в количествах, достаточных для протекания экзотермических реакций, что обеспечивает выделение дополнительного тепла в стартовый период электрошлаковых процессов и способствует ускоренному наведению шлаковой ванны необходимого объема на «твердом» старте как по монофилярной, так и бифилярной схемам ведения процесса взамен «жидкого» старта. Электрошлаковые процессы с использованием экзотермического легированного флюса на «твердом» старте позволяют получать (по сравнению с существующими способами наведения шлаковой ванны) увеличение выхода годного металла на 2...10 %; экономию на расплавлении 1 кг стандартного флюса 1,2...1,4 кВт·ч; сокращение времени стартового периода процесса ЭШП до 25 %. Установлено, что введение в экзотермические флюсы алюминия в качестве раскислителя увеличивает содержание в шлаковой ванне оксида алюминия (Al_2O_3), ее сопротивление и повышает производительность электрошлакового процесса. Библиогр. 21, рис. 5.

Ключевые слова: электрод, экзотермическая смесь, экзотермический флюс, шлаковая ванна, производительность процесса

В настоящее время ручная дуговая сварка покрытиями электродами все еще остается одним из широко применяемых технологических процессов. В передовых промышленно развитых странах объем работ, выполняемых с применением ручной дуговой сварки, составляет 20...25 % от их общего объема, а в странах постсоветского пространства он достигает 60...70 % [1–4]. Особенно высокий показатель наблюдается в строительной индустрии, где он может превышать 80...85 % [2, 3], что обязывает уделять самое серьезное внимание совершенствованию ручной дуговой сварки: в первую очередь это относится к разработке высокопроизводительных сварочных электродов — одному из главных факторов, определяющих технологическую эффективность процесса сварки [5–8].

Одной из главных задач, стоящих перед разработчиками сварочных материалов, является изыскание новых видов сырья для их изготовления и определение путей интенсификации сварочных и металлургических процессов. Одним из направлений решения данной задачи является использование эффекта экзотермических реакций за счет введения в состав сварочных материалов экзотермических металлофлюсовых смесей, проводящих

электрический ток в твердом состоянии и представляющих собой механическую смесь окалины, алюминиевого порошка, легирующих элементов (в виде ферросплавов или порошков) и рабочего флюса (например, АНФ-6 или др.).

Данную задачу возможно решить, используя эффект экзотермических реакций в покрытии электродов до расплавления электродного стержня путем введения в состав покрытия используемых материалов в виде окислителей (окалины, гематита, марганцевой руды и др.) и раскислителей (ферротитана, ферросилиция, алюминиевого порошка и др.). Следует отметить, что данные о влиянии теплового эффекта экзотермических реакций на сварочно-технологические свойства электродов в специализированной литературе ограничены [9–11].

Оксиды железа, вводимые в электродные покрытия в виде окалины, позволяют использовать эффект увеличения насыпного веса железного порошка и его положительного влияния на технологичность изготовления электродов. Кроме того, в результате протекания экзотермической реакции при плавлении электродного покрытия с экзотермической смесью, образующееся восстановленное железо поступает в шов, повышая производительность процесса сварки, а выделившееся тепло

способствует ускорению плавления покрытия и электрода в целом.

Известно [12–14], что в результате экзотермической реакции выделяется дополнительная тепловая мощность. Установлено [13], что расход теплоты экзотермической реакции на нагрев и плавление сердечника приближается к величине 10 кДж/с, что достаточно для равномерного плавления сердечника и оболочки. Производительность расплавления порошковых лент увеличивается на 40...60 %, а наплавки — на 30 %. Кроме того, достигается экономия электроэнергии (1500 кВт·ч на 1 т наплавленного металла).

Цель работы — интенсификация ручной дуговой сварки и электрошлаковых процессов путем разработки сварочных материалов с использованием при их изготовлении экзотермических смесей.

Применяемые в настоящее время в промышленности электроды для сварки и наплавки характеризуются низкой производительностью (коэффициент наплавки не превышает 8,5...9, 5 г/А·ч), поэтому повышение производительности ручной дуговой сварки (наплавки) и изыскание новых видов сырья для их изготовления является одной из главных задач, стоящих перед разработчиками наплавочных материалов.

Одним из основных путей увеличения производительности ручной дуговой сварки (наплавки) является введение в состав покрытия электродов железного порошка. При содержании в электродах железного порошка в пределах значений 15...25 % улучшаются их сварочно-технологические свойства без существенного изменения коэффициента наплавки. Наибольшая производительность достигается при содержании в покрытии электродов железного порошка в количестве 60...70 % при коэффициенте массы покрытия в пределах 100...200 % (такие электроды получили название «высокопроизводительные»). Однако удельный вес применяемых в нашей стране «высокопроизводительных» электродов (вследствие необходимости использования в этом случае источников питания с повышенным напряжением холостого хода, дефицитности железного порошка, сложности обеспечения качественного их изготовления в поточных линиях «электродный пресс–конвейерная прокаточная печь» очень мал. Дальнейший рост производства прогрессивных марок электродов также ограничивается дефицитом (как на мировом рынке, так и в нашей стране) ряда сырьевых материалов, таких как железный порошок, рутиловый концентрат и др.

В настоящей работе поставленная цель решалась применением экзотермических металлофлюсовых смесей, представляющих собой механи-

ческую смесь окислы, алюминиевого порошка, легирующих элементов в виде ферросплавов (ферромарганца, ферротитана, ферросилиция) при ручной дуговой сварке и экзотермических флюсов (экзотермическая смесь + стандартный флюс) в электрошлаковых процессах.

Интенсифицировать сварочные процессы возможно введением в состав сварочных материалов экзотермических смесей. Проведенными исследованиями [15] установлено, что при изменении содержания в покрытии электродов экзотермической смеси от 35 до 64 % прирост температуры составил 1280° и является достаточным для полного расплавления ферросплавов.

Скорость или производительность плавления электрода, оцениваемая в основном изменением длины или массы расплавленного стержня электрода в единицу времени, является важной характеристикой сварочного процесса и зависит от многих факторов, главными из которых являются сварочный ток, состав покрытия, род и полярность тока.

При введении в покрытие электродов экзотермической смеси выделяется дополнительное количество тепла за счет химической реакции, происходящей между оксидами железа и элементами–раскислителями. Наибольшее количество тепла выделяется при взаимодействии алюминия с закисью железа, а наименьшее — при взаимодействии марганца с закисью железа ($q^{Al} = 3268$, $q^{Ti} = 2171,1$, $q^{Si} = 2224,7$, $q^{Mn} = 950,8$ Дж/г).

Для определения влияния количества экзотермической смеси на показатели плавления электрода изготавливались электроды, содержащие в покрытии мрамор, плавиковый шпат, рутиловый концентрат, ферромарганец, ферротитан, железную окислу и алюминиевый порошок, имеющие диаметр стержня 5,0 мм и различное содержание в покрытии экзотермической смеси при постоянном значении коэффициента массы покрытия ($K_{\Pi} = 0,6$). Расплавление электродов выполнялось при одинаковых значениях сварочного тока (290 А), его плотности (24,8 А/мм²) при напряжении холостого хода источника питания 60 В. Для определения влияния толщины покрытия электродов с экзотермической смесью на технологические характеристики их плавления изготавливались электроды с диаметром стержня 5,0 мм и толщиной покрытия 0,5...2,6 мм, что соответствовало изменению коэффициента массы покрытия от 0,17 до 1,14. Количество экзотермической смеси в исследуемых электродах составляло 44, 4 % массы покрытия.

Значения экспериментальных данных приведены на рис. 1. Доказано, что введение в электродные покрытия экзотермической смеси (рис. 1, а) приводит к увеличению коэффициентов: рас-

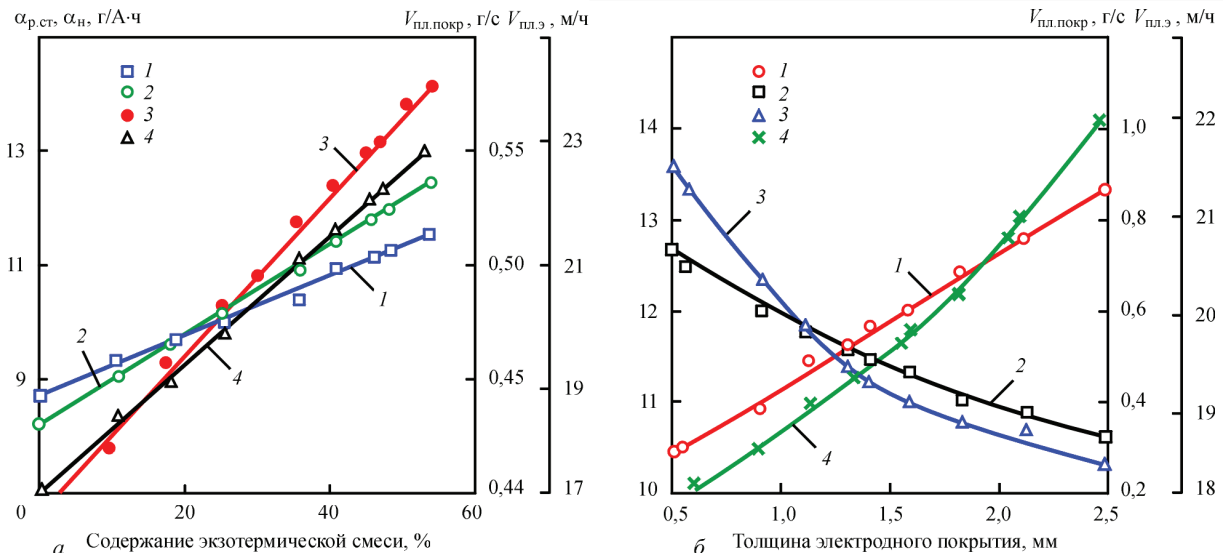


Рис. 1. Изменение показателей плавления электродов в зависимости от количества в покрытии экзотермической смеси (а) и толщины покрытия (б)

плавления стержня ($\alpha_{p,ст} = 8,7...11,4$ г/А·ч), наплавки ($8,0...12,5$ г/А·ч) и расплавления электродов ($9...19$ г/А·ч), скорости плавления электродов ($17...23$ м/ч) [16, 17].

Экспериментально установлено, что повышение толщины покрытия электродов (рис. 1, б) приводит к увеличению количества экзотермической смеси, восстановленного железа, коэффициента наплавки ($\alpha_n = 10,4...13,4$ г/А·ч), к снижению коэффициента расплавления стержня ($\alpha_{p,ст} = 12,8...10,5$ г/А·ч) и скорости плавления электрода ($21,5...18,3$ м/ч). Уменьшение $\alpha_{p,ст}$ с увеличением толщины покрытия указывает, что теплота, образующаяся при протекании экзотермической реакции, расходуется в основном на плавление покрытия, увеличивая его массовую скорость плавления ($0,18...1,03$ г/с).

Определение влияния количества экзотермической смеси и толщины покрытия электродов с эк-

зотермической смесью на нагрев изделия и плавление электрода (рис. 2) производилось методом калориметрирования.

Влияние теплового эффекта экзотермического процесса, возникающего при плавлении электродов с экзотермической смесью в покрытии, определено экспериментально путем расплавления электродов на постоянном токе обратной полярности при значениях сварочного тока 290 А и напряжении холостого хода источника питания 60 В и проанализировано с помощью статистической обработки с использованием программы «Статистика».

Установлено, что введение в состав покрытия электродов экзотермической смеси до 53,4 % (рис. 2, а) изменяет η_n от 0,715 до 0,815 и $\eta_э$ от 0,28 до 0,415; при этом изменение носит прямопропорциональный характер. Увеличение количества наплавленного металла ($q_{н.м}^k = 10,5...21,0$ г),

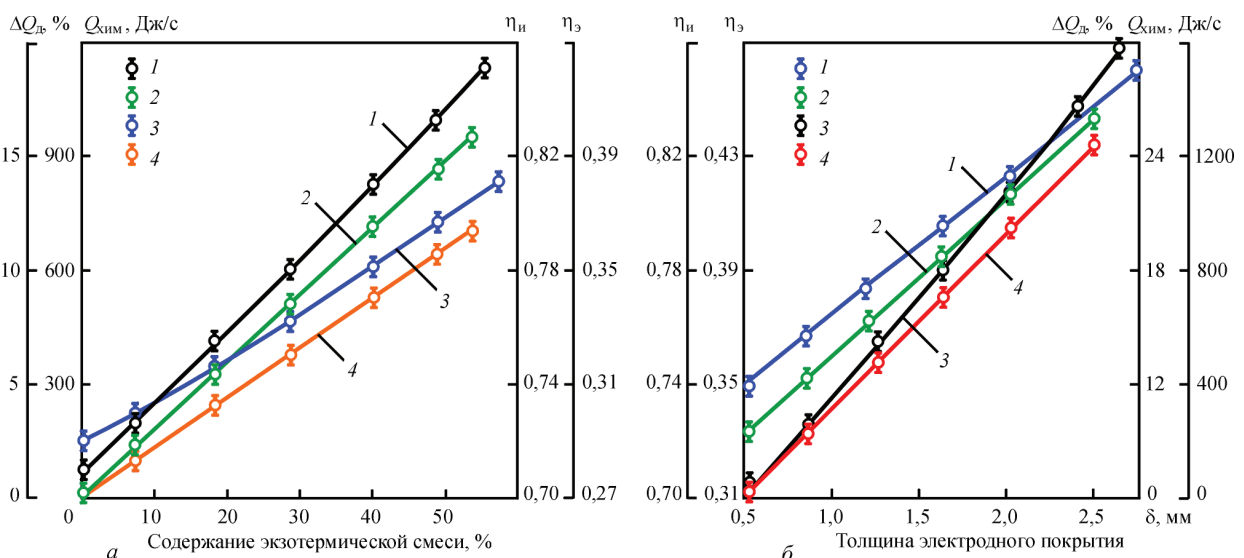


Рис. 2. Влияние количества экзотермической смеси в покрытии электродов (а) и толщины покрытия (б) на тепловые характеристики плавления

расплавляемого стержня ($q_{p,ст}^k = 14,0...19,0$ г) и покрытия ($q_{p,п}^k = 8,5...11,4$ г), а также тепловой мощности дуги ($\Delta Q_{ид}/Q_{1д} = 0...12$ %) при почти одинаковом количестве шлака на пластине ($q_{ш.л.}^k$) показывает, что дополнительный нагрев пластины происходит в основном за счет увеличения количества электродного металла за один и тот же промежуток времени и за счет увеличения тепловой мощности дуги.

Исследования показали, что с изменением толщины покрытия электродов от 0,5 до $2,6 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 2, б) повышается содержание экзотермической смеси; увеличивается количество тепла и восстановленного железа при протекании экзотермической реакции. Количество наплавленного металла и шлака на основном металле при калориметрировании повысилось, соответственно, с 17,5 до 21,0 г и от 2,0 до 13,0 г, что привело к изменению $\eta_{и}$ от 0,74 до 0,84; пропорциональное повышение $\eta_{э}$ от 0,31 до 0,47, несмотря на снижение их скорости плавления, происходит из-за увеличения тепловой мощности дуги и удельных затрат теплоты ($K_{э} + K_{э}^{хим}$) на плавление электрода.

Несмотря на снижение количества расплавляемого стержня, с увеличением толщины покрытия электродов количество наплавленного металла увеличивается, что возможно только при условии интенсивного восстановления железа из его оксида. Уменьшение же $\alpha_{p,ст}$ с увеличением толщины покрытия показывает, что теплота, образующаяся при протекании экзотермической реакции, расходуется в основном на плавление покрытия, увеличивая его массовую скорость плавления (0,18..1,03 г/с). Кроме того, часть тепла покрытию передается от стержня, вследствие чего снижается нагрев стержня и его скорость плавления. В связи с тем, что во всех исследованных составах электродов процентное содержание экзотермической смеси было одинаково, а изменялось лишь ее массовое количество, происходило лишь увеличение восстанавливаемого железа из его оксидов и наблюдалось повышение производительности расплавления покрытия электродов.

В связи с тем, что увеличение содержания экзотермической смеси в исследуемых электродах, т. е. металлической составляющей покрытия, происходит за счет соответствующего уменьшения содержания газшлакообразующей части покрытия, то снижаются затраты тепла на плавление покрытия, так как теплосодержание железа ниже чем шлака, и увеличивается доля тепла, идущего на расплавление стержня, а также на разогрев капель.

Из приведенного следует, что электроды с экзотермической смесью в покрытии наиболее целесообразно использовать при наплавке. Коэффициент наплавки электродов, содержащих

в покрытии 44,4 % экзотермической смеси составляет 11,8...12,5 г/А·ч; скорость плавления – 21,5...25 м/ч; оптимальный сварочный ток из-за повышенной скорости плавления и отсутствия перегрева в процессе наплавки для электродов диаметром 5,0 мм составляет 280...300 А.

Разработаны статистические модели, позволяющие определить оптимальное содержание экзотермической смеси и толщины покрытия электродов. Моделирование процесса плавления осуществлялось при помощи программной системы Статистика 6. Наибольшее распространение получили эксперименты, в которых факторы варьируются на двух уровнях, т. е. эксперименты типа 2^k .

Факторы: количество экзотермической смеси Q и коэффициент массы покрытия электрода $K_{п}$. Отклик — коэффициенты расплавления электрода $\alpha_{p,э}$; скорости плавления электрода $V_{пл,э}$ и покрытия электрода $V_{пок}$ (рис. 3).

Уравнения регрессии имеют вид:

$$\begin{aligned} \alpha_p &= 10,55238 + 2,29644K_{п} - 3,24688K_{п}^2 + \\ &+ 0,18470Q - 0,00240Q^2 + 0,05875K_{п}Q, \text{ г/А·ч;} \\ V_{пл,э} &= (4,68931 - 0,0004K_{п} + 0,001974Q + \\ &+ 0,000553Q^2 + 0,000057K_{п}Q)10^{-2}, \text{ м/с;} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_{пок} &= (0,475801 + 0,003526K_{п} - 0,003735K_{п}^2 + \\ &+ 0,01418Q - 0,005248Q^2 + 0,000411K_{п}Q), \text{ г/с.} \end{aligned}$$

Факторы: количество экзотермической смеси Q и толщина покрытия электрода $\delta_{п}$, $Q_{хим}/Q_{э}$. Отклик — КПД нагрева изделия $\eta_{и}$, электрода $\eta_{э}$ и отношения теплот $Q_{хим}/Q_{э}$ (рис. 4).

Уравнения регрессии имеют вид:

$$\begin{aligned} \eta_{э} &= 0,37767 + 0,0059418\delta_{п} + 0,008338\delta_{п}^2 + \\ &+ 0,002299Q + 0,00115Q^2 - 0,04041\delta_{п}Q; \\ \eta_{и} &= 0,76075 + 0,94813\delta_{п} + 0,93457\delta_{п}^2 + \\ &+ 0,00648Q + 0,00007Q^2 - 0,06425\delta_{п}Q; \\ Q_{хим}/Q_{э} &= 9,71120 + 0,4979\delta_{п} + 0,2795\delta_{п}^2 - \\ &- 0,01102Q + 0,001453Q^2 - 0,01778\delta_{п}Q. \end{aligned} \quad (2)$$

Электрошлаковые процессы осуществляются на «твердом» или «жидком» старте [16]. При «твердом» старте расплавление рабочего флюса, наведение шлаковой ванны необходимого объема осуществляется в дуговом режиме. Способ характеризуется нестабильностью (частыми короткими замыканиями), неравномерным и длительным расплавлением флюса (низкой производительностью). Электрошлаковая технология производства крупных заготовок осуществляется в печах бифилярного или трехфазного типа с использованием только «жидкого» старта путем сифонной заливки расплавленного за пределами печи шлака в нижнюю часть кармана при электрошлаковой сварке (ЭШС), кристаллизатора при электрошлаковом переплаве (ЭШП) или заливки в тигель при электрошлаковом кокильном литье (ЭКЛ). Однако трудоемкость выплавки заготовки с учетом времени расплавления флюса во флюсоплавильных пе-

чаж значительно выше по сравнению с «твердым» стартом.

Сущность разработанного способа старта заключается в следующем (рис. 5).

Благодаря наличию в первом (б) и втором (5) слоях экзотермической смеси достигается ускорение расплавления рабочего флюса за счет сни-

жения электропроводности шлака и тепла, выделяющегося при взаимодействии оксидов железа с алюминием. В первом слое (б) от экзотермических реакций развиваются температуры, способствующие быстрому расплавлению рабочего флюса и разогреву расходующего электрода. Уменьшение электропроводности шлака достигается введением в

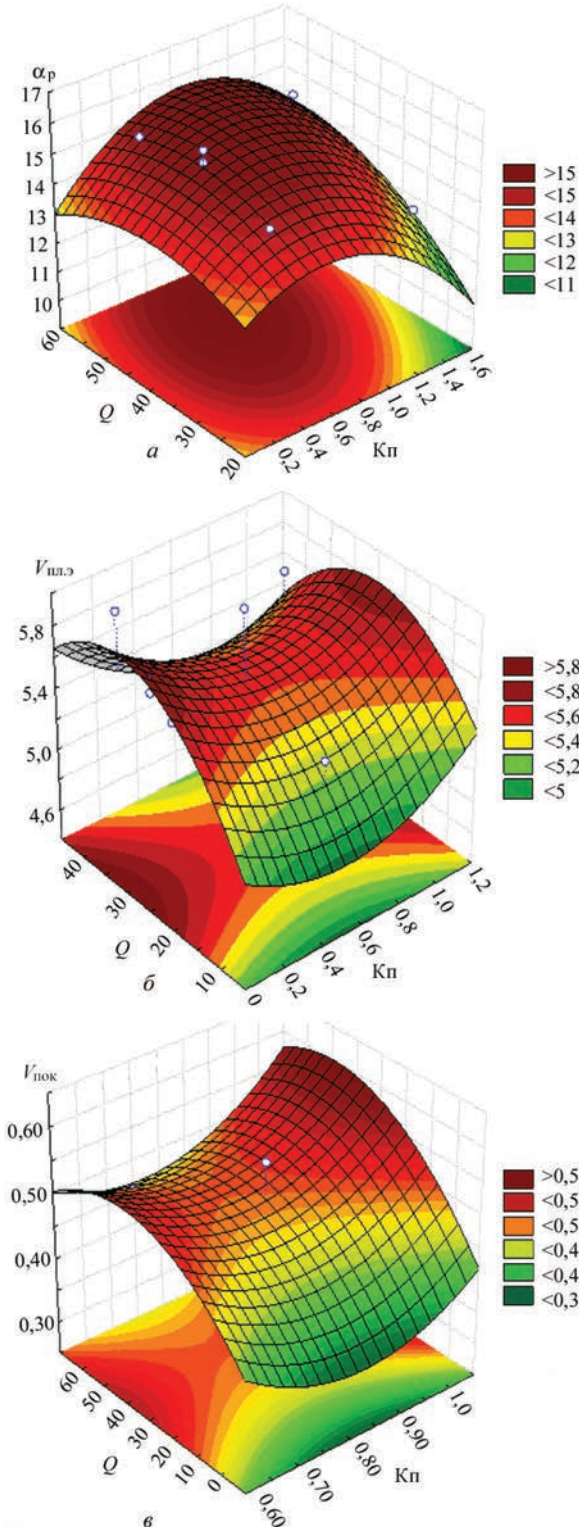


Рис. 3. Зависимость коэффициента расплавления α_p (а), скорости плавления электрода $V_{пл.э}$ (б) и покрытия электрода $V_{пок}$ (в) от количества экзотермической смеси Q и коэффициента массы электродного покрытия $K_{п}$

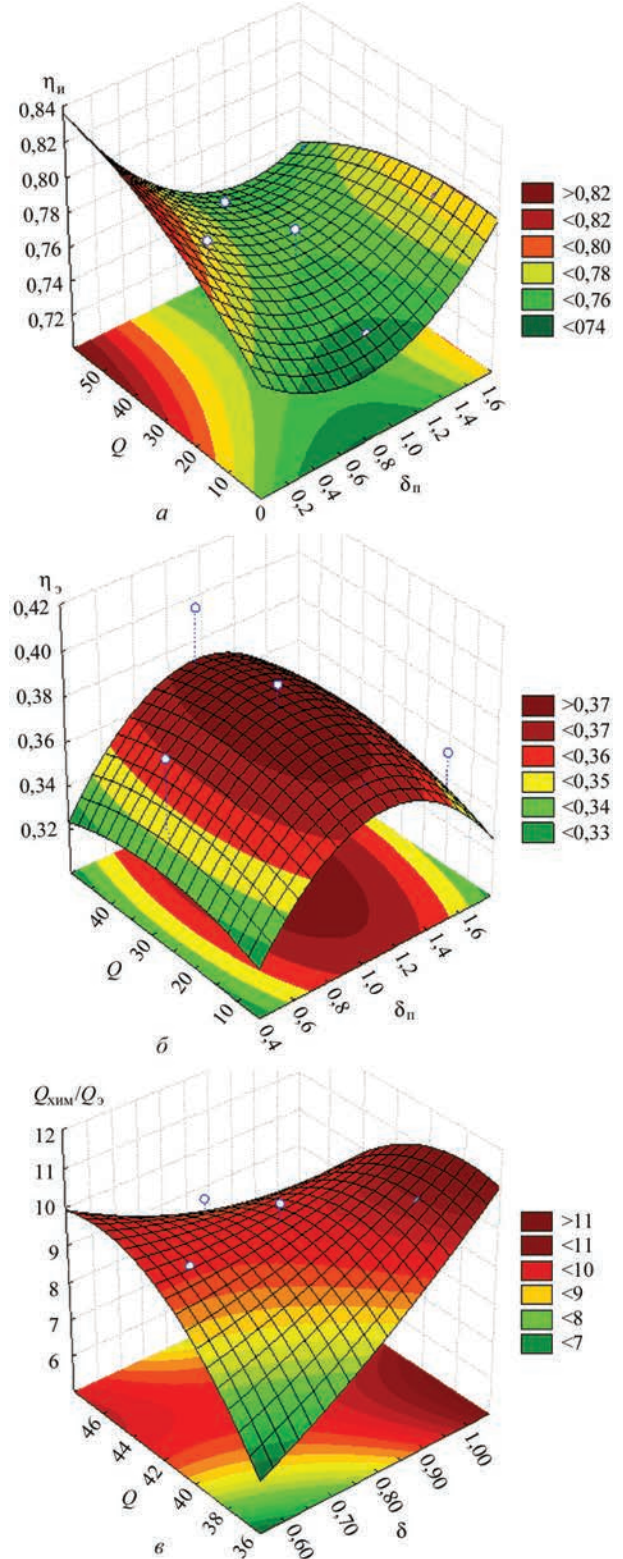


Рис. 4. Зависимость КПД нагрева изделия $\eta_{из}$ (а), электрода $\eta_{э}$ (б) и отношения теплот $Q_{хим}/Q_{э}$ (в) от количества экзотермической смеси Q и толщины покрытия электрода $\delta_{п}$

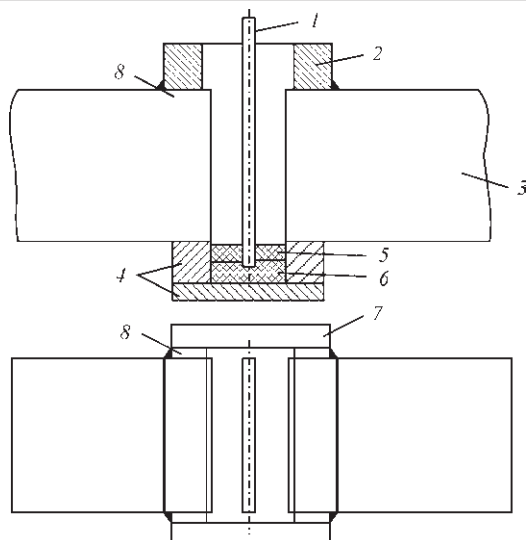


Рис. 5. Схема ЭШС: 1 — пластинчатый электрод; 2 — выводящие планки; 3 — свариваемый стык; 4 — металлический карман; 5 — рабочий флюс; 6 — экзотермическая смесь; 7 — формирующие подкладки; 8 — боковые планки

расплавленный флюс оксида алюминия, образующегося от взаимодействия алюминия с оксидами железа. При неизменном электрическом режиме повышается температура шлаковой ванны, увеличивается производительность плавки и снижается удельный расход электроэнергии. Благодаря оптимальному соотношению ингредиентов в первом слое (6) он является электропроводным в твердом состоянии и позволяет полностью прореагировать алюминию с образованием его оксида. Наличие экзотермической смеси во втором слое (5) ускоряет его расплавление без выплесков и бурления.

При плавлении экзотермической смеси восстанавливается железо (~70 % массы окалины), которое оседает на поддон или затравку, впоследствии удаляемое в обрезь; рафинированный же металл расходуемого электрода ложится на образовавшийся слой из восстановленного железа и начинается формирование качественного шва или отливки. В результате этого потери расходуемого электрода сводятся до минимума, а качество металла в донной части слитка улучшится за счет того, что расплавление электрода происходит в жидком шлаке (подобно электрошлаковому процессу с сифонной заливкой шлака).

Показатели сравнительных испытаний оптимального варианта разработанного способа «твердого» старта и применяемых в настоящее время «твердого» и «жидкого» стартов ЭШП приведены в работе [18]. Разработанный способ старта ЭШП при одинаковых условиях позволяет (по сравнению с существующим «твердым» стартом) повысить производительность расплавления флюса в 2 раза, обеспечить выход годного металла до 10 %, по сравнению с существующим «жидким» стартом время стартового периода наведения шлако-

вой ванны необходимого объема снизилось на 16, а выход годного металла увеличился на 2 %. Кроме того, при расплавлении экзотермического флюса образуется составляющая шлака: оксид алюминия (Al_2O_3), масса которого может составить до 20...30 % от необходимой массы расплавляемого рабочего флюса и экономии на расплавлении 1 кг стандартного флюса — 1,2...1,4 кВт·ч.

Тепловой эффект экзотермической реакции от взаимодействия элементов-раскислителей с закисью железа определяется по следующей формуле [19]:

$$Q_{\text{хим}} = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{G_{\text{р.ст}}}{t} K_{\text{п}} (Q_{i\text{э.с}}) q_{i\text{э.с}}, \text{ Дж/с}, \quad (3)$$

где $G_{\text{р.ст}}$ — масса расплавляемого электродного стержня, г; $Q_{i\text{э.с}}$ — $Q_{\text{э.с}}^{\text{Al}}$, $Q_{\text{э.с}}^{\text{Ti}}$, $Q_{\text{э.с}}^{\text{Si}}$, $Q_{\text{э.с}}^{\text{Mn}}$ — доля экзотермической смеси в покрытии электрода при взаимодействии i -го элемента-раскислителя с закисью железа, %; $K_{\text{п}}$ — коэффициент массы покрытия; $q_{i\text{э.с}}$ — тепловые эффекты (Дж/г) экзотермической смеси для реакций титана, кремния и марганца с закисью железа.

Разработаны составы экзотермических флюсов применительно к электрошлаковым процессам, обеспечивающие при их расплавлении соответствие физико-химических свойств электрошлакового металла основному металлу, электропроводность в твердом состоянии и возможность проведения процессов по моно-, бифазной или трехфазной схемам применительно к сталям 9ХФ, 9Х2МФ и 60Х2СМФ [17, 18].

Выводы

1. Доказано, что эффективным способом повышения производительности ручной дуговой сварки (наплавки) и электрошлаковых процессов является применение экзотермических металлофлюсовых смесей, представляющих собой механическую смесь окалины, алюминиевого порошка, легирующих элементов в виде ферросплавов (ферромарганца, ферротитана, ферросилиция) при ручной дуговой сварке (наплавке) и экзотермических флюсов («экзотермическая смесь + стандартный флюс») при электрошлаковых процессах в количествах, достаточных для протекания экзотермических реакций.

2. Экспериментально установлено, что введение в покрытие электродов экзотермической смеси повышает скорость расплавления электродов за счет тепла, выделяющегося при протекании экзотермической реакции (0...11,5 %); обеспечивает снижение затрат на плавление газослакообразующей части покрытия и улучшение технологических характеристик дуги.

3. Доказано, что содержание экзотермической смеси в покрытии электродов до 53,4 % приво-

дит к изменению КПД нагрева изделия $\eta_{\text{и}}$ от 0,715 до 0,815 и электрода $\eta_{\text{э}}$ от 0,28 до 0,415; при этом изменение носит прямопропорциональный характер. С увеличением толщины покрытия электродов повышается содержание экзотермической смеси; увеличивается количество тепла и восстановленного железа при протекании экзотермической реакции, что приводит к изменению $\eta_{\text{и}}$ от 0,74 до 0,84 и $\eta_{\text{э}}$ от 0,31 до 0,47 за счет увеличения тепловой мощности дуги и удельных затрат теплоты ($K_{\text{э}} + K_{\text{э}}^{\text{хим}}$) на плавление электрода.

4. Разработаны статистические модели, позволяющие определить оптимальное содержание экзотермической смеси и толщины покрытия электродов, обеспечивающих минимальные потери электродного металла.

1. Рынок сварочных материалов Украины / А. А. Мазур, С. В. Пустовойт, В. С. Петрук [и др.]. // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6-7. – С. 39–45.
2. Doria J. G. Welding consumables: Market trends / J. G. Doria. – Istanbul : European Welding Association, 2001. – 20 p.
3. Nassau L. van. Expert report stick electrodes 2000 : Stick electrodes / L. van. Nassau. – Istanbul : European Welding Association, 2001. – 9 p.
4. Welding handbook : Materials and applications. – Miami, USA, 1998. – V. 4, pt. 2. – 620 p.
5. Шлепаков В. Н. Современные электродные материалы и способы электродуговой сварки плавлением (Обзор) / В. Н. Шлепаков // Автоматическая сварка. – 2011. – № 10. – С. 31–35. 1–8.
6. Сварочные материалы: подборка ст., опубли. в журн. «Автоматическая сварка» в 2006–2010 гг. / [сост. В. Н. Липодаев]. – К.: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2011. – 215 с.
7. Металлургия дуговой сварки и сварочные материалы: [сборник] / Нац. акад. наук Украины, Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; [сост.: И. К. Походня, А. С. Котельчук]. – К.: Академперіодика, 2012. – 524 с.
8. Походня И. К. Сварочные материалы: состояние и тенденции развития / И. К. Походня // Автоматическая сварка. – 2003. – № 3. – С. 9–21.
9. Иоффе И. С. Влияние титанотермитной смеси, входящей в электродное покрытие, на повышение производительности сварки / И. С. Иоффе, О. М. Кузнецов, В. М. Питерский // Сварочное производство. – 1980. – № 3. – С. 26–28.
10. Карпенко В. М. Показатели плавления сварочных электродов с экзотермической смесью в покрытии / В. М. Карпенко, А. Ф. Власов, Г. Б. Былык // Сварочное производство. – 1980. – № 9. – С. 23–25.
11. Власов А. Ф. Нагрев и плавление электродов с экзотермической смесью в покрытии / А. Ф. Власов, Н. А. Макаренко, А. М. Куций // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6-7. – С. 151–154.
12. Чигарев В. В. Исследование показателей горения экзотермических смесей / В. В. Чигарев, Д. А. Зареченский. // Вісник Приазовського державного технічного університету, 2006. – С. 1–4.
13. Чигарев В. В. Особенности плавления порошковых лент с экзотермическими смесями в наполнителе / В. В. Чигарев, Д. А. Зареченский, А. Г. Белик // Автоматическая сварка. – 2007. – № 2. – С. 53–55.
14. Зареченский А. В. Особенности плавления порошковых лент с термитными смесями / А. В. Зареченский, Л. К.

Лещинский, В. В. Чигарев // Сварочное производство. – 1985. – № 8. – С. 39–41.

15. Власов А. Ф. Экспериментальное определение экзотермического процесса, протекающего при нагреве и плавлении электродов / А. Ф. Власов, В. М. Карпенко, А. И. Лещенко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – № 2(4). – 2006. – С. 65–68.
16. Латаш Ю. В. Электрошлаковый переплав / Ю. В. Латаш, Б. И. Медовар. – К.: Metallurgy, 1970. – 239 с.
17. Исследование и разработка составов экзотермических флюсов для электрошлаковых процессов / Н. А. Макаренко, А. Ф. Власов, Д. А. Волков [и др.] // Современная электрометаллургия. – 2015. – № 2. – С. 10–16.
18. Власов А. Ф. Применение экзотермических смесей при ручной дуговой сварке и электрошлаковых процессах / А. Ф. Власов, Н. А. Макаренко, А. М. Куций // Сварочное производство. – 2016. – № 8. – С. 7–14.
19. Власов А. Ф. Технологические характеристики электродов с экзотермической смесью в покрытии для наплавки инструментальных сталей / А. Ф. Власов, А. М. Куций // Сварочное производство. – 2011. – № 4. – С. 10–15.

А. Ф. Власов, Н. О. Макаренко, Д. А. Волков

Донбаська державна машинобудівна академія.
84313, м Краматорськ, вул. Шкадінова, 72.
E-mail: sp@dgma.donetsk.ua

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДУГОВИХ ТА ЕЛЕКТРОШЛАКОВИХ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ ШЛЯХОМ ВВЕДЕННЯ ЕКЗОТЕРМІЧНОЇ СУМІШІ

Доведено, що введення в покриття електродів екзотермічної суміші до 53,4 % призводить до збільшення коефіцієнтів: розплавлення стержня, наплавлення, швидкості плавлення електродів та розплавлення покриття електродів. Підвищення товщини покриття електродів, що містять 44,4 % екзотермічної суміші, від 0,5 до 2,6 мм призводить до збільшення кількості екзотермічної суміші та коефіцієнта наплавлення, до зниження значення коефіцієнта розплавлення стержня, збільшення масової швидкості плавлення покриття. Доведено, що ефективним способом підвищення продуктивності електрошлакових процесів є використання екзотермічного флюсу: окалини, феросплавів, алюмінієвого порошку і стандартного флюсу (АНФ-6 та ін.) в кількостях, достатніх для протікання екзотермічних реакцій, що забезпечує виділення додаткового тепла в стартовий період електрошлакових процесів і сприяє прискореному наведенню шлакової ванни необхідного обсягу на «твердому» старті як по монофілярній, так і біфілярній схемам ведення процесу замість «рідкого» старту. Електрошлакові процеси з використанням екзотермічного легованого флюсу на «твердому» старті дозволяють отримувати (в порівнянні з існуючими способами наведення шлакової ванни) збільшення виходу придатного металу на 2...10 %; економію на розплавлення 1 кг стандартного флюсу 1,2...1,4 кВт·год; скорочення часу стартового періоду процесу ЕШП до 25 %. Встановлено, що введення в екзотермічні флюси алюмінію в якості розкислювача збільшує вміст в шлаковій ванні оксиду алюмінію (Al_2O_3), її опір і підвищує продуктивність електрошлакового процесу. Бібліогр. 21, рис. 5.

Ключові слова: електрод, екзотермічна суміш, екзотермічний флюс, шлакова ванна, продуктивність процесу

Поступила в редакцию 26.10.2016

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗНОТОЛЩИННОСТИ ПОКРЫТИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ ОПРЕССОВКЕ*

А. Е. МАРЧЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

С применением осциллографических и математико-статистических методов изучены закономерности образования разнотолщинности покрытия экспериментальных электродов УОНИ 13/55 с диаметром стержня 4 мм при их изготовлении на угловом гидравлическом прессе в условиях, максимально приближенных к производственным. Выявлено, что изменение разнотолщинности покрытия это непрерывный, многостадийный, немонотонный (волнообразный) и гармонический процесс, в котором возмущения, возникшие на стартовой стадии, могут ощущаться на последующих стадиях опрессовки электродов. Разнотолщинность покрытия вызывается, прежде всего, нарушением баланса упругости и вязкости, который зависит от консистенции электродных обмазочных масс. Вместе с тем на вероятность образования разнотолщинности покрытия существенно влияют конструктивные особенности формующего тракта электрообмазочного пресса. Библиогр. 15, рис. 7.

Ключевые слова: дуговая сварка, покрытые электроды, опрессовка, разнотолщинность покрытия, осциллографирование, математическая статистика

Вязкоупругость электродных обмазочных масс следует считать главной причиной разнотолщинности покрытия. С точки зрения качества сварных швов — это опаснейший дефект, возникающий, прежде всего, по причине быстрой разрядки упругих напряжений, накапливаемых обмазкой в ходе ее нанесения на стержни [1–5]. Множество из предполагаемых причин разнотолщинности покрытия, прежде наиболее часто обсуждавшихся в публикациях, например [1, 6, 7], не всегда являются основными. Тем не менее, многие из них в определенной степени могут облегчить проявление разнотолщинности покрытия, вызванной указанной эластической турбулентностью обмазок.

Другой важной причиной разнотолщинности покрытия следует рассматривать естественное стремление обмазки в ходе взаимодействия в прессовой камере с упругим стержнем найти конфигурацию поперечного сечения оболочки, обеспечивающую минимально возможные затраты энергии на течение. Оно, по-видимому, осуществляется по гидродинамическому, т. е. более сложному механизму, чем традиционная (как, например, в работе [1]) схема упругой деформации консольной части стержня под напором обмазки, нагнетаемой в прессовую камеру. Иначе трудно объяснить, почему разнотолщинность покрытия

возникает при изготовлении электродов на прямо-точных прессах.

В самых неблагоприятных случаях накопление и разрядка упругих напряжений идут непрерывно, протекают очень быстро и непредсказуемо. Так же быстро изменяется и разнотолщинность покрытия. Разобраться в этом стохастическом процессе должно помочь применение равноценных по быстродействию методов ее исследования. К числу таких методов относится осциллографирование, сочетающееся с математико-статистической обработкой зарегистрированных результатов.

В ИЭС им Е. О. Патона осциллографические исследования разнотолщинности начаты давно [8]. Однако многие из полученных результатов стало возможным проанализировать и объяснить с позиций избытка упругости над вязкостью лишь сейчас, когда вязкоупругую природу обмазок можно считать вполне доказанной реологическими исследованиями [2–5].

Объект и метод исследования. Исследования проведены при изготовлении экспериментальных электродов УОНИ 13/55 с участием персонала Экспериментального производства ИЭС им Е. О. Патона на промышленном технологическом оборудовании, которым оно оснащено.

Вещественный состав шихты для покрытия электродов (мас. %): мрамор — 51,5; флюоритовый концентрат — 19; кварцевый песок — 6; ферромарганец среднеуглеродистый — 6,5; ферросилиций ФС-45 — 7; ферротитан — 7; слюда-мусковит — 3 и очищенная Na-КМЦ — 1 (сверх 100).

*По материалам доклада, представленного на IX международной конференции «Дуговая сварка. Материалы и качество» (31 мая–03 июня 2016 г., г. Волгоград, РФ).

При подготовке оборудования, наладке процесса изготовления электродов, методики осциллографирования разнотолщинности, оцифровки осциллограмм и статистической обработки результатов использовали следующий фракционный состав смеси, выраженный как суммарные массовые остатки на сетках 0315, 02, 016, 01 и 0063 по ГОСТ 6613–86: 2, 10, 15, 25 и 35 мас. %, соответственно. Проход через сетку 0063 – 65 %. Обмазку готовили на NaK жидком стекле с модулем 3,05, плотностью $1,435 \text{ г·см}^{-3}$ и вязкостью 900 мПа·с, доза стекла — 30 мас. %.

Сухую смесь для обмазки готовили в цилиндрическом плужном смесителе интенсивного типа, а обмазочную массу в однокатковом смесителе.

Электроды изготавливали на гидравлическом электрообмазочном прессе фирмы «Хейвелок Инжиниринг» с угловой подачей обмазочной массы (90°). Диаметр стержня электродов 4 мм, толщина покрытия $1,1 \dots 1,2 \text{ мм}$. Скорость опрессовки 420 электродов в минуту.

Проволока и материалы покрытия отвечали требованиям соответствующих ГОСТов, а допуски на отклонения размеров формирующего инструмента – требованиям действующей нормативной документации. Фильтры, наконечники стержнепроводки и стержнеподающие ролики в других целях, кроме экспериментов, выполняемых в настоящей работе, не использовались.

Поток обмазочной массы, предварительно повернутый вдоль направляющей стержней, в прессе «Хейвелок Инжиниринг» редуцируется трижды:

- в двуканальной щелевой массопроводке, фиксирующей направляющую стержней;
- в прессовой камере, расположенной между торцом наконечника направляющей стержней и конусом калибрующей втулки;
- в канале калибрующей втулки.

Поворот потока обмазки и каждое из названных ее редуцирований осуществляются в переходном режиме течения, поэтому являются источником гидродинамических возмущений в нем. Средний градиент скорости сдвига, которым определяется сопротивление, преодолеваемое обмазкой во время редуцирования, пропорционален степени обжатия струи и определяется характерным размером формирующего канала. Для кругового цилиндрического канала, как у калибрующей втулки, — это диаметр, а для плоского или кольцевого (щелевого) канала, как у массопроводки, — его ширина. Наряду с этим ускорение потока обмазки в двуканальной массопроводке изменяется еще в 2 раза в зависимости от того, позволяет ли консистенция обмазки пройти сра-

зу обе части щелевого канала или только одну из них. Штатный зазор между торцом наконечника стержнепроводки и калибрующей втулкой 1,5 мм.

Для непрерывной регистрации разнотолщинности покрытия в процессе опрессовки электродов использован специализированный монитор с блоком электромагнитных датчиков, которым комплектуется пресс фирмы «Хейвелок Инжиниринг». Вместе с калибрующей втулкой блок закрепляется на предусмотренной для этого базовой площадке пресса. Положение калибрующей втулки, в том числе и на ходу, регулируется четырьмя болтами с известным шагом резьбы. Общий вид прибора в рабочем положении приведен на рис. 1 [9].

Электромагнитные сигналы, пропорциональные горизонтальной и вертикальной координатным составляющим вектора разнотолщинности электродного покрытия (КС ВРП), сформированные в электронном блоке монитора, в штатной экипировке считываются со шкал двух контрольных стрелочных приборов. О фактическом состоянии разнотолщинности судят по отклонению стрелок от нуля. Для непрерывной регистрации этих отклонений мы использовали шлейфный осциллограф 8SO-4. Запись вели на аэрофотоплёнке чувствительностью 1200 ед. по ГОСТ 100691–63 шириной 120 мм. Плёнка очень быстро проявляется на свету. Скорость записи выбрана в ходе предварительных опытов и составляла 10 мм/с. Данные, зарегистрированные на плёнке, переводили в цифровую форму во время ее последующей обработки, определяя координаты точек, удаленных друг от друга на кривых на расстоянии 5...6 мм.

Обмазочную массу готовили в количестве 50 или 100 кг (замес), брикетировали и делили на три зарядки пресса, в каждой не более двух брикетов. В ходе выпрессовки первой зарядки настраивали подачу обмазки и стержней, упреждающее взаимное смещение осей калибрующей втулки и стержней, положение шлейфовых лучей, а также проводили отладку записи на плёнке. В ходе выпрессовки второй зарядки делали основные запи-

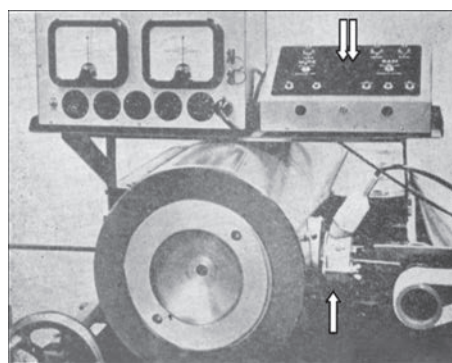


Рис. 1. Головка-датчик для измерения разнотолщинности покрытия, установленная на прессе «Хейвелок Инжиниринг» (указана стрелкой)

си продолжительностью от 50 до 360 с. Последнюю зарядку использовали как контрольную, а в случае необходимости — для проверки «живучести» обмазок брикеты выдерживали в течение одного часа. Их хранили в условиях, традиционно используемых в производстве для предотвращения потери влаги.

В ходе опрессовки через каждые 7...10 с отбирали по одному электроду. Их тут же контролировали на переносном концентрометре (указан на рис. 1 сдвоенной стрелкой). Результаты сразу записывали на пленке (летучий контроль). В конце зарядки отбирали разовые пробы в количестве не менее 10 электродов, которые маркировали, а затем контролировали и результаты статистически обобщали в лабораторных условиях (групповой контроль).

Результаты летучего и группового контроля использовались для корректировки настройки прессы, осциллографа с целью уточнения положения на пленке нулевых линий (X_0 , Y_0), предназначенных для отсчета горизонтальных (x_i) и вертикальных (y_i) составляющих ВРП. Смещение x_i вверх или вниз от нуля означало, соответственно, утолщение правой или левой половины оболочки покрытия. Аналогичное смещение y_i свидетельствовало об утолщении верхней или нижней ее частей.

Пользуясь значениями x_i и y_i , рассчитывали индивидуальные значения вектора разнотолщинности покрытия (e_i) и угла его ориентирования в сечении, перпендикулярном оси электрода ($\text{tg} \alpha_i = x_i/y_i$), затем строили карту e_i в сопоставлении с линиями средних (e_c) и граничных значений, регламентированных ГОСТ 9466–75.

Значения и угол ориентации e_i являются случайными величинами. Уже в ходе предварительных опытов была выявлена необходимость использования статистических методов их оценки и представления. С этой целью индивидуальные значения e_i , найденные по 100 замерам, группировали в условные выборки, каждая из пяти значений e_i . Количество выборок 20 шт. Рассчитывались выборочные средние (e_c), среднеквадратичные отклонения (s_p) и размахи (R), а также их генеральные средние значения по 20 выборкам (E_c , S_p и R_c). Представленные в графическом виде эти данные четче отражают изменчивость процессов и их тенденции, чем индивидуальные показатели [10].

Характер осциллограмм КС ВРП. Кривые горизонтальной и вертикальной составляющих ВРП, как и получаемые на капиллярном пластометре ОБ 1435 [3] экструзионные кривые обмазочных масс, отражают стартовую, структурную, установившуюся и заключительную стадии опрессовки.

Запись в большинстве опытов начинали не сразу после пуска стержнеподающего станка. Поэто-

му на коротких осциллограммах, которые отражают ход опрессовки в течение 15...35 с, стартовая стадия, как правило, не регистрируется. Иногда на пленку попадала только заключительная часть ее структурной (нисходящей) ветви, переходящей в, условно говоря, установившуюся ветвь. Как следует из рис. 2, у обмазки, использованной нами для отработки методики, стартовая часть осциллограмм КС ВРП имеет ярко выраженный осциллирующий вид. Причем у вертикальной составляющей — это почти идеальная синусоида со слабо выраженной экстремальностью осевой линии, постепенно затухающая и, в конце концов, приобретающая форму нерегулярных колебаний, а горизонтальная является таковой с самого начала. При этом возмущения, зарегистрированные на осциллограмме вертикальных составляющих как смещения луча от шлейфа вверх или вниз, почти синхронно отражаются на осциллограмме горизонтальных отклонений как смещение соответствующего луча вправо-влево (на рис. 2 отмечены стрелками). Это объясняется довольно упругой консистенцией исследуемой обмазки и конфигурацией формирующей зоны использованного прессы, в частности, расположением по вертикали двух массопроводящих щелей, в результате чего вязкоупругая обмазка имеет возможность периодически изменять траекторию потока, перескакивая из верхнего окна в нижнее и наоборот. Горизонтальная составляющая дополнительно отражает следствия гидродинамических возмущений, возникающих еще до прохождения обмазкой сквозь щели массопроводки, которые вызваны поворотом потока на 90°; на них накладываются циклы, связанные с поочередными прохождением обмазкой упомянутых выше двух щелевых каналов массопроводки.

Протяженность синусоидального участка вертикальной осциллограммы зависит от изменения консистенции обмазки, вызванного выдержкой брикетов перед использованием. Для первой, самой свежей зарядки эту стадию не удалось зарегистрировать из-за продолжительной настройки прессы (получен лишь стационарный участок длительностью 45 с.). Протяженность синусоидального участка во второй зарядке составляет 15 с, а

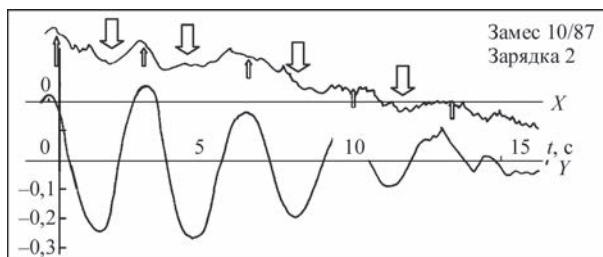


Рис. 2. Осциллограммы КС ВРП, полученные при опрессовке электродов УОНИ 13/55 (X — горизонтальная, Y — вертикальная составляющая; стрелками отмечены отклики вертикальной составляющей на изменение горизонтальной компоненты)

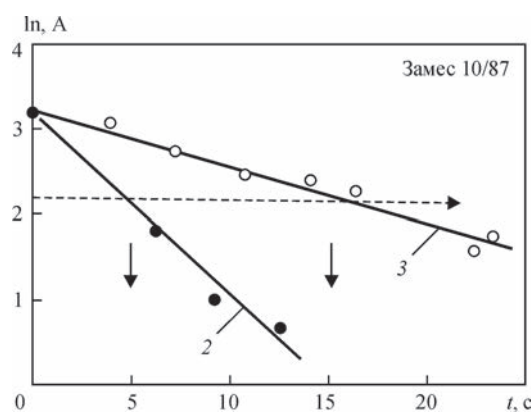


Рис. 3. Сравнение амплитуд колебаний вертикальной составляющей вектора разнотолщинности покрытия на протяжении стартовой стадии опрессовки электродов из второй (2) и третьей (3) зарядки обмазки

в третьей, которая дольше первых двух выдерживалась перед использованием, — вдвое больше.

Результаты расчета показателя затухания синусоидальных амплитуд, записанных при опрессовке электродов из второй и третьей зарядки обмазки, представлены на рис. 3. Видно, что, несмотря на относительно непродолжительную выдержку обмазки в состоянии брикета, период ее релаксации увеличился в 3 раза. Консистенция обмазки изменилась за счет процессов структурообразования, которые прошли в ней в течение этого времени.

Нами установлены следующие общие закономерности изменения формы кривых КС ВРП в зависимости от консистенции обмазок для низководородных электродов при их изготовлении на прессе «Хейвелок Инжиниринг». Для очень упругих обмазок обе осциллограммы $x_i = f(t)$ и $y_i = f(t)$ в стартовой стадии опрессовки имеют вид синусоид, правда, не всегда столь идеальных по форме, как на рис. 2. В дальнейшем они постепенно вырождаются в осциллирующие кривые иррегулярного вида, причем для осциллограмм $x_i = f(t)$ это часто наступает раньше, чем для $y_i = f(t)$.

Для обмазок, близких по консистенции к представленной в настоящей работе, синусоидальной является только осциллограмма $y_i = f(t)$ и то лишь в начале опрессовки. Для еще более мягких обмазок осциллограмма $y_i = f(t)$ почти сливается с нулевой линией, в то время как кривая $x_i = f(t)$ дольше сохраняет иррегулярный вид. Для жидкообразных обмазок обе осциллограммы с самого начала имеют вид малоамплитудных синусоид.

Кривые эволюции вектора разнотолщинности покрытия. Эволюция индивидуальных значений вектора разнотолщинности покрытия представлена на рис. 4. В стартовой стадии она имеет вид не столь идеальной синусоиды, как вертикальная составляющая ВРП. Наряду с этим, между большими амплитудами местами вклиниваются одна или две слабые амплитуды. И те

и другие постепенно (как и синусоиды КС ВРП) затухают, свидетельствуя о релаксационной природе процесса, который они отражают. Затем они эволюционируют в своего рода гармоническую функциональную зависимость с более чем двумя переменными. Пока удалось выделить четыре гармоники с частотой колебаний от 1 до $0,04 \text{ с}^{-1}$.

ВРП изменяется в пульсирующем режиме не только по величине, но и по ориентации в пространстве. Об этом можно судить, наблюдая за изменениями «следа» ВРП как проекции e_i на плоскость, перпендикулярную электродам, выходящим из головки пресса. Вид такого рода фазовых траекторий, полученных в течение стартовой стадии опрессовки электродов, представлен на рис. 5. Начальная точка в каждой выборке отмечена крестиком, конечная — стрелкой. Первые две выборки состоят из 20, а третья — из 10 электродов.

Как видим, с самого начала амплитуда пульсаций по y_i (особенно положительной ее части) уменьшается одновременно с менее заметным уменьшением x_i . В результате происходит общее сжатие x_i и y_i , а, следовательно, одновременно с уменьшением величины e_i происходит постепенное его смещение в нулевую область.

Дальнейшие изменения величины и ориентации e_i оценивали по следующим десяти выборкам электродов, выделенным из стационарной стадии. Они показаны на рис. 6 в виде лепестков, включающих 10 индивидуальных значений x_i и y_i из каждой выборки.

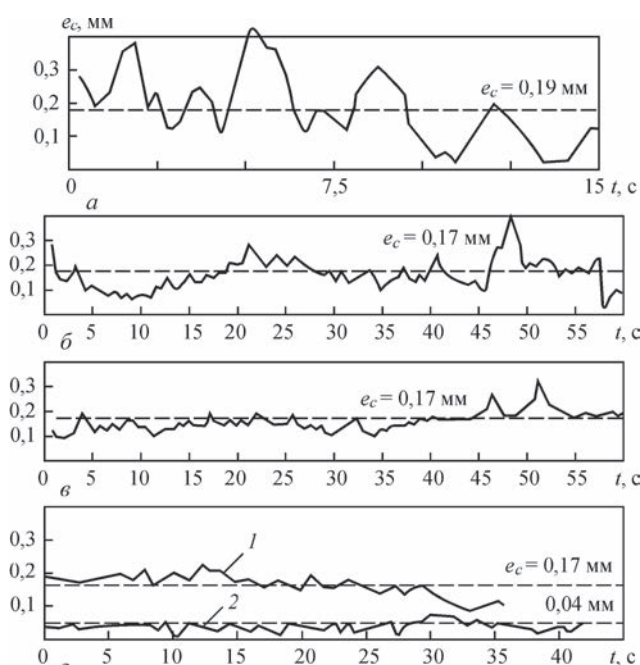


Рис. 4. Эволюция ВРП электродов, изготовленных в течение выпрессовки второй зарядки обмазки: стартовая (а), стационарная (б, в) и заключительная (г) стадии из первой (1) и второй (2) зарядки обмазки; e_p , e_{ic} — индивидуальные и выборочные средние значения разнотолщинности покрытия

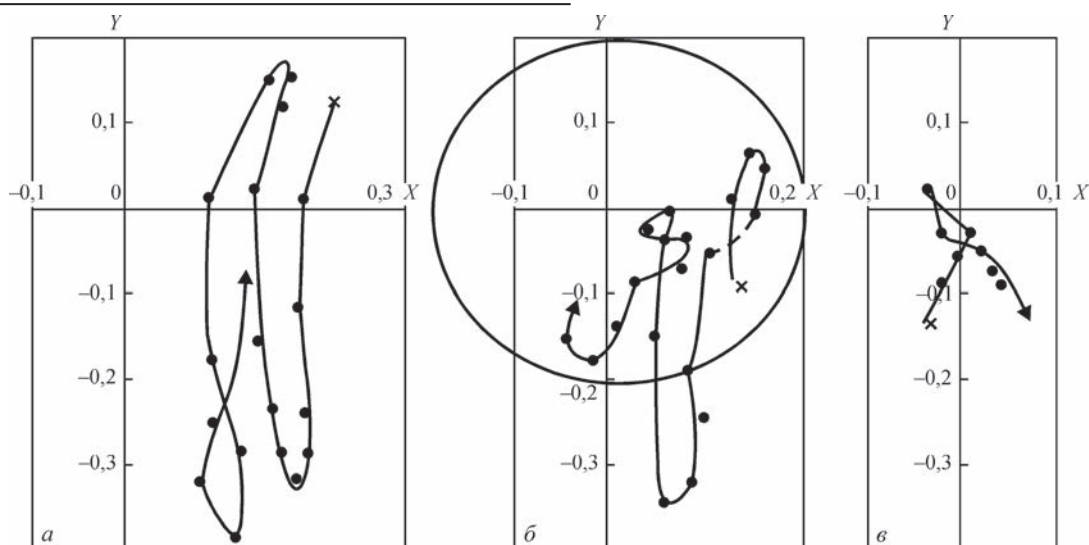


Рис. 5. Вид фазовых траекторий вектора разнотолщинности покрытия в течение стартовой стадии опрессовки электродов. Номера замеров разнотолщинности, включенных в выборки: а — 1...20; б — 21...40; в — 41...50

Вместе с рис. 4 он показывает, что с точки зрения эволюции ВРП стационарной эту стадию можно называть с большой натяжкой. Вектор разнотолщинности покрытия электродов, опрессованных в течение этой стадии, сначала уменьшается, а затем резко возрастает, а дислокация изменяется по пульсирующей спирали, в виде последовательных вращательных переходов из III в IV, I, II, а затем снова в IV квадрант. В пределах каждой выборки, а также при переходе от выборки к выборке это происходит немонотонно, с разной скоростью на протяжении всего лишь 60-ти секунд. С учетом того, что каждую минуту из головки пресса выходило 420 электродов, скорость этих изменений в расчете на длину электрода поистине огромна, и объяснить это, исходя только с позиций изменения вязкости обмазки, как это многие пытались сделать до сих пор, невозможно. Для этого нужно одновременно учитывать из-

менения соответствующего по смыслу показателя упругости обмазки.

Эволюция статистических выборочных показателей ВРП. На рис. 7 отражены изменения выборочных средних и размахов разнотолщинности покрытия на протяжении «стационарной» стадии в сравнении с их средними выборочными значениями для каждой группы — начальной, средней и заключительной. Они отчетливее, чем e_p , отражают общую эволюцию разнотолщинности. У электродов начальной группы (а) заметно ощущаются последствия стартовой стадии процесса. За понижением e_p , которое имело место в конце стартовой стадии, следуют два всплеска, разделенные непродолжительной стабилизацией. В целом величина выборочных значений разнотолщинности растет, и этот рост продолжается в новой серии выборок (б), тоже волнообразно, хотя и в несколько более спокойной форме. Лишь в заключительной фазе (в) наместились признаки понижения этого показателя, но видимо только в качестве очередной нисходящей ветви волны. Косвенное подтверждение этому — постоянство значения генерального среднего E_c на уровне 0,17 мм.

Тем не менее, процесс постепенно успокаивается, о чем свидетельствует отраженное на рис. 7 уменьшение колебаний и генеральных средних выборочных значений размахов ($R_c = 0,090$ мм в начальной и 0,025 мм в заключительной серии выборок).

Мы не приводим выборочных среднеквадратичных отклонений e_p , хотя наряду с размахами рассчитывали их и учитывали при анализе полученных результатов. Характер их изменений такой же, как и у размахов. Но абсолютные значения в 2...3 раза меньше. Если возникает необходимость оценить долю скрытого брака по e_p , значение s_p должно учитываться обязательно [10].

Постоянство E_c в проанализированных выше выборках из электродов зарядки 2 не следует рас-

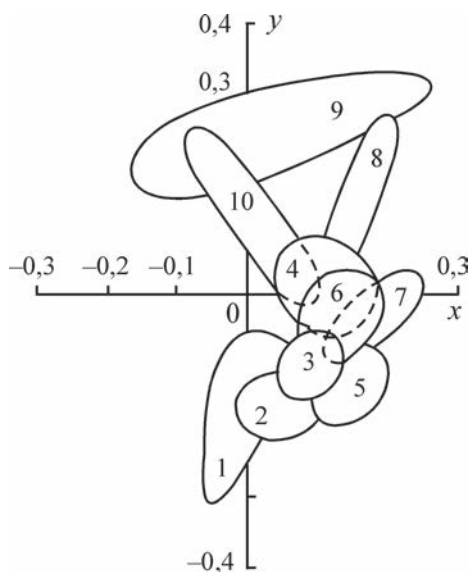


Рис. 6. Характер изменения показателей разнотолщинности покрытия электродов, опрессованных из обмазки зарядки 2. Цифрами отмечен номер выборки, каждая из 10 электродов

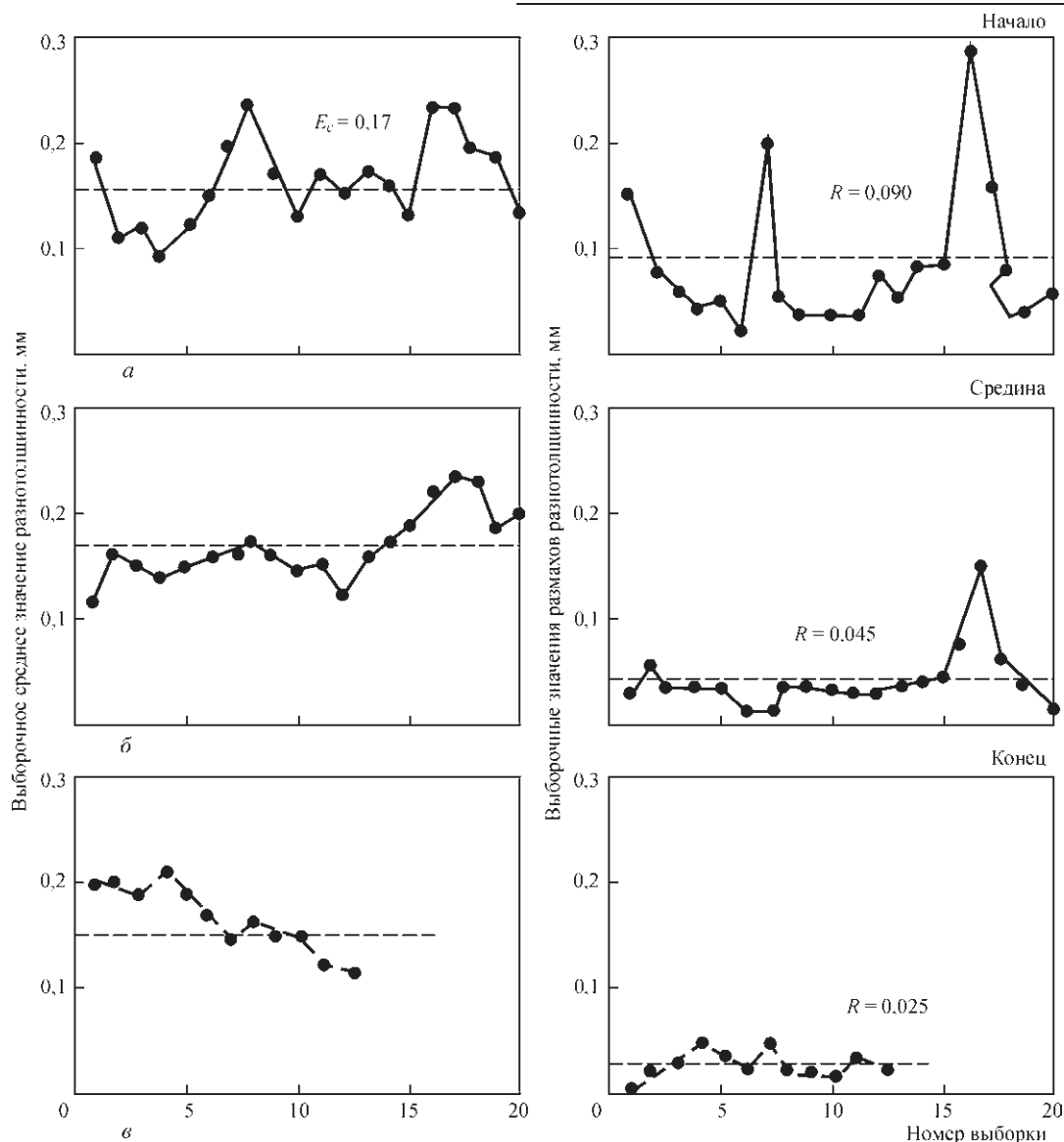


Рис. 7. Изменение статистических характеристик ВРП в ходе опрессовки электродов из обмазки в зарядке 2 (а, б, в — см. в тексте)

смазывать как свидетельство того, что их величина и дальше не может уменьшаться. Результаты, полученные при исследовании электродов первой зарядки, которые для сравнения приведены на рис. 4, г, показывают, что в этом случае E_c , в конце концов, понизилось до значений 0,04 мм (в зарядке 2) в сравнении с 0,17 мм. Разницу тоже можно в какой-то мере увязать с изменением консистенции обмазки в течение ее выдержки в брикетах.

Обсуждение результатов. Изложенные результаты исследований показывают, что главной причиной образования разнотолщинности покрытия является нестабильное течение обмазочной массы. Нестабильности в напорном потоке обычно возникают, когда упругость, накопленная в нем во время деформирования обмазки, превышает уровень, который может быть демпфирован ее вязкостью до того, как она встретится в прессовой камере со стержнем.

Разнотолщинность как раз и является одним из нежелательных видов быстрой разрядки избыточной упругости во время формирования оболочки из обмазки на стержне. Другой вид обсуждается ниже.

Накопление и релаксация упругих напряжений в напорном потоке обмазочной массы, из которой формируется электродное покрытие в головке пресса, следует рассматривать как непрерывный процесс, который стартует в момент, когда начинается течение обмазки, и может продолжаться, пока не будет полностью выработана зарядка массы. Результаты проведенных исследований показывают, что это:

— в целом, релаксационный процесс, в котором в благоприятных условиях статистическое среднее значение и показатели рассеяния разнотолщинности постепенно понижаются, т. е. улучшается общий баланс вязкости и упругости, прежде всего, за счет релаксации упругих напряжений;

– многостадийный процесс, характеризующийся разными на разных стадиях уровнями и соотношениями упругости и вязкости;

– «наследственный» процесс, в котором возмущения, возникшие на предыдущих, ощущаются на последующих его стадиях, включая в самом неблагоприятном случае и стартовую, и заключительную стадии;

– немонотонный, а, скорее, волнообразный процесс, в ходе которого разнотолщинность, понижаясь со временем, после достижения очередного минимума, вновь возрастает до прежнего или до несколько меньшего уровня;

– гармонический процесс, поскольку в пределах длительного цикла идут кратковременные циклы с меньшими амплитудами пульсирования.

Главные источники упругости — стартовая деформация обмазочной массы, которая вызывается ее объемным сжатием, с одной стороны, и поворот потока обмазки на 90° , существенно ускоряющий слои в его внешнем обводе. Действие первого источника начинается, когда шток переводится с маршевой скорости на рабочую. Релаксируя, они продолжают после включения стержнеподающего станка и заканчиваются после полной релаксации стартовой упругости. Продолжительность действия второго источника видимо действует на протяжении всего цикла прессования.

Возникшие в этот период упругие напряжения релаксируют разным путем и скоростью в каналах массопроводки, прессовой камере и калибрующей втулке. Накладываясь друг на друга, они проявляются в качестве гармоник на кривой эволюции показателя разнотолщинности. В каждой из них генерируется дополнительная упругая энергия благодаря редуцированию потока обмазки. Релаксация ее происходит на последующих стадиях формирования потока.

В этой сложной картине возникновения и релаксации упругих напряжений, провоцирующих разнотолщинность, требует выяснения, в чем же причины немонотонной эволюции ее значений в ходе опрессовки электродов. Для этого известные положения гидродинамики течения ньютоновской жидкости через кольцевой канал, образованный двумя неподвижными неконцентричными трубами, нужно уточнить, учитывая вязкоупругую природу электродных обмазочных масс. Наряду с этим вместо неподвижной внутренней трубы следует рассматривать упругий стержень, тоже склонный к обратимым деформациям, движущийся синхронно с оболочкой и имеющий, находясь в ней, определенную степень свободы в поперечных перемещениях.

В соответствии с гидродинамической теорией течения жидкостей объемная скорость потока жидко-

сти сквозь круглую трубу с внутренним сердечником круглого сечения зависит от осевого смещения сердечника относительно наружной трубы.

В случае их концентричного положения — жидкость в кольцевом зазоре течет, обволакивая сердечник слоем с симметричным профилем скорости. Чем больше сердечник смещен относительно концентричного положения, тем больше объемная скорость (расход) жидкости по широкому сечению зазора, несмотря на то, что величина общего сечения, по которому перетекает жидкость, остается неизменной [11, 12].

Этот вывод справедлив для напорных потоков ньютоновских, простых и сложных неньютоновских жидкостей, а также для вязкопластичных материалов, таких как тело Бингама. Он, в принципе, не зависит от того, вызывается ли несоосность покрытия и стержня небрежной предварительной настройкой элементов прессовой камеры, или она возникает как естественное смещение упругого стержня, вызванного упругостью обмазки. И в том, и другом случае увеличение степени несоосности приводит к увеличению статистического показателя рассеяния разнотолщинности. Таким образом, стремление кольцевого потока обмазки нарушить соосное положение калибрующей втулки со стержнем следует считать вполне естественным явлением. Этот вывод не теряет значения и для электродных обмазочных масс, которые по реологическим свойствам не являются жидкостями, и перемещаются синхронно со стержнем, а не в виде аксиально неподвижного ядра, как рассмотрено выше.

Наши исследования реологических свойств электродных обмазок показывают, что есть ряд причин, почему система «обмазка–стержень», выведенная из концентричного состояния, как правило не сохраняет максимальную разнотолщинность, при которой достигаются наиболее благоприятные энергетические условия для ее напорного течения. С определенной периодичностью она выходит из него, постепенно приближаясь к стационарному состоянию. Прежде всего следует учитывать, что увеличение объемной скорости течения обмазки, вызванное нарушением соосности втулки и стержня, сопровождается повышением градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$ в режиме $\dot{\gamma} = \text{const}$, в котором происходит наибольший ее диссипативный разогрев [13].

И то, и другое уменьшает сдвиговую вязкость обмазки η и, в значительно большей степени, ξ — коэффициент первой разности нормальных напряжений. Он характеризует скорость уменьшения упругости обмазки под влиянием увеличения градиента скорости сдвига [5]. Таким образом, с повышением $\dot{\gamma}$, вызванным увеличением разнотолщинности, способность обмазки гасить ее

упругие показатели тоже должна возрасти, т. е. вероятность дальнейшего увеличения разнотолщинности покрытия со временем уменьшается. В результате этого каждый раз за периодом возрастания ϵ_i следует ее снижение, система «стержень–покрытие» разряжается от упругих напряжений и постепенно достигает очередного минимума разнотолщинности.

После этого начинается новый ее цикл, поскольку достигнутые при этом $\dot{\gamma}$ и T будут способствовать накоплению упругих напряжений.

Нельзя упускать из виду, что упругие напряжения в напорном потоке могут релаксировать не только в поперечных (x_i и y_i) направлениях, но и вдоль перемещающегося электрода (направление z_i) с последствиями, которые не регистрируются принятым нами осциллографическим методом. Их можно оценить косвенным путем. Представим себе электрод в виде двухслойного стратифицированного потока, в котором стальной стержень заменен обмазкой, отличающейся от обмазки в наружном слое соотношением упругости и вязкости. Например, наполнителем обмазки для внутреннего слоя выберем порошок мрамора, а для наружного — шихту покрытия и наоборот. Консистенция сопоставляемых обмазок разная: пластическая прочность и давление экструзии у первой, более мягкой обмазки: $P_m = 0,35$ МПа, а $P_s = 6,0$ МПа, а у второй, более тугой, 1,95 и 23,5 МПа, соответственно. Представим сначала, что более мягкая обмазка находится внутри двухслойного брикета, а упругая — аксиально по отношению к нему снаружи. Эксперимент показывает, что, в полученном из такой заготовки экструдате внутренний слой разрывается на цилиндрические куски, разведенные вдоль оси материалом наружного слоя почти на одинаковые расстояния друг от друга. Когда же более мягкий компонент разместить снаружи двухслойного брикета, а упругий — внутри него, межфазная граница в экструдате остается сплошной, но приобретает волнообразную форму. В реальном электроде межфазная граница не может деформироваться подобным образом. Но периодическая продольная разрядка упругих напряжений, накопленных в процессе деформации обмазки, обволакивающей стальной прутки, может реализоваться как восстановление струи [14] путем проскальзывания оболочки покрытия вдоль поверхности стержня. В результате сцепление оболочки покрытия со стержнем нарушается.

Чем мельче наполнитель обмазки, тем выше прочность образца прокаленного из нее экструдата, но ниже прочность оболочки покрытия из нее же у прокаленных электродов [15]. Особенно, когда обмазка готовится на высокомолекулярном жидком стекле низкой вязкости.

Таким образом, есть основания полагать, что упругость обмазки, накапливающейся в ней при опрессовке электродов, не только вызывает разнотолщинность, но и, ослабляя в результате релаксации упругости адгезию покрытия со стержнем, может способствовать понижению конечной его прочности у прокаленных электродов.

Выводы

1. С применением осциллографических и математико-статистических методов изучены закономерности образования разнотолщинности покрытия экспериментальных электродов УОНИ 13/55 с диаметром стержня 4 мм при их изготовлении на угловом гидравлическом прессе в условиях, максимально приближенных к производственным. Значения вертикальных и горизонтальных составляющих вектора разнотолщинности регистрировались на аэрофотопленке, движущейся со скоростью $10 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ при скорости опрессовки 420 электродов в минуту. Продолжительность наблюдения в опыте изменяли от 30 до 240 с.

2. Результаты проведенных экспериментов позволяют считать, что разнотолщинность покрытия вызывается дисбалансом характеристик упругости и вязкости электродных обмазочных масс, возникающем в процессе экструзионного нанесения обмазки на прутки. Упругость нужно рассматривать как показатель, провоцирующий в результате мгновенных релаксаций накопленных упругих напряжений появление разнотолщинности покрытия, а вязкость — как демпфирующий фактор, ослабляющий или подавляющий неблагоприятную с этой точки зрения роль упругости.

3. Накопление и релаксация упругих напряжений в напорном потоке обмазочной массы, из которой формируется электродное покрытие в головке пресса, — это непрерывный, многостадийный, немонотонный (волнообразный) и гармонический процесс. В нем возмущения, ответственные за появления разнотолщинности, возникшие на предыдущих стадиях, ощущаются на последующих стадиях опрессовки, в числе которых в самом неблагоприятном случае могут быть даже заключительная стадия.

4. Вероятность образования разнотолщинности покрытия определяется консистенцией обмазочных масс и зависит от конструктивных особенностей формирующего тракта электрообмазочного пресса. Склонность к несимметричной конфигурации оболочки из обмазки на стержне — результат ее стремления обеспечить наиболее благоприятные энергетические условия потока. Степень отклонения стержня от соосного по отношению к оболочке положения зависит от того, как изменяется соотношение упругости и вязкости в резуль-

тате такого отклонения. В реальных неизотермических условиях на эволюцию этого соотношения наряду со скоростью накладывается влияние вязкостного разогрева обмазки, в результате чего эволюция становится циклической. Гармоники в пределах каждого цикла отражают влияние на нее центров генерирования упругости, которые вызывают нарушение стабильности течения обмазки (к примеру, ускорения, поворота, редуцирования, разделения и стратифицирования потока). Количество и разновидность этих центров зависят от конструктивных особенностей формирующей головки электрообмазочного пресса.

5. Разнотолщинность покрытия, с одной стороны, тонко реагирует на изменение консистенции обмазочной массы и конфигурацию формирующего тракта, а с другой стороны, ее значение при этом изменяется по величине и ориентации резко и непредсказуемо. В результате мониторинг процесса с целью улучшения качества продукции по этому показателю может стать весьма проблематичным. С точки зрения реологии обмазочных масс основным направлением их совершенствования с целью уменьшения разнотолщинности покрытия должно стать понижение их склонности к накоплению упругости в состоянии напорного течения.

1. Ворновицкий И. Н. Разнотолщинность покрытия – основной показатель качества электродов / И. Н. Ворновицкий // Сварочное производство. – 1989. – № 4. – С. 7–9.
2. Марченко А. Е. Разнотолщинность покрытия как индикатор состояния процесса и качества изготовления сварочных электродов / А. Е. Марченко // Электродное производство на пороге нового тысячелетия: материалы научно-технического семинара (г. Санкт-Петербург, 22–26 мая 2000 г.). – Череповец: Ассоциация «Электрод», 2000. – С. 124–125.
3. Марченко А. Е. Разнотолщинность покрытия как следствие эластической турбулентности электродных обмазочных масс в состоянии неизотермического напорного потока / А. Е. Марченко // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6-7. – С. 182–194.
4. Марченко А. Е. Исследование вязкоупругих характеристик электродных обмазочных масс в состоянии напорного течения сквозь цилиндрические формирующие насадки / А. Е. Марченко // Сварочные материалы 2015. Петраньевские чтения: сб. докладов Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции 15–17 окт. 2015 г. – С. 79–89.
5. Марченко А. Е. Реологические исследования неизотермических напорных потоков обмазочных масс для сварочных электродов в прямоточных ступенчатых каналах / А. Е. Марченко // Автоматическая сварка. – 2016. – № 1. – С. 1–19.
6. Степаносов А. Р. Экспертная оценка причин разнотолщинности покрытия сварочных электродов / А. Р. Степаносов // Сварочное производство. – 1989. – № 4. – С. 9–11.
7. Ворновицкий И. Н. Управление качеством сварочных электродов в процессе их изготовления / И. Н. Ворновицкий. – М.: Издательство ИКАР, 2001. – 110 с.

8. Марченко А. Е. Особенности формирования разнотолщинности покрытия, обнаруженные осциллографированием / А. Е. Марченко, М. Ф. Гнатенко // Металлургия сварки и сварочные материалы: междунар. научно-техн. конф., 1–2 июня 1992 г.: тезис. докл. – Санкт-Петербург, 1993. – С. 98–100.
9. Патон Б. Е. Сварочная техника в Великобритании / Б. Е. Патон, И. К. Походня // Автоматическая сварка. – 1961. – № 6. – С. 75–92.
10. Саката Сиро Практическое руководство по управлению качеством / Саката Сиро; пер. с 4-го япон. издания С. И. Мышкиной; под ред. В. И. Гостева. – М.: Машиностроение, 1980. – 215 с.
11. Redderger P. J. Axial Laminar Flow in a Circular Pipe a Fixed Core. Canad / P. J. Redderger, M. E. Charles // J. of Chemical Engineering. – 1962. – Aug. – P. 148–151.
12. Хаппель Дж. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса / Дж. Хаппель, Г. Бреннер. – М.: Мир, 1976. – 630 с.
13. Марченко А. Е. О тепловой обстановке, создаваемой вязкостным разогревом электродной обмазочной массы, в зоне формирования напорного потока / А. Е. Марченко // Сварочные материалы 2015. Петраньевские чтения: сб. докладов Санкт-Петербургской международной научно-техн. конф. 15–17 окт. 2015 г. – С. 65–78.
14. Виноградов Г. В. Реология полимеров / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. – М.: Химия, 1977. – 440 с.
15. Марченко А. Е. О физико-химической природе прочности электродных покрытий и технологических путей ее обеспечения / А. Е. Марченко // Сварочные материалы. Технологии. Производство. Качество. Конкурентоспособность: V между. конф., 7–11 июня 2010 г., Артемовск: сб. докл. – Киев, 2010. – С. 78–99.

А. Ю. Марченко

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РІЗНОТОВЩИННОСТІ ПОКРИТТЯ ЕЛЕКТРОДІВ ПІД ЧАС ОПРЕСУВАННЯ

Із застосуванням осцилографічних і математико-статистичних методів вивчені закономірності утворення різнотовщинності покриття експериментальних електродів УОНИ 13/55 з діаметром стрижня 4 мм під час їх виготовлення на кутовому гідравлічному пресі в умовах, максимально наближених до виробничих. Виявлено, що зміна різнотовщинності покриття це безперервний, багатостадійний, немонотонний (хвилюватий) і гармонійний процес, в якому обурення, що виникли на стартовій стадії, можуть відчуватись на наступних стадіях опресування електродів. Різнотовщинність покриття викликається, насамперед, порушенням балансу пружності і в'язкості, який залежить від консистенції електродних обмазувальних мас. Разом з тим на ймовірність утворення різнотовщинності покриття суттєво впливають конструктивні особливості формиуючого тракту електрообмазувального преса. Бібліогр. 15, рис. 7.

Ключові слова: дугове зварювання, покриті електроди, опресування, різнотовщинність покриття, осцилографування, математична статистика

Поступила в редакцію 28.11.2016

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СВАРОЧНОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

О. Г. ЛЕВЧЕНКО¹, О. Н. БЕЗУШКО²

¹НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, пр-т Победы, 37.

²ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

С целью прогнозирования химического состава аэрозолей, образующихся при ручной дуговой сварке, предложена математическая модель конвективного испарения металла с поверхности расплава. Выполнен численный анализ характеристик потока многокомпонентного металлического пара при сварке высоколегированными хромоникелевыми электродами. Определены скорости испарения компонентов сварочных аэрозолей при применении электродов для сварки высоколегированных сталей. Полученная математическая модель дает возможность рассчитывать не только относительную массовую долю токсичного компонента в аэрозоле, как это было возможно до настоящего времени, но и конвективные потоки компонентов сварочных аэрозолей. Библиогр. 12, табл. 2, рис. 4.

Ключевые слова: электродуговая сварка, покрытые электроды, сварочные аэрозоли, химический состав, интенсивность испарения, математическое моделирование

Ручная дуговая сварка характеризуется высокими значениями температуры в дуговом промежутке. Значительная часть поверхности металла электродных капель и сварочной ванны находится в кипящем состоянии и выделяет в зону дуги большое количество паров металла, из которых в результате их конденсации и окисления в воздухе рабочей зоны образуются вредные для организма сварщиков аэрозоли.

Цель данной работы — математическое моделирование химического состава сварочных аэрозолей (СА), образующихся при ручной дуговой сварке высоколегированными хромоникелевыми электродами на основе физико-химических свойств компонентов сварочной ванны.

С повышением температуры давление паров различных веществ растет. При достижении значения давления пара, равного атмосферному давлению (101325 Па), вещество кипит [1]. Зависимость давления насыщенного пара p_i вблизи поверхности расплавленного металла от ее температуры может быть определена с помощью уравнения Клапейрона–Клаузиуса [2]

$$p_n = p_0 \exp \left[\frac{\lambda}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_n} \right) \right], \quad (1)$$

где p_n — давление насыщенного пара над поверхностью металла; p_0 — атмосферное давление; T_k — температура кипения металла (температура, при которой давление насыщенного пара данного металла равно атмосферному); T_n — температура поверхности, λ — работа выхода атома из расплава, k — постоянная Больцмана. Данное уравнение

выполняется при условии, что пар подлещит закону идеального газа, а мольный объем жидкости $V_{ж}$ намного меньше мольного объема пара V_n .

Построенные графические зависимости давления насыщенного пара отдельных токсичных элементов, входящих в состав сварочных электродов (хрома, марганца, никеля и железа), от температуры поверхности испаряющегося сплава согласно уравнению (1) при $T_n = 1500 \dots 3300$ К приведены на рис. 1. Анализ приведенных данных показывает, что в процессе сварки открытой дугой в первую очередь наиболее интенсивно будет испаряться марганец, потом хром, железо и никель.

При проведении расчетов использованы значения работы выхода атома λ и температуры кипения T_k , при которой давление соответствующего

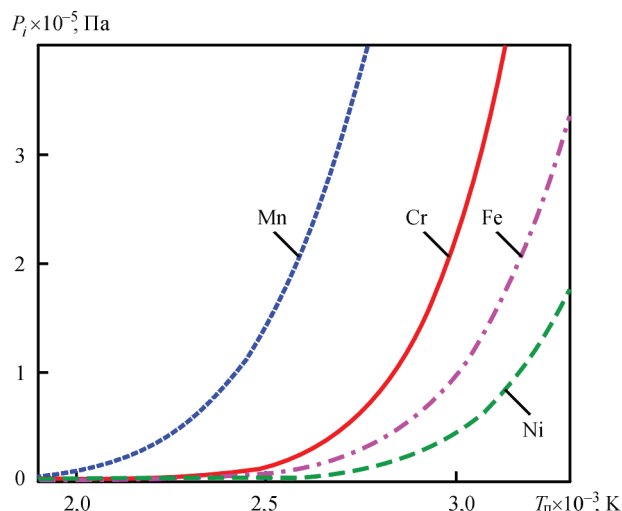


Рис. 1. Зависимость давления насыщенных паров хрома, никеля, марганца и железа от температуры

Таблица 1. Физические свойства компонентов расплавленного металла

Физические свойства	Химический элемент			
	Cr	Mn	Ni	Fe
Работа выхода атома из расплава, λ , эрг $\times 10^{-12}$	5,79	3,73	6,31	5,65
Температура кипения металла, T_k , К	2840	2424	3173	3008

насыщенного пара элемента равно атмосферному [3, 4] (см. табл. 1).

Оценим результирующее давление насыщенных паров над поверхностью сплава, находящегося в жидком состоянии [5]. Будем считать такой сплав слабым раствором хрома, марганца и никеля в железе. Результирующее давление p_{π} определим как сумму давлений насыщенного пара над i -тым компонентом p_{in} сплава с учетом активности i -того компонента в растворе α_i

$$p_{\pi} = \sum_i \alpha_i p_{in}. \tag{2}$$

Для определения активности железа можно воспользоваться законом Рауля [2, 5]

$$\alpha_{Fe} = X_{Fe}, \tag{3}$$

где X_{Fe} — мольная (атомарная) доля Fe в соответствующем сплаве. Здесь следует отметить, что закон Рауля практически применим только для слабых растворов, насыщенный пар которых ведет себя как идеальный газ, то есть выполняется тем лучше, чем ниже давление пара.

При определении активности пара растворенных веществ Cr, Mn, Ni будем использовать закон Генри [2, 5]. Представим активности примесей в следующем виде:

$$\alpha_{Cr,Mn,Ni} = \gamma_i X_{Cr,Mn,Ni}, \tag{4}$$

где γ_i — коэффициент активности i -го элемента; $X_{Cr,Mn,Ni}$ — мольная (атомарная) доля соответствующего растворенного элемента, то есть его концентрация в сплаве. Из-за отсутствия данных предположим, что все коэффициенты активности равны единице.

Таким образом, учитывая соотношение (3) и предполагая, что $\alpha_{Cr,Mn,Ni} = X_{Cr,Mn,Ni}$, с помощью формул (1) и (2) можно оценить давление насыщенного пара над поверхностью сплава, находящегося в расплавленном состоянии, в зависимости от T_{π} . Мольная доля элемента в расплаве рассчитывается по отношению:

$$X_{ip} = \frac{C_{ip} : M_i}{\sum C_{ip} : M_i}, \tag{5}$$

где M_i — атомная масса; C_{ip} — массовая доля i -того элемента в сплаве.

Исследуем особенности испарения многокомпонентного сплава на примере высоколегирован-

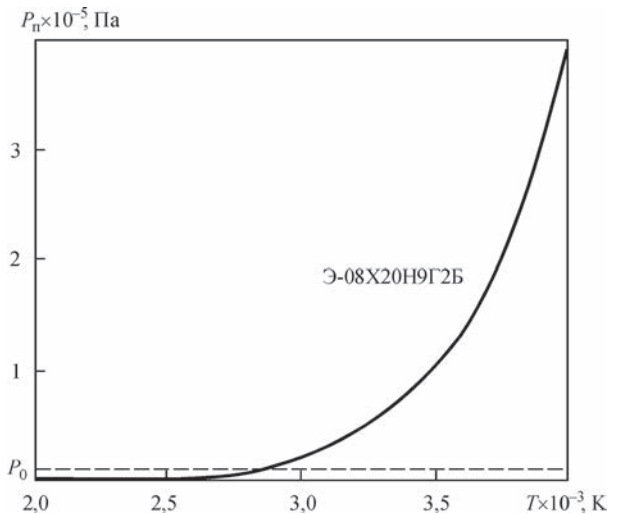


Рис 2. Температурная зависимость давления насыщенного пара над поверхностью расплава металла электродов типа Э-08Х20Н9Г2Б ($X_{Cr} = 0,213$; $X_{Mn} = 0,02$; $X_{Ni} = 0,085$; $X_{Fe} = 0,683$)

ных электродов типа Э-08Х20Н9Г2Б (20 % Cr, 2 % Mn, 9 % Ni). Давление многокомпонентного насыщенного пара над расплавом для Cr, Mn, Ni, Fe приведены на рис. 2.

Для определения количественных характеристик процесса испарения (плотности, температуры и скорости оттока пара) воспользуемся моделью Найта [6], основанной на предположении, что поток пара одномерный и стационарный. Данная модель активно применяется для проведения численного анализа тепловых и газодинамических характеристик потока пара при лазерной сварке [6–9]. Информация о применении ее для ручной дуговой сварки отсутствует.

Согласно этой модели, вблизи поверхности испаряемого металла существует кнудсеновский слой толщиной порядка нескольких длин свободного пробега частиц пара, за пределами которого (в газодинамической области течения) устанавливается термодинамическое равновесие. В работе [6–9] были предложены следующие соотношения, связывающие плотность ρ_v и температуру T_v пара на границе кнудсеновского слоя с плотностью насыщенного пара ρ_{π} и температурой испаряющейся поверхности T_{π}

$$\frac{T_v}{T_{\pi}} = 1 + \frac{m^2 \pi}{32} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{64}{m^2 \pi}} \right), \tag{6}$$

$$\frac{\rho_v}{\rho_{\pi}} = \sqrt{\frac{T_{\pi}}{T_v}} \left[\left(m^2 + \frac{1}{2} \right) e^{m^2} \operatorname{erfc}(m) - \frac{m}{\sqrt{\pi}} \right] + \frac{1}{2} \frac{T_{\pi}}{T_v} \left(1 - \sqrt{\pi} m e^{m^2} \operatorname{erfc}(m) \right), \tag{7}$$

где $\operatorname{erfc}(m)$ — интеграл вероятности. Величина m рассчитывается по формуле

$$m = \left(\frac{M_v u^2}{2kT_v} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

где u — среднемассовая скорость оттока с поверхности металла.

Среднемассовую скорость оттока от поверхности металла рассчитывали по формуле

$$u = \frac{s_0 \left(\frac{p_m^0}{p_0} - 1 \right)}{\gamma_0 \sqrt{1 + \frac{\gamma_0 + 1}{2\gamma_0} \left(\frac{p_m^0}{p_0} - 1 \right)}}, \quad (9)$$

где p_0 — атмосферное давление; $\gamma_0 = 1,4$ — постоянная адиабаты воздуха; $s_0 = 331,5$ м/с — скорость звука в воздухе; p_m^0 — давление пара на границе кнудсеновского слоя.

Расчет конвективного потока пара осуществлялся по формуле

$$J_{p,i} = \alpha_i \frac{p_{\pi}}{p_i} \frac{M_i}{M_v} j_p, \quad (10)$$

где p_{π} — результирующее давление рассчитывается по формуле (2); p_i — давление насыщенного пара над i -тым компонентом из формулы (1); α_i — активность i -того компонента рассчитывается по формулам (3, 4); M_v — средняя масса атома многокомпонентного пара $M_v = \sum_{i=1}^n M_i \frac{\alpha_i p_{\pi}}{p_{\pi}}$; j_p — полный поток испарения $j_p = \rho_v M s \approx \rho_v u$.

Полученные графические зависимости конвективных потоков J_i хрома, марганца, никеля и железа от температуры поверхности капли приведены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, в диапазоне температур от 2900 до 3400 К наиболее высокий поток испарения характерен для хрома и железа. Для определения интенсивности испарения этих элементов предположим, что площадь испарения капли такая же, как площадь сферы с диаметром равным диа-

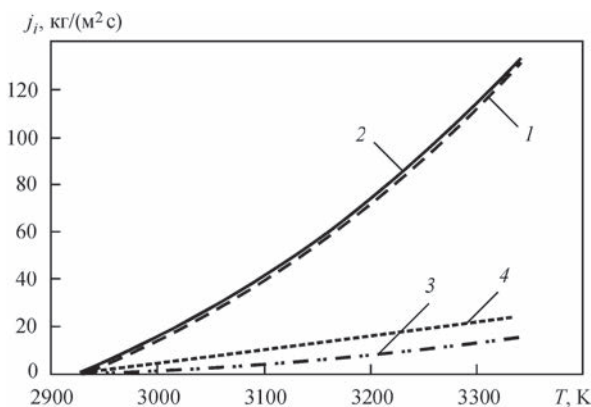


Рис. 3. Зависимости конвективных потоков паров хрома (1), железа (2), марганца (3) и никеля (4) от температуры поверхности капли

Таблица 2. Интенсивность образования компонентов СА при сварке покрытыми электродами типа Э-08Х20Н9Г2Б

Тип электродов — Э-08Х20Н9Г2Б (марка — АНВ-65у)	Интенсивность образования $V_a \times 10^{-5}$, кг/с			
	CrO ₃	Cr ₂ O ₃	Mn	Ni
	0,018337	0,025005	0,020004	0,003334

метру электрода. Диаметр электродов, которыми выполняли экспериментальную сварку, составлял 4 мм. Тогда площадь сферической сварочной капли рассчитывается по формуле $S_{\text{капли}} = \pi d^2$ и равна $5,0265 \cdot 10^{-5}$ м².

Поток испарения i -го элемента запишем в виде

$$J_i = V_i / S_{\text{капли}}. \quad (11)$$

Отсюда $V_i = J_i S_{\text{капли}}$.

Экспериментальные данные [10] интенсивности образования (выделения) хрома, марганца, никеля и железа при сварке покрытыми электродами типа Э-08Х20Н9Г2Б приведены в табл. 2.

По экспериментальным данным построены диаграммы интенсивности образования компонентов СА.

Как видно из полученных результатов, суммарное значение интенсивности образования соединений хрома преобладает над значениями других вредных компонентов, что подтверждают расчетные данные интенсивности испарения хрома (рис. 4).

Используя предложенную математическую модель, можно прогнозировать интенсивность образования указанных компонентов СА при сварке высоколегированными хромоникелевыми электродами. При этом следует учитывать, что образующийся из капли расплавленного металла пар переносится в сварочную ванну, где частично конденсируется, а остаток рассеивается за пределы дуги, образуя в результате конденсации пара в воздухе аэрозоль. Таким образом, результаты экспериментальных определений количества выделенного СА показывают лишь ту часть пара металла, из которой образуется аэрозоль. Поэтому для уточнения реально прогнозируемого значения интенсивности выделения компонентов СА будем пользоваться коэффициентом соотношения K_{vi}

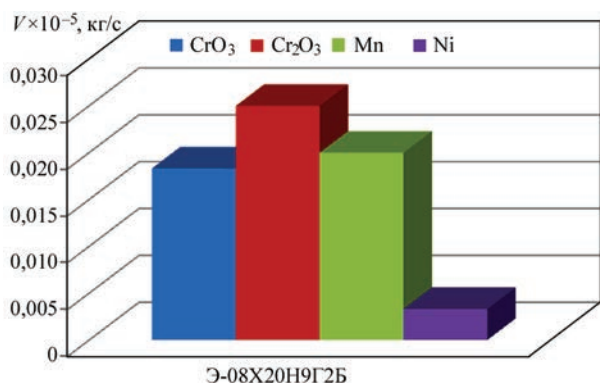


Рис. 4. Интенсивность образования токсичных компонентов СА при сварке электродами типа Э-08Х20Н9Г2Б

экспериментального значения интенсивности выделения i -того элемента $V_{i \text{ экс}}$ к его расчетной интенсивности испарения $V_{i \text{ рас}}$

$$K_{vi} = V_{i \text{ экс}} / V_{i \text{ рас}}$$

Расчетное значение интенсивности испарения $V_{i \text{ рас}}$ использовали при температуре $T_{\text{п}} = 3000 \text{ К}$. Поскольку экспериментальные значения интенсивности испарения хрома представлены для трехвалентного и шестивалентного хрома, просуммируем их для сравнения с расчетными данными. Полученные значения коэффициентов интенсивности испарения i -того элемента K_{vi} для хрома, марганца и никеля, соответственно, при сварке электродами типа 08Х20Н9Г2Б с основным покрытием с раскислением-легированием металла через электродный стержень следующие: $K_{vCr} = 6,08 \cdot 10^{-4}$; $K_{vMn} = 9,09 \cdot 10^{-4}$; $K_{vNi} = 4,54 \cdot 10^{-4}$.

Проверка точности математической модели показала, что относительная ошибка соотношений компонентов в составах пара и СА не превышает 30 %, что обусловлено допущениями, принятыми в процессе создания данной системы моделирования.

Выводы

Таким образом, предложенная математическая модель дает возможность рассчитывать не только относительную массовую долю токсичного компонента в процентах, как это было возможно до настоящего времени [11], но и рассчитывать конвективные потоки компонентов СА, что позволяет без экспериментальных исследований прогнозировать основной гигиенический показатель сварочных материалов — интенсивность образования компонентов СА [12] и на его основе определять степень риска вредного воздействия процесса сварки данными материалами на организм сварщика.

1. Потапов Н. Н. Сварочные материалы для дуговой сварки. Том 1 Защитные газы и сварочные флюсы. Справочное пособие / Н. Н. Потапов. — М.: Машиностроение, 1989. — 544 с.
2. Ландау Л. Д. Теоретическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — М.: Наука, 1976. — Т. V. Статическая физика, Ч.1. — 584 с.
3. Несмеянов А. Н. Давление пара химических элементов / А. Н. Несмеянов. — М.: АН СССР, 1961. — 396 с.
4. Таблицы физических величин: справочник; под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1006 с.
5. Курс физической химии. Т.1.; под ред. Я. И. Герасимова. — М.: Химия, 1969. — 592 с.

6. C. J. Knight // AIAA J., vol. 17, P. 519–523.
7. Моделирование процессов испарения металла и газодинамики металлического пара в парогазовом канале при лазерной сварке / И. В. Кривцун, С. Б. Сухорукое, В. Н. Сидорец [и др.] // Автоматическая сварка. — 2008. — № 10. — С. 19–26.
8. Zhao H. Weld metal composition change during Conduction mode laser welding of aluminum alloy 5182 / H. Zhao, T. Debroy. // Metallurgical and materials transactions B. — 2001. — V 32 B. — P. 163–172.
9. Mundra K. Calculation of weld metal composition change in high-power conduction mode carbon dioxide laser-welded stainless steels / K. Mundra, T. Debroy // Metall. Trans B. — 1993. — 24B. — P. 145–155.
10. Санитарно-гигиенические характеристики покрытых электродов для сварки высоколегированных сталей / К. А. Ющенко, О. Г. Левченко, А. В. Булат [и др.] // Автоматическая сварка. — 2007. — № 12. — С. 44–47.
11. Подгаецкий В. В. О механизме образования сварочного аэрозоля и прогнозировании его состава / В. В. Подгаецкий, А. П. Головатюк, О. Г. Левченко // Автоматическая сварка. — 1989. — № 8. — С. 9–12.
12. ДСТУ ISO 15011-4:2008. Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Лабораторний метод відбирання аерозолів і газів. Ч. 4. Форма для запису даних про аерозолі / [Чинний від 2008-08-15]. — К.: Держспоживстандарт України, 2011. — 20 с.

О. Г. Левченко¹, О. М. Безушко²

¹НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».
03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37.

²ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, Київ-150, вул. Казимира Малеви́ча, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЗВАРЮВАЛЬНОГО АЕРОЗОЛЮ ПРИ РУЧНОМУ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ВИСОКОЛЕГОВАНИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ

З метою прогнозування хімічного складу аерозолів, що утворюються при ручному дуговому зварюванні, запропонована математична модель конвективного випаровування металу з поверхні розплаву. Виконано чисельний аналіз характеристик потоку багатокомпонентної металевої пари при зварюванні високолегованими хромонікелевими електродами. Визначено швидкості випаровування компонентів зварювальних аерозолів при застосуванні електродів для зварювання високолегованих сталей. Отримана математична модель дає можливість розраховувати не тільки відносну масову частку токсичного компонента в аерозолі, як це було можливо до теперішнього часу, але і конвективні потоки компонентів зварювальних аерозолів. Бібліогр. 12, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: електродугове зварювання, покриті електроди, зварювальні аерозолі, хімічний склад, інтенсивність випаровування, математичне моделювання

Поступила в редакцію 17.11.2016

ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ НАПЛАВКА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT22

**В. П. ПРИЛУЦКИЙ¹, С. В. АХОНИН¹, С. Л. ШВАБ¹, И. К. ПЕТРИЧЕНКО¹, И. А. РАДКЕВИЧ¹,
С. Б. РУХАНСКИЙ¹, С. Л. АНТОНЮК²**

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ГП «АНТК им. О. К. Антонова»

В статье приведены результаты исследований применения порошковой проволоки марки ППТ-22 в качестве присадочного материала и магнитоуправляемой дуги для аргонодуговой наплавки изношенных деталей из сплава VT22. Показано, что при восстановлении геометрических размеров изношенных поверхностей наплавкой появляется возможность управлять формой наплавки и получать наплавленный металл со свойствами на уровне свойств основного металла после стандартной термической обработки. Библиогр. 6, табл. 1, рис. 10.

Ключевые слова: сплав VT22, наплавка, порошковая титановая присадочная проволока, магнитоуправляемая дуга

Одним из существенных недостатков большинства титановых сплавов, в частности, сплава VT22, является низкое сопротивление износу. Поэтому в процессе эксплуатации узлов и деталей возникают дефекты поверхности, вызванные ее износом. Такие дефекты наблюдаются в некоторых деталях современных пассажирских и транспортных самолетов, в частности, в рельсах механизации крыла самолетов «АН». Глубина участков износа достигает 2 мм (рис. 1). В связи с возникновением таких дефектов необходимо выполнять замену изношенной детали на новую, что приводит к большим затратам на ее изготовление.

Одним из способов, который применяется для восстановления геометрических размеров зон износа поверхности, является газотермическое нанесение покрытий [1]. Существенными недостатками таких способов является ограничение толщины наносимых покрытий, которая во многих случаях является недостаточной для восстановления глубоких повреждений, а также низкая адгезия нанесенных слоев, приводящая к их разрушению в условиях высоких контактных динамических нагрузок.

К процессам восстановления также относится и технологический процесс наплавки. Он обладает высокой адгезией и позволяет избежать тех недостатков, которые присущи отмеченным выше способам. Поэтому предложено использовать процесс наплавки дугой, горящей в аргоне на вольфрамовом электроде и управляемой магнитным полем, для получения наплавленного слоя [2].

Воздействие внешнего поперечного переменного магнитного поля позволяет регулировать глубину проплавления, ширину и высоту наплавленного слоя, а также перераспределять тепловую энергию дуги так, чтобы большая часть погонной

энергии расходовалась на плавление присадочной проволоки.

Сплав VT22, по-видимому, из-за высокого содержания β -стабилизаторов весьма чувствителен к внутренним напряжениям, которые возникают в зоне термического влияния при выполнении сварки с присадочными проволоками, состав которых отличается от состава сплава VT22 [3, 4]. Поэтому представляло интерес применить для наплавки присадочный материал с таким же химическим составом легирующих элементов, как и у основного металла и после наплавки применить стандартный режим отжига ко всему участку наплавленного соединения.

Важным элементом влияния на свойства сплава VT22 является термическая обработка (ТО). Отжиг для сварных соединений этого сплава является одновременно и упрочняющей ТО. В зависимости от температуры нагрева, длительности отжига и скорости охлаждения можно получать различные сочетания прочности и пластичности. Отжиг сплава VT22 проводят в двухфазной области (750...850 °C) с последующим одно- или многоступенчатым охлаждением [5]. Такая термообработка приводит к мак-



Рис. 1. Рабочая поверхность рельса с участками износа



Рис. 2. Микродефекты поверхности проволоки BT22 ($\times 200$)

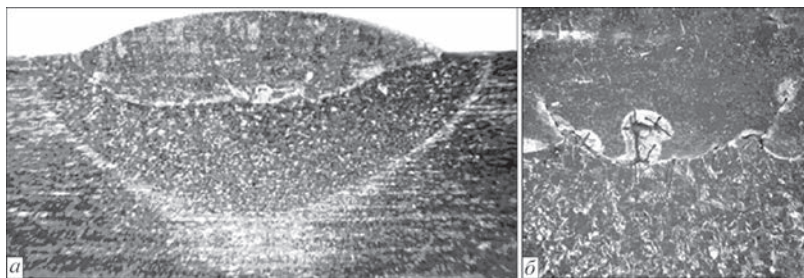


Рис. 3. Макрошлиф соединения, наплавленного присадочной проволокой BT22 на подложку сплава BT22 (а) и макродефекты в зоне сплавления (б)

симальной гетерогенности структуры примерно с равным количеством α и β фаз.

Методика исследований. Наплавку на пластины из сплава BT22 толщиной 12 мм выполняли магнитоуправляемой дугой. В качестве присадочных материалов использовали опытную проволоку сплошного сечения BT22 (диаметр 3 мм) и опытную присадочную порошковую проволоку марки ППТ-22 (диаметр 3 мм) [6]. Исходя из анализа литературных данных, был выбран режим ТО, рекомендованный для сварных соединений: нагрев в печи до $T = 750^\circ\text{C}$, выдержка в течение 1 ч, охлаждение на воздухе.

На микроскопе Neofot после ТО выполнялась оценка качества наплавленных соединений на макро- и микрошлифах, на которых исследовали структуру наплавленного металла.

Наплавка присадочной проволокой BT22. Результаты металлографических исследований присадочной проволоки BT22 показывают, что качество ее поверхности неудовлетворительное, на ней имеются локальные дефекты в виде трещин, надрывов и закатов (рис. 2). Эти дефекты возникли в процессе изготовления проволоки и могут явиться источником загрязнений наплавленного металла и, как следствие, снижения его качества.

В металле, наплавленном проволокой BT22, а также в зоне сплавления наблюдается большое количество разного рода макро- (рис. 3) и микродефектов (рис. 4). В основном это несплошности, трещины, несплавления, поры размером до 0,3 мм. Наличие указанных дефектов можно отнести за счет неудовлетворительного качества изготовленной присадочной проволоки BT22. На основании анализа полученных данных в результате исследований качества наплавленного металла сделан вывод о нецелесообразности применения этой проволоки в качестве материала для наплавки.

Наплавка присадочной порошковой проволокой ППТ-22. Для выполнения наплавки в качестве присадочного материала была использована опытная присадочная порошковая проволока марки ППТ-22. Ее конструкция представляет собой

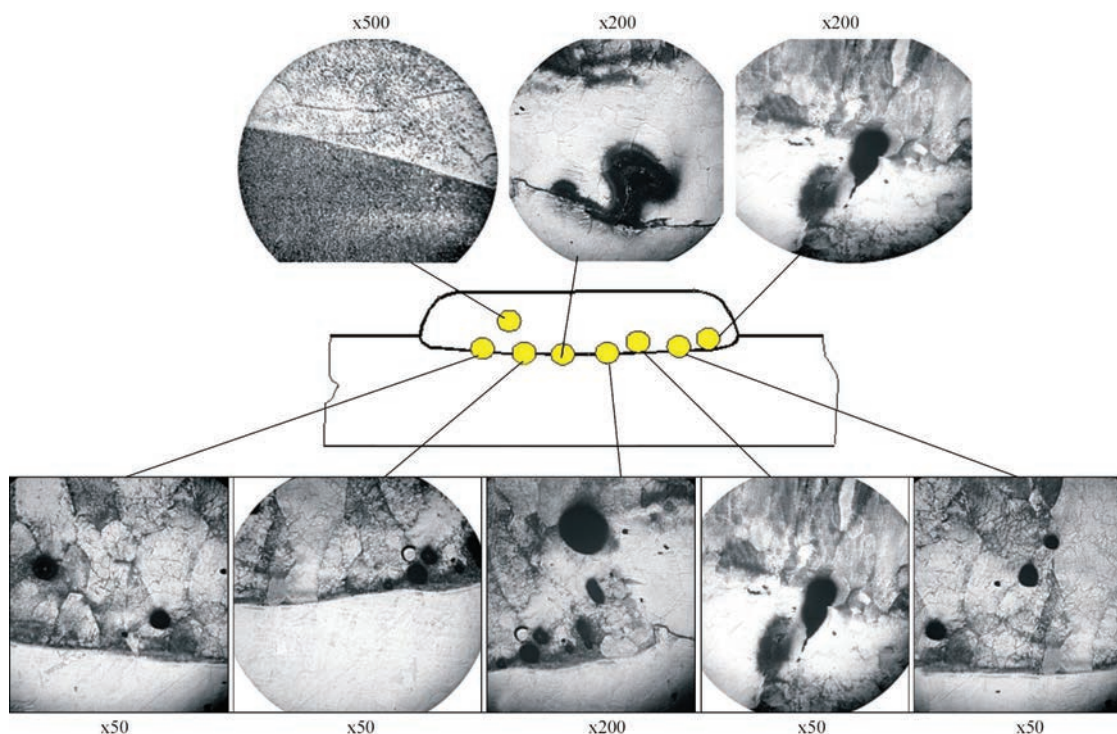


Рис. 4. Участки микроструктуры наплавленного металла BT22 вблизи зоны сплавления

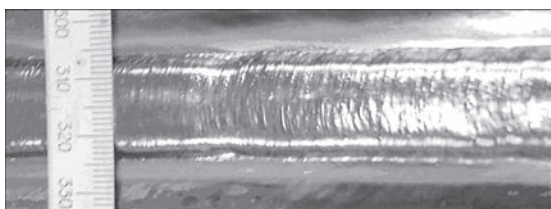


Рис. 5. Характер формирования поверхности металла, наплавленного порошковой проволокой ППТ-22 на пластину сплава ВТ22



Рис. 6. Макрошлиф соединения, наплавленного порошковой проволокой ППТ-22 на пластину сплава ВТ22 в состоянии после наплавки

трубчатую оболочку из технического титана марки ВТ1-00. Внутри оболочки находится металлический сердечник, состоящий из гранул сплава ВТ22. Внешний вид наплавленного металла приведен на рис. 5, макрошлиф — на рис. 6. Выполненный радиологический анализ наплавленных образцов показал отсутствие в них пор (рис. 7).

Металлографический анализ наплавленного металла не выявил в нем пор и других дефектов,

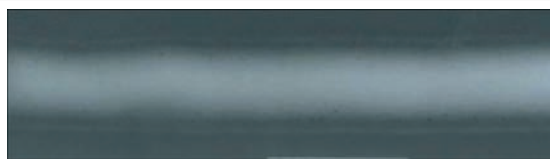


Рис. 7. Рентгенограмма металла, наплавленного порошковой проволокой ППТ-22 в состоянии после наплавки

в зоне сплавления также не обнаружено микродефектов (рис. 8). В наплавленном металле образуется мелкоигольчатая однородная структура, распад β -фазы в объеме зерна при охлаждении происходит равномерно (рис. 9).

Для стабилизации структуры и получения оптимальных механических характеристик после выполнения наплавки соединения подвергали ТО по режиму: нагрев в печи при $T = 750^\circ\text{C}$, выдержка в течение 1 ч, охлаждение на воздухе.

Проведенная ТО вызвала изменения структуры всех участков сварного соединения. В основном металле наблюдалась волнистость между α -пластин (рис. 10, а). В зоне термического влияния произошел достаточно равномерный распад метастабильной β -фазы с выделением дисперсных частиц мартенситной α'/α'' -фазы. Отмечены единичные мелкие рекристаллизованные зерна, частичная рекристаллизация β -зерна, сохранилась субзеренная структура (рис. 10, б). Отжиг способствовал образованию более однородной и равномерной

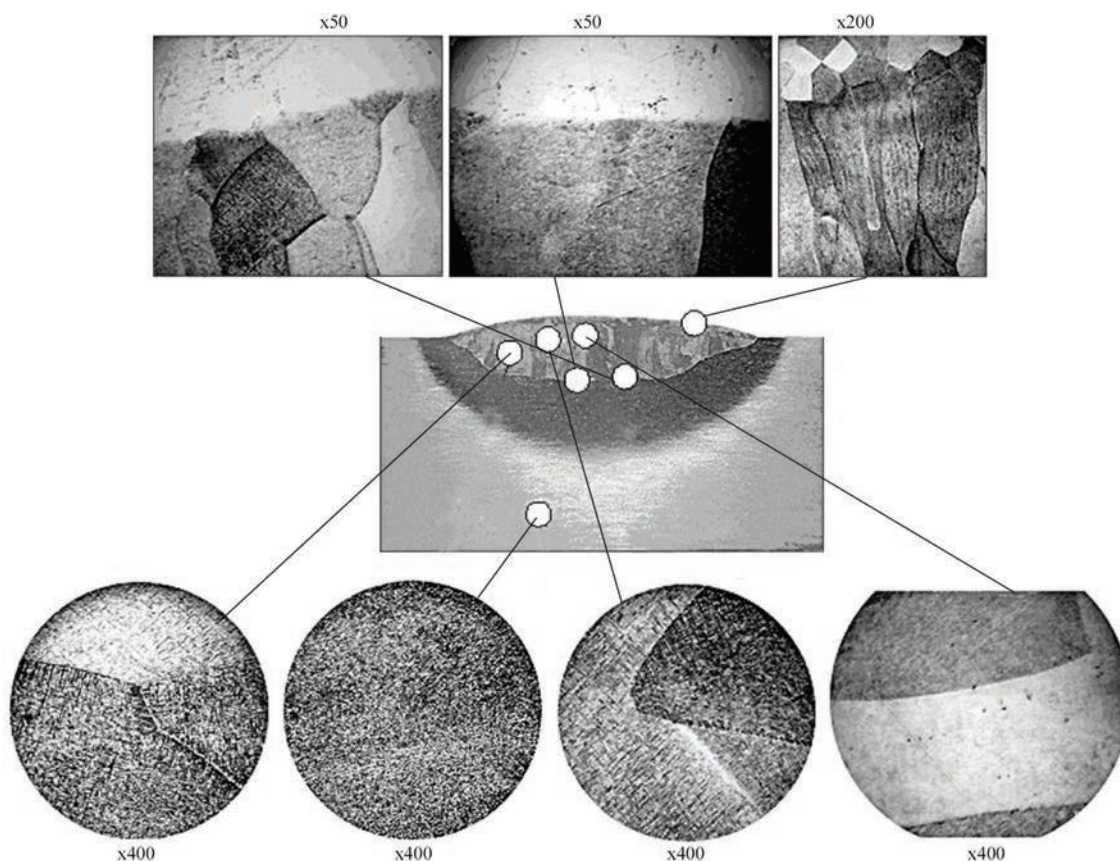


Рис. 8. Микроструктура участков соединения, наплавленного порошковой проволокой ППТ-22 на пластину сплава ВТ22 в состоянии после наплавки

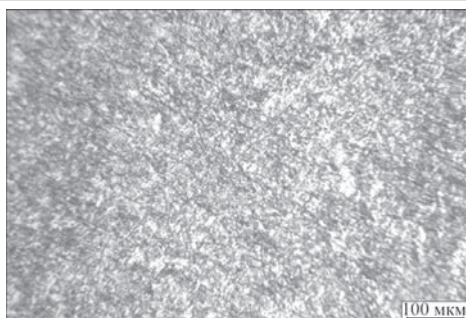


Рис. 9. Микроструктура наплавленного металла проволокой ППТ-22 в состоянии после наплавки

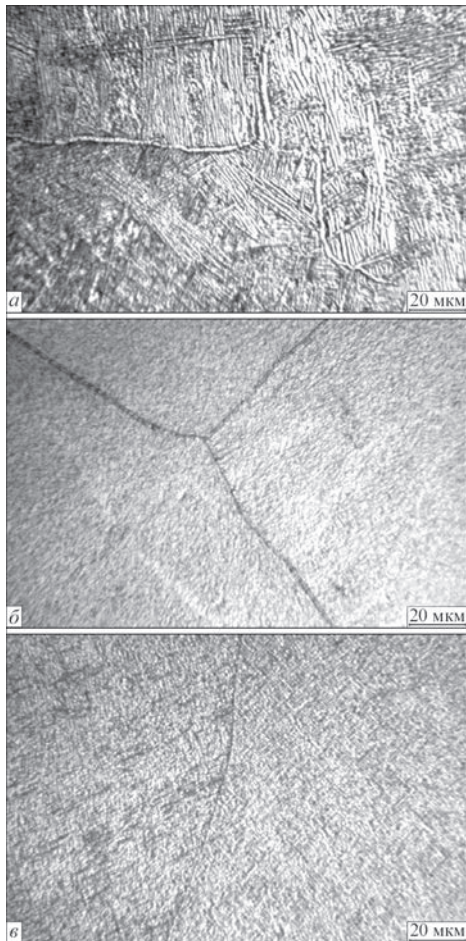


Рис. 10. Микроструктура металла соединения, наплавленного проволокой ППТ-22

структуры металла по высоте наплавки (рис. 10, в), чем в неотожженном образце.

Анализ результатов механических испытаний (таблица) показывает, что прочность металла, наплавленного присадочной титановой порошковой проволокой марки ППТ-22, незначительно превышает прочность основного металла, что может оказать положительное влияние на износостойкость наплавки при трибологических испытаниях.

Результаты исследований показывают, что комбинированное применение присадочной порошковой проволоки марки ППТ-22 и магнитоуправляемой дуги при аргонодуговой наплавке позволяет

Механические свойства наплавленного и основного металла после ТО

Металл	σ_b , МПа	KCV, Дж/см ²
Наплавленный металл	$\frac{1066,0 \dots 1133,9}{1099,9}$	$\frac{13,4 \dots 14,1}{13,7}$
Основной металл	$\frac{930,2 \dots 991,5}{960,85}$	$\frac{32,6 \dots 35,4}{34,0}$

Примечание. Приведены результаты 5-ти испытаний.

управлять формой (шириной и высотой) наплавки и получать наплавленный металл со свойствами на уровне основного металла после стандартной ТО. Полученные данные позволяют рекомендовать использование проволоки ППТ-22 в качестве присадочного материала для восстановительной наплавки.

1. Технологические рекомендации по восстановлению рабочих лопаток турбин ГТД и рельсов механизации крыла самолетов: отчет по НИР № 482-В83 за I-II кв.; науч. рук. проф. А. Я. Алябьев. – К.: КИИГА, 1984. – С. 40–56.
2. Paton B. E. Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium / B. E. Paton, V. N. Zamkov, V. P. Prilutsky. // Welding Journal. – 1996. – № 5.
3. Сварка высокопрочных титановых сплавов / С. М. Гуревич, Ф. Р. Куликов, В. Н. Замков [и др.]. – М.: Машиностроение, 1975. – 150 с.
4. Изыскание присадочного материала для сварки ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, Н. А. Кушнirenко [и др.] // В кн.: Актуальные проблемы сварки цветных металлов. – К.: Наукова думка, 1980. – С. 314–320.
5. Влияние термической обработки на структуру и свойства титанового сплава BT22 / Л. И. Анисимова, А. А. Попов, В. И. Мельникова [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 1977. – Т. 44, вып. 4. – С. 843–845.
6. Аргонодуговая сварка титанового сплава BT22 с использованием присадочной порошковой проволоки / В. П. Прилуцкий, С. Л. Шваб, И. К. Петриченко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2016. – № 9. – С. 10–14.

В. П. Прилуцкий¹, С. В. Ахонin¹, С. Л. Шваб¹,
И. К. Петриченко¹, И. А. Радкевич¹,
С. Б. Руханський¹, С. Л. Антонюк²

¹ІЕС ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua
²ДП «АНТК ім. О. К. Антонова»

ВІДНОВЛЮВАЛЬНЕ НАПЛАВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ТИТАНОВОГО СПЛАВУ BT22

У статті наведено результати досліджень застосування порошкового дроту марки ППТ-22 в якості присадного матеріалу і магнітокеруваної дуги для аргонодугового наплавлення зношених деталей зі сплаву BT22. Показано, що при відновленні геометричних розмірів зношених поверхонь наплавлення з'являється можливість управляти формою наплавлення і отримувати наплавлений метал з властивостями на рівні властивостей основного металу після стандартної термічної обробки. Бібіогр. 6, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: сплав BT22, наплавлення, порошковий титановий присадний дріт, магнітокерувана дуга

Поступила в редакцию 12.12.2016

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВЫМИ ЛЕНТАМИ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НАПЛАВЛЕННЫХ ВАЛИКОВ

А. П. ЖУДРА, А. П. ВОРОНЧУК, В. О. КОЧУРА, В. В. ФЕДОСЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Исследовано влияние параметров режима наплавки порошковыми лентами на геометрические размеры наплавленных валиков. Рассмотрены особенности плавления порошковых лент в зависимости от типа оболочки и химического состава сердечника. В качестве объектов исследований выбраны широко применяемые порошковые ленты ПЛ-АН 101 и ПЛ-АН 179, изготовленные на основе стальной ленты-оболочки, а также лента ПЛ-АН 111 на основе никелевой оболочки. Наплавка выполнялась на аппарате А-874Н, укомплектованном источником питания ВДУ 1201 и приставкой АД 167, в широком диапазоне режимов. Установлено, что с увеличением тока от 600 до 1200 А для всех испытываемых марок порошковых лент характерен рост ширины валика, его высота и глубина проплавления основного металла. Значение коэффициента формы шва для всех рассматриваемых типов порошковых лент с увеличением тока снижается. С увеличением напряжения дуги в диапазоне 24...38 В ширина валика увеличивается, а высота снижается на фоне роста доли основного металла. Изменение глубины проплавления и коэффициента формы шва неоднозначно и зависит от типа порошковой ленты. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: порошковая лента, режимы наплавки, глубина проплавления, геометрические параметры валика, доля основного металла

Для упрочнения деталей оборудования, работающего в условиях абразивного, газоабразивного и других видов изнашивания, в настоящее время широко применяются порошковые ленты. Применение этого электродного материала позволяет получать наплавленный металл с высокой степенью легирования и вести процесс наплавки с высокой производительностью [1–3].

Важными факторами, влияющими на получение заданного химического состава и твердости наплавленного слоя, являются геометрические параметры валика наплавленного металла. В ряде работ [4–6] рассматривается влияние параметров режима на характеристики наплавляемых валиков при использовании холоднокатаных электродных лент различной ширины и отличающихся по своему химическому составу. Из проведенных исследований видно, что на геометрические размеры валиков, помимо тока, напряжения и скорости наплавки, также оказывают влияние толщина, ширина электродной ленты, ее химический состав и марка используемого флюса.

В работах [7, 8] исследовано влияние тока и напряжения на геометрию наплавленного валика при наплавке порошковой лентой сечением 45×3 мм на токах 1000...1900 А. В работах [8, 9] определялась доля электродного металла при наплавке двухзамковой порошковой лентой на токах 700...1100 А. Опытным путем установлено, что в указанном диапазоне с увеличением тока доля

электродного металла падает с 0,64 до 0,62 при скорости 16 м/ч, а с увеличением скорости от 16 до 32 м/ч падает с 0,63 до 0,57.

В последнее время для наплавки различных деталей все большее применение находит однозамковая порошковая лента с плотным замком, разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона. Для разработки технологических процессов наплавки с применением этого электродного материала возникла необходимость в проведении комплексных исследований по влиянию режима наплавки на геометрические параметры наплавленных валиков, а также особенностей плавления порошковых лент.

Для исследований были выбраны три марки порошковых лент ПЛ-Нп-300Х25С3Н2Г2 (ПЛ-АН 101), ПЛ-Нп-500Х40Н40С2РЦ (ПЛ-АН 111) и ПЛ-Нп-400Х20Б7М6Н5В2Ф (ПЛ-АН 179) однозамковой конструкции типа Б по ГОСТ 26467–85 сечением 16,5×3,8 мм. Такой выбор был обусловлен следующими соображениями: порошковые ленты ПЛ-АН 101 и ПЛ-АН 111 — серийно изготавливаемые электродные материалы. Порошковые ленты ПЛ-АН 101 и ПЛ-АН 179 изготавливаются на основе стальной ленты-оболочки, а ПЛ-АН 111 — никелевой. Кроме того, сердечник порошковой ленты ПЛ-АН 101 состоит в основном из комплексной лигатуры, что обуславливает более низкую температуру ее плавления. Опыты выполнялись на наплавочном аппарате А-874Н, укомплектованном источником питания ВДУ-1201

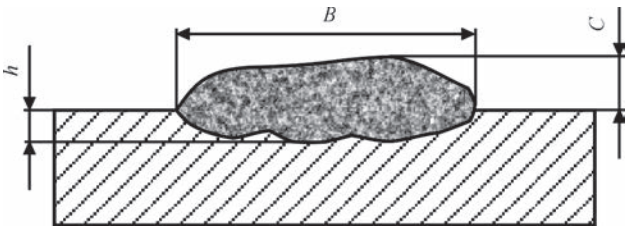


Рис. 1. Сечение валика, наплавленного порошковой лентой и приставкой АД-167. Наплавка выполнялась отдельными валиками в один слой на постоянном токе обратной полярности при неизменной величине вылета, равной 50 мм, и жесткой внешней характеристике источника питания. В качестве основного металла использовались пластины из Ст3 толщиной 30 мм размером 300×400 мм. На каждую из пластин наплавлялось по 6 валиков длиной 200...250 мм. Чтобы исключить влияние предварительного подогрева, каждый последующий валик наносился после полного остывания предыдущего. Из средних участков валиков анодно-механической резкой были вырезаны образцы, на которых после последующей шлифовки были определены геометрические параметры наплавленных валиков, химический состав и твердость наплавленного металла. Параллельно с наплавкой производились также замеры для определения особенностей плавления указанных порошковых лент. Режимы наплавки всеми приведенными лентами представлены в таблице.

Для исследований определяли следующие геометрические параметры наплавленных валиков (см. рис. 1): B — ширину наплавленного валика; h — глубину проплавления основного металла; C — высоту наплавленного валика, а также опре-

делялась площадь наплавленного валика над основным металлом и площадь проплавленного основного металла.

Расчетным путем определялись доля основного металла γ и коэффициент формы валика φ по формулам:

$$\gamma = \frac{F_n}{F_b + F_n},$$

где F_n — площадь проплавления основного металла; F_b — площадь наплавленного валика над основным металлом

$$\varphi = \frac{B}{h},$$

где B — ширина наплавленного валика; h — глубина проплавления основного металла.

Полученные результаты представлены в графическом виде. При этом следует указать, что каждой точке на графике соответствует среднее значение не менее, чем пяти измерений и произведенных по ним расчетов.

На рис. 2 представлено изменение геометрических параметров наплавленного валика в зависимости от тока. С увеличением тока от 600 до 1200 А для всех испытываемых марок порошковых лент характерен рост ширины валика (рис. 2, а), высоты (рис. 2, б) и глубины проплавления основного металла (рис. 2, в). Что касается порошковой ленты ПЛ-АН 101, то рост ширины валика и его высоты наблюдается на токах до 900 А. Дальнейшее увеличение тока не приводит к изменению этих параметров, но площадь наплавленного валика при этом увеличивается. Это объясняется, по нашему мнению, большой жидкотекучестью расплавленного металла сварочной ванны, что в свою очередь связано с типом наплавляемого сплава и использованием в качестве порошка-наполнителя комплексно-легированной лигатуры. Значения коэффициента формы шва для всех рассматриваемых порошковых лент с увеличением тока снижаются (рис. 2, г).

В диапазоне токов от 600 до 800 А для лент ПЛ-АН 101 и ПЛ-АН 179 наблюдается резкий рост доли основного металла от 0,45 до 0,5...0,53, а для порошковой ленты ПЛ-АН 111 в этом же диапазоне наблюдается ее резкое снижение от 0,6 до 0,55. Доля основного металла для всех трех порошковых лент при дальнейшем увеличении тока в диапазоне 800...1200 А остается практически постоянной, равной 0,5...0,55 (рис. 2, д). Такое неоднозначное поведение этого параметра для различных порошковых лент, на наш взгляд, можно объяснить различиями в характере их плавления, обусловленными, в первую очередь, материалом ленты-оболочки. Так порошковая лента ПЛ-АН 111 изготавлива-

Режимы наплавки

Ток, А	Напряжение, В	Скорость наплавки, м/ч
600 ± 25	32 ± 1	32 ± 1
750 ± 25	32 ± 1	32 ± 1
900 ± 25	32 ± 1	32 ± 1
1150 ± 25	32 ± 1	32 ± 1
1200 ± 25	32 ± 1	32 ± 1
900 ± 25	24 ± 1	32 ± 1
900 ± 25	28 ± 1	32 ± 1
900 ± 25	36 ± 1	32 ± 1
900 ± 25	40 ± 1	32 ± 1
900 ± 25	32 ± 1	19 ± 1
900 ± 25	32 ± 1	40 ± 1
900 ± 25	32 ± 1	48 ± 1
900 ± 25	32 ± 1	55 ± 1

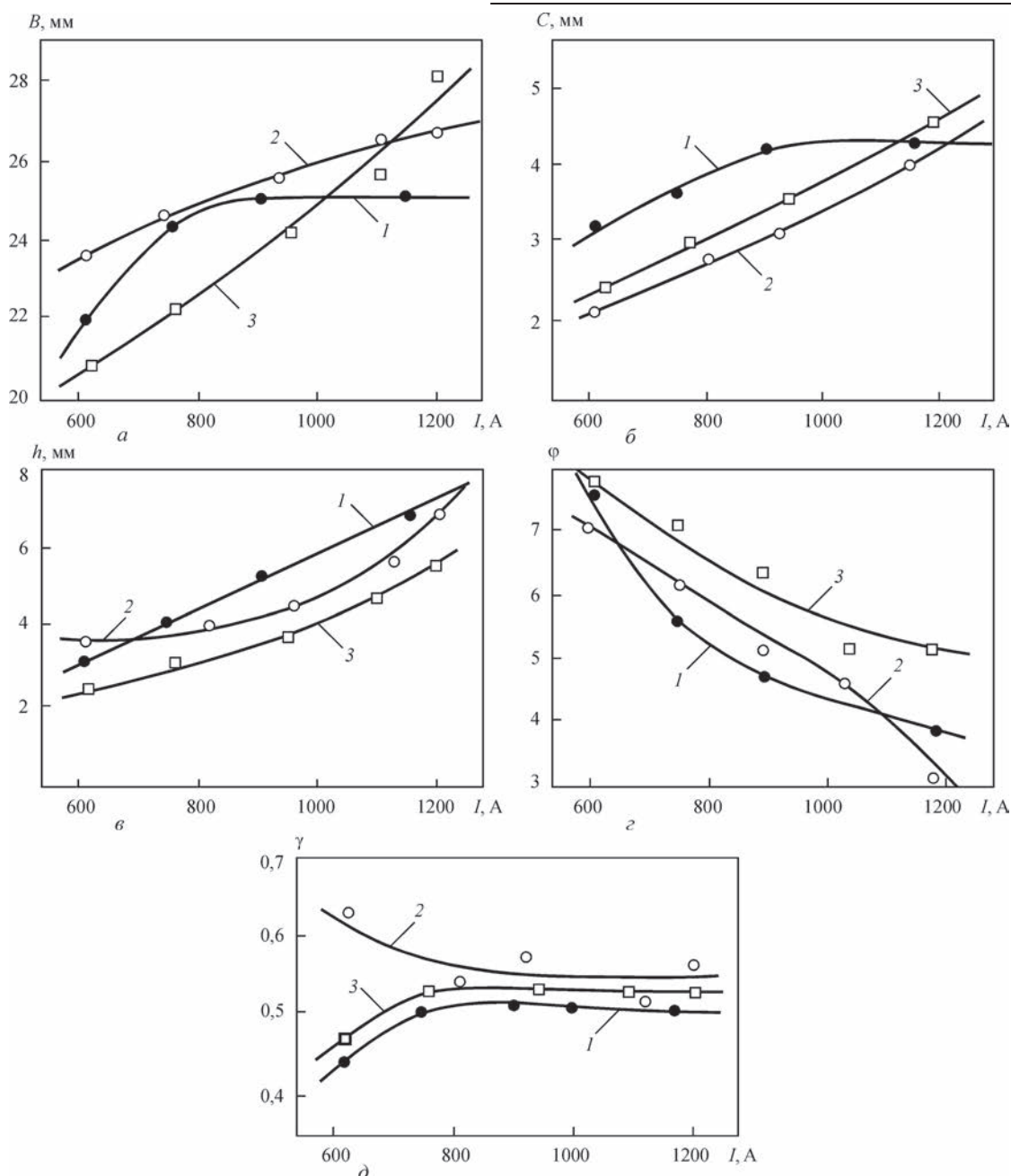


Рис. 2. Изменение геометрических параметров наплавленного валика: ширины (а), высоты (б), глубины проплавления основного металла (в), коэффициента формы шва (г), доли основного металла (д), в зависимости от тока при наплавке порошковыми лентами: 1 — ПЛ-АН 101; 2 — ПЛ-АН 111; 3 — ПЛ-АН 179

ется с применением никелевой ленты-оболочки, обладающей большим удельным сопротивлением, что способствует более значительному подогреву порошковой ленты на вылете. На меньших значениях тока, следовательно при меньшей скорости подачи электродного материала, в общем тепловом балансе более заметную роль играет тепловыделение на вылете электрода, расходуемое на его предварительный подогрев [10]. При плавлении порошковых лент ПЛ-АН 101 и ПЛ-АН 179 со стальной лентой-оболочкой, обладающей меньшим омическим сопротивлением, плавление электродного металла осуществляется в основном за счет тепловой мощности дуги. При

достижении определенных значений тока, в рассматриваемом случае 800 А, характер изменения параметров наплавленных валиков для различных порошковых лент становится практически одинаковым. При этом для испытываемых электродных материалов становится постоянным тепловой баланс дуги, расходуемый на плавление электродного и основного металлов. Нам представляется, что более точное объяснение характера изменения доли основного металла может быть получено после проведения дополнительных исследований изменения сопротивления порошковых лент в зависимости от температуры, а также других пара-

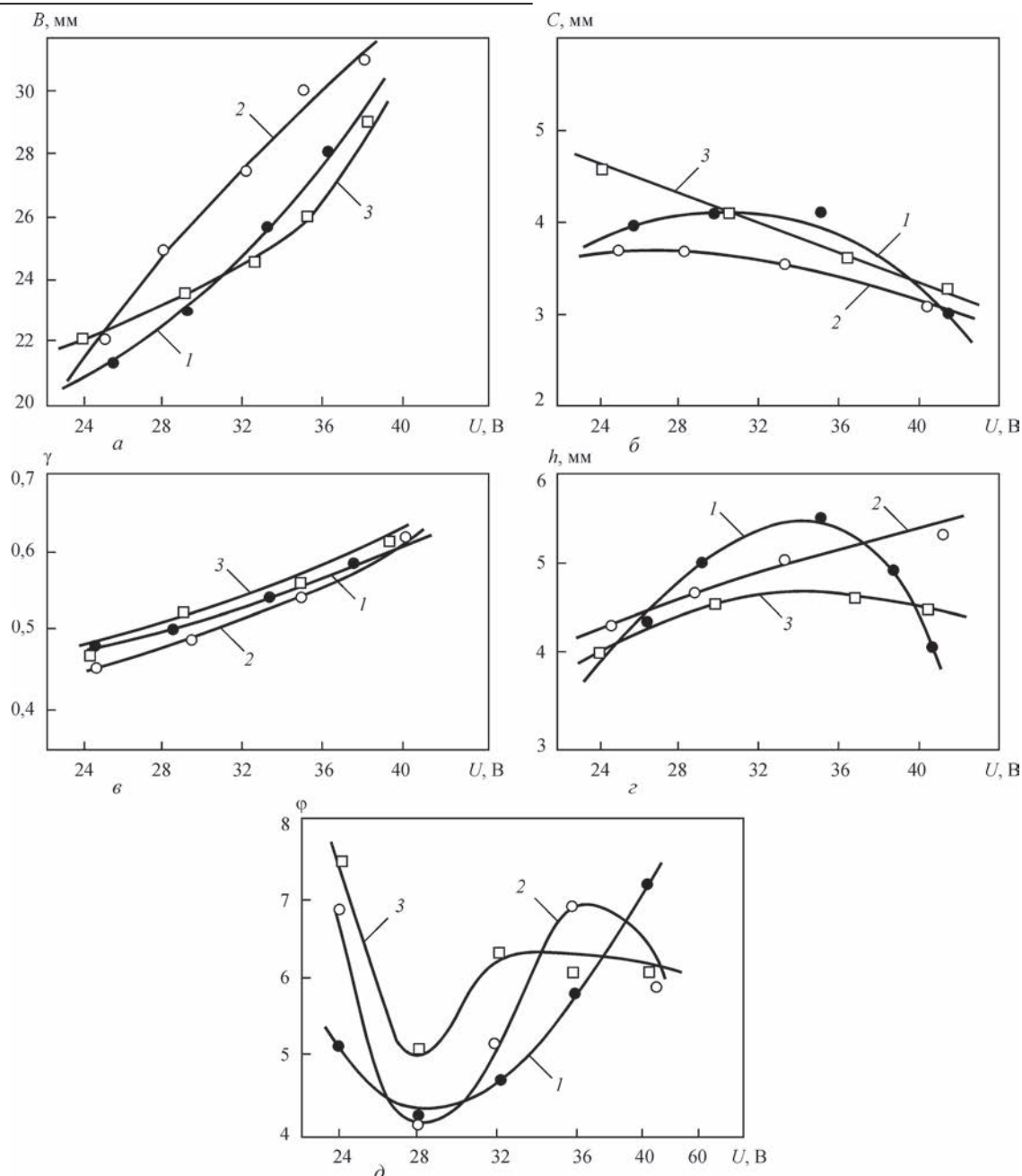


Рис. 3. Изменение геометрических параметров наплавленного валика: ширины (а), высоты (б), доли основного металла (в), глубины проплавления основного металла (г), коэффициента формы шва (д), в зависимости от напряжения при наплавке порошковыми лентами: 1 — ПЛ-АН 101; 2 — ПЛ-АН 111; 3 — ПЛ-АН 179

метров, влияющих на характер плавления электродных материалов.

На рис. 3 представлены геометрические параметры наплавленных валиков в зависимости от напряжения дуги. С увеличением напряжения в диапазоне 24...38 В ширина валика увеличивается с 21...22 до 29...31 мм в зависимости от марки порошковой ленты (рис. 3, а).

При этом высота валика (рис. 3, б) для всех лент снижается, а доля основного металла (рис. 3, в) растет с 0,45...0,5 до 0,6. Что касается глубины проплавления (рис. 3, г) и коэффициента формы шва (рис. 3, д), то их изменение неоднозначно и зависит от испытываемой марки порошковой ленты. Так,

глубина проплавления при использовании ленты ПЛ-АН 111 увеличивается пропорционально увеличению напряжения во всем диапазоне. При наплавке же лентами ПЛ-АН 101 и ПЛ-АН 179 при повышении напряжения от 24 до 32 В происходит рост глубины проплавления основного металла, а в диапазоне 32...38 В — снижение этой величины. Причем, особо сильно это выражено для порошковой ленты ПЛ-АН 101.

На наш взгляд, это связано как с характером плавления электродного материала с различными лентами-оболочками, так и с различными свойствами жидкого расплавленного металла.

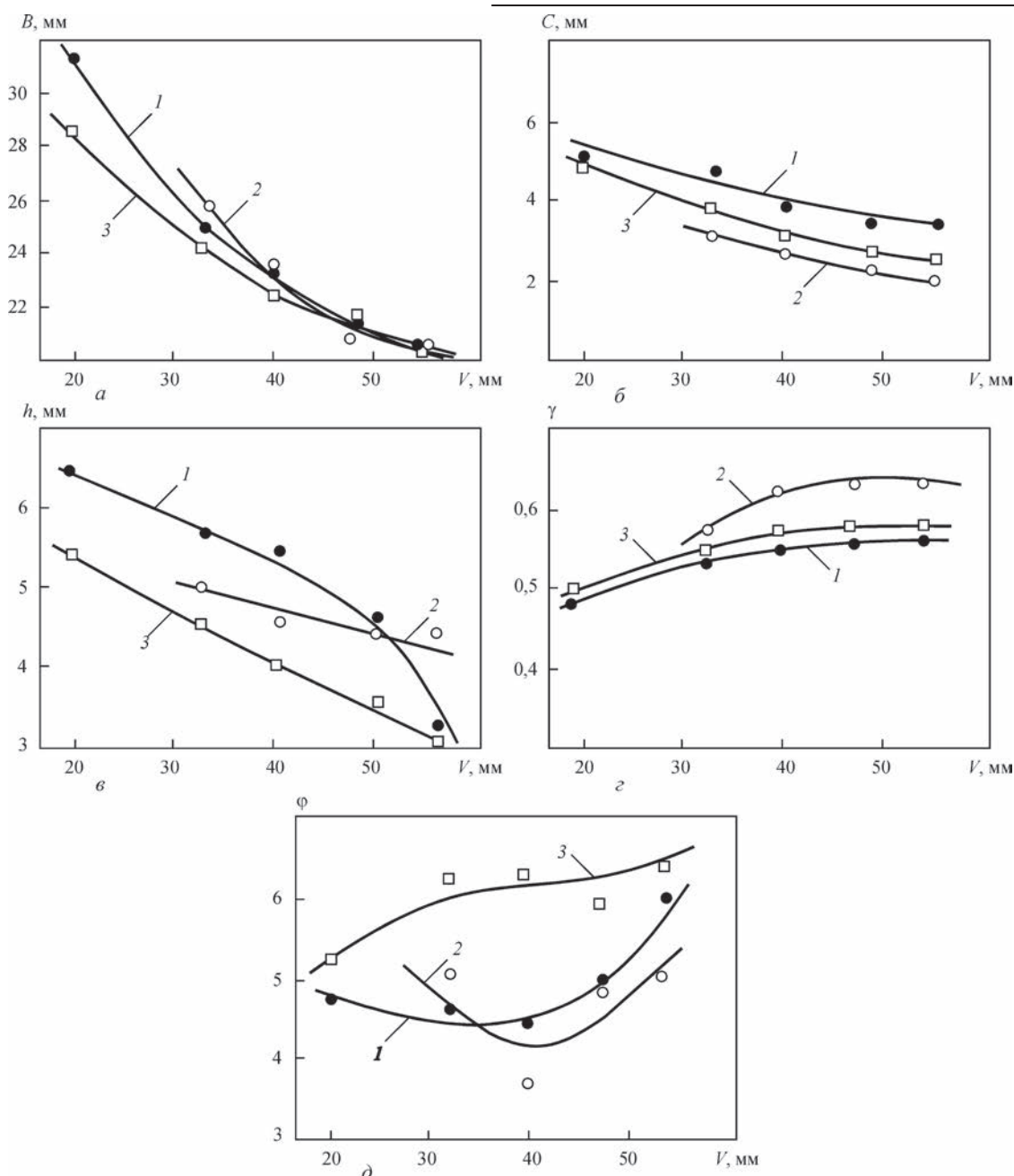


Рис. 4. Изменение геометрических параметров наплавленного валика: ширины (а), высоты (б), глубины проплавления (в), доли основного металла (г), коэффициента формы шва (д), в зависимости от изменения скорости наплавки порошковыми лентами: 1 — ПЛ-АН 101; 2 — ПЛ-АН 111; 3 — ПЛ-АН 179

Наименьшее значение коэффициента формы шва соответствует напряжению 28 В для всех испытываемых марок порошковых лент (рис. 3, д).

В диапазоне минимальных и максимальных значений напряжения дуги коэффициенты формы шва увеличиваются. Влияние скорости наплавки на геометрические параметры наплавленного валика представлены на рис. 4. С увеличением скорости наплавки с 19 до 55 м/ч ширина валика уменьшается с 30...32 до 20,5 мм (рис. 4, а) высота — с 4...5 до 2...3,5 мм (рис. 4, б), глубина проплавления с 5,5...6,5 до 3...4,5 мм (рис. 4, в). Доля основного металла при этом растет при увеличении скорости с 19 до 20 м/ч (рис. 4, г). Даль-

нейшее увеличение скорости наплавки не влияет на долю основного металла. Коэффициент формы шва наиболее низкие значения имеет при скорости 40 м/ч для порошковых лент ПЛ-АН 101 и ПЛ-АН 111. Наиболее низкое значение формы шва для порошковой ленты ПЛ-АН 179 наблюдается при скорости наплавки 19 м/ч (рис. 4, д).

Рассматривая полученные результаты в целом, следует отметить следующее. На геометрические параметры наплавленных валиков, характеристики плавления порошковых лент, а следовательно, химический состав и твердость наплавленного металла, помимо режимов наплавки оказывают существенное влияние состав порошка-наполни-

теля и материал ленты-оболочки. Так, при наплавке порошковой лентой ПЛ-АН 111, изготавливаемой на основе никелевой ленты-оболочки, все исследуемые характеристики в значительной мере отличаются от данных, полученных при наплавке порошковыми лентами ПЛ-АН 101 и ПЛ-АН 179, выполненными из стальной ленты-оболочки. Это, очевидно, можно объяснить более высоким омическим сопротивлением никелевой ленты-оболочки. При этом за счет большего падения напряжения на вылете электрода происходит более интенсивный разогрев порошковой ленты на вылете, что, в свою очередь, увеличивает производительность ее плавления дугой, т. е. ведет к более эффективному использованию тепловой мощности дуги.

1. Наплавка быстроизнашивающихся деталей самозащитными порошковыми лентами / Б. В. Данильченко, В. П. Шимановский, А. П. Ворончук [и др.] // Автоматическая сварка. – 1989. – № 5. – С. 38–41.
2. Жудра А. П. Износостойкая наплавка порошковыми лентами / А. П. Жудра, А. П. Ворончук // Сварщик. – 2010. – № 6. – С. 6–9.
3. Жудра А. П. Наплавочные порошковые ленты (Обзор) / А. П. Жудра, А. П. Ворончук // Автоматическая сварка. – 2012. – № 1. – С. 39–44.
4. Белов Ю. М. Влияние режима автоматической наплавки под флюсом ленточным электродом на сечение валика / Ю. М. Белов // Сварочное производство. – 1961. – № 12. – С. 6–8.
5. Кравцов Т. Т. Электродуговая наплавка электродной лентой / Т. Т. Кравцов. – М.: Машиностроение, 1978. – 188 с.
6. Казарцев В. И. Проплавление основного металла при наплавке электродной лентой / В. И. Казарцев, В. М. Кряжов, Ю. М. Баранов // Автоматическая сварка. – 1968. – № 3. – С. 53–55.
7. Николаенко М. Р. Перенос электродного металла и однородность свойств наплавленного слоя при наплавке порошковым ленточным электродом на форсированных режимах / М. Р. Николаенко, Л. Д. Кузнецов, Г. А. Кортелев // Сварочное производство. – 1976. – № 6. – С. 33–34.
8. Кузнецов Л. Д. Геометрические характеристики валика при наплавке порошковой лентой под флюсом на форсированных режимах / Л. Д. Кузнецов, М. Р. Николаенко, Н. А. Гринберг // Автоматическая сварка. – 1980. – № 9. – С. 58–59.

9. Белоусов Е. Ф. Автоматическая наплавка порошковой лентой уплотнительных поверхностей запорной арматуры / Е. Ф. Белоусов, Ю. А. Зеленкин, А. М. Рыков // Сварочное производство. – 1973. – № 3. – С. 46–47.
10. Патон Б. Е. Процесс плавления электрода при автоматической сварке под флюсом // Труды по автоматической сварке под флюсом. – К.: Изд-во АН УССР, 1949. – № 4. – С. 22–38.

О. П. Жудра, О. П. Ворончук,
В. О. Кочура, В. В. Федосенко

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м.Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ВПЛИВ РЕЖИМІВ НАПЛАВЛЕННЯ ПОРОШКОВИМИ СТІЧКАМИ НА ГЕОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ НАПЛАВЛЕНИХ ВАЛИКІВ

Досліджено вплив параметрів режиму наплавлення порошковими стрічками на геометричні розміри наплавлених валиків. Розглянуто особливості плавлення порошкових стрічок в залежності від типу оболонки і хімічного складу сердечника. Як об'єкти досліджень широко застосовуються обрані порошкові стрічки ПЛ-АН 101 і ПЛ-АН 179, виготовлені на основі сталевих стрічки оболонки, а також стрічка ПЛ-АН 111 на основі нікелевої оболонки. Наплавлення виконувалося на апараті А-874Н, укомплектованому джерелом живлення ВДУ 1201 і приставкою АТ 167, в широкому діапазоні режимів. Встановлено, що зі збільшенням струму від 600 до 1200 А для всіх досліджених марок порошкових стрічок притаманний приріст ширини валика, його висоти і глибини проплавлення основного металу. Значення коефіцієнта форми шва для всіх розглянутих типів порошкових стрічок зі збільшенням струму знижується. Зі збільшенням напруги дуги в діапазоні 2...38 В ширина валика збільшується, а висота знижується на тлі зростання частки основного металу. Змінювання глибини проплавлення і коефіцієнта форми шва неоднозначне і залежить від типу порошкової стрічки. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: порошкова стрічка, режими наплавлення, глибина проплавлення, геометричні параметри валика, частка основного металу

Поступила в редакцию 02.12.2016

WRTYS 2017

IX Международная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии»

23–26 мая 2017 г.

Киевская область

Совет научной молодежи ИЭС при поддержке Национальной академии наук Украины и Института электросварки им. Е. О. Патона проводит 23–26 мая 2017 г. IX Международную конференцию молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии».

Контакты: www.wrtys.com.ua, E-mail: office@paton.kiev.ua
Тел.: +38 (044) 200-47-83, факс: +38 (044) 528-04-86

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЖИДКИХ СТЕКОЛ ДЛЯ СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ МЕТОДОМ ЯДЕРНОЙ МАГНИТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

А. Е. МАРЧЕНКО¹, Н. В. СКОРИНА¹, М. О. КИСЕЛЕВ¹, В. В. ТРАЧЕВСКИЙ²

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Технический центр НАН Украины. 04070, г. Киев, ул. Покровская 13. E-mail: trachev@imp.kiev.ua

С применением ядерной магнитной спектроскопии исследована структура кремнекислородных анионов в составе монощелочных (Li, Na, K) и бинарных (LiNa, LiK и NaK) жидких стекол. Установлено, что комбинации разных форм вязкости отражают структуру находящихся в растворе кремнекислородных анионов, определяющую изменение вязкости жидких стекол в зависимости от их химического состава. Структура ККА монощелочных жидких стекол определяется видом иона-модификатора. Чем больше его размер, тем меньшее деструктурирующее действие он оказывает на ККА, сохраняя большее число мостиковых связей, обеспечивающих более высокий уровень вязкости жидкого стекла. Бинарные смеси жидких стекол при определенных соотношениях долей щелочных оксидов проявляют синергизм вязкости. Доля мостиковых связей у таких стекол выше. Синергетическое повышение вязкости у LiK стекол выражено в большей мере, чем у LiNa и NaK аналогов, хотя вязкость монощелочных стекол, из которых готовились смеси, была одинаковой. Библиогр. 11, табл. 3, рис. 3.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварочные электроды, технология изготовления, жидкое стекло, структура жидкого стекла, применение метода ЯМР спектроскопии

Современное производство сварных конструкций предъявляет все более высокие требования к металлургическим, технологическим, санитарно-гигиеническим, эксплуатационным характеристикам и качеству изготовления покрытых электродов. Многие из них напрямую связаны с видом и химическим составом жидких стекол, которые используются в качестве связующего электродных покрытий. Решение такой многовекторной задачи, как правило, является компромиссным. По этой причине в производстве электродов стали применять бинарные, к примеру, NaK жидкие стекла, благоприятно сочетающие в себе полезные характеристики их компонентов. При этом, к сожалению, часто ухудшаются другие свойства комбинированного связующего, важные для характеристик покрытий и сварочных электродов. К примеру, уменьшение водоудерживающей способности, гигроскопичности электродных покрытий и содержания водорода в наплавленном металле, сопровождается понижением прочности покрытий и ухудшением санитарно-гигиенических характеристик электродов. Хотя комбинированные жидкие стекла используют в отечественном и зарубежном производстве электродов давно, причина указанных особенностей не установлена. Разработчики электродов остро ощущают дефицит информации о структуре и свойствах жидких стекол, которая помогла бы решить эти проблемы.

Во многих силикатных технологиях структуру стекол вообще и жидких стекол в частности

изучают, используя комбинацию таких методов спектроскопии, как инфракрасная (ИК), комбинированного рассеяния света (КР), рентгеновскую дифракционную (XRD), рентгеноэмиссионную высокого разрешения (XES), рамановскую (Laser Raman), протяженной тонкой структуры рентгеновского поглощения (EXAFS) и рентгеновскую фотоэлектронную (XPS) [1].

В последние десятилетия они эффективно дополнены ядерной магнитной спектроскопией (ЯМРС) [2–6], которая рассматривает структуру жидких стекол с позиций соотношения долей мостикового и немостикового кислорода в составе кремнекислородных анионов (ККА).

В цитируемых литературных источниках ответов на интересующие нас вопросы не имеется. Многие используемые в них методы исследования нам не доступны.

Мы применили для исследования структуры монощелочных (Li, Na, K) и бинарных (LiNa, LiK и NaK) жидких стекол, которые используются для производства сварочных электродов, метод ЯМР²⁹Si.

В основе метода лежит явление резонансного поглощения электромагнитных волн атомными ядрами тестируемого вещества, помещенного во внешнее магнитное поле [7]. На примере ядра атома водорода принцип ЯМРС выглядит следующим образом. Протон имеет собственный спин и магнитный момент. Пространственная ориентация спина магнитного вектора протона может либо со-

Т а б л и ц а 1. Виды связности, сочетающиеся в структуре ККА жидких стекол

Q^4	Q^3	Q^2	Q^1	Q^0
$\begin{array}{c} \text{(O) Si} \\ \\ \text{Si(O)-Si-(O)Si} \\ \\ \text{(O)Si} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{(O) Si} \\ \\ \text{Si(O)-Si-O}^- \\ \\ \text{(O)Si} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O}^- \\ \\ \text{Si(O)-Si-O}^- \\ \\ \text{(O)Si} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O}^- \\ \\ \text{Si(O)-Si-O}^- \\ \\ \text{O}^- \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{O}^- \\ \\ \text{O-Si-O}^- \\ \\ \text{O}^- \end{array}$

впадать с направлением вектора напряженности постоянного внешнего магнитного поля, вокруг которого будет прецессировать μ , либо быть противоположной ему.

В первом из названных состояний энергия поля протона E больше, чем во втором. Если протону, оказавшемуся в этих состояниях, путем облучения соответствующими по частоте квантами переменного электромагнитного поля будет добавлена энергия, он перейдет за время действия импульса $2\mu\text{s}$ в состояние с большей энергией, а спин его будет направлен перпендикулярно вектору постоянного поля.

В образце, содержащем большое число подвижных протонов, наблюдается усредненная картина, отображающая поведение ансамбля резонирующих ядер.

На практике обычно используют фиксированную напряженность магнитного поля, а изменяют набор частот облучающего пакета. Тогда резонанс наступает при определенном их соотношении, которое регистрируют в шкале времен ЯМР при детектировании особенностей поглощения энергии и последующей релаксации при взаимодействии со средой.

При регистрации информации, выделяемой методом ЯМР, необходимо учитывать, что:

сигналы атомов, входящих в состав определенных функциональных групп, наблюдаются в строго определенных участках спектра;

интегральные интенсивности пиков, пропорциональны количеству резонирующих атомов разной природы;

ядра, лежащие на расстоянии через 1...4 связи друг от друга, способны обуславливать мультиплетность аналитических сигналов, в результате сверхтонких взаимодействий.

Положение сигнала в спектрах ЯМРС характеризуют величиной их химического сдвига относительно эталонного сигнала, сопряженной с электронным экранированием ЯМР. Единицей химического сдвига является миллионная доля (ppm,

по-русски — м.д.) частоты прибора. Если спектр вещества слишком сложен, для его интерпретирования используется квантовохимическое моделирование распределения электронной плотности между характеристичными фрагментами выделенной целостной структуры.

Атомы кислорода в тетраэдрах, разновидности которых, отличающиеся атомными соотношениями $\text{Si}:(\text{O})_{4-x}:(\text{OSi})_x$, являются основным структурным мотивом кремнекислородных анионов (ККА) в жидких стеклах и представляют фрагменты с мостиковой Si-O-Si ($\text{O}_\text{м}$) или немостиковой Si-O ($\text{O}_\text{к}$) связью. В последней из названных форм связи модификации кислорода являются концевыми и координируются катионами — модификаторами (Li, Na, K, Ca). В зависимости от соотношения $\text{O}_\text{к}/\text{O}_\text{м}$ выделяют 5 типов тетраэдров SiO_4 , которые обозначаются символом Q^n , где n — степень связности, т.е. число мостиковых атомов кислорода, приходящихся на один атом кремния в ККА. В зависимости от типа катиона (Li, Na, K или их бинарные комбинации), модуля и концентрации растворенного силиката показатель n может изменяться от 0 до 4. Чем выше значение этого показателя, тем больше в структуре ККА мостиковых (связанных) атомов кислорода $\text{O}_\text{м}$ (табл. 1).

Методика исследования, вещественные составы и свойства жидких стекол. Значения химического сдвига определены при комнатной температуре на ЯМР-спектрометре модели AVANSE 400 (фирма BRUKER, Германия). В качестве источников информации о структуре ККА жидких стекол служила интенсивность сигналов структурных групп $Q_\text{в}$ в ЯМР²⁹Si первичных аналитических спектров. Поглощение, обусловленное материалом, оформляющим зону измерения, учитывалось в холостых измерениях. Расшифровку спектров ЯМР²⁹Si по степени связности $Q_\text{в}$, зарегистрированных от образцов жидкого стекла, проводили после предварительного вычленения указанного фона из спектра.

Т а б л и ц а 2. Химический состав, плотность и вязкость монощелочных жидких стекол

Вид стекла	Модуль	Массовая доля, %				Свойства стекла	
		SiO_2	Li_2O	Na_2O	K_2O	ρ , $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$	η , $\text{мПа}\cdot\text{с}$
Li	2,77	25,52	4,60	-	-	1313	325
Na	3,09	28,54	-	8,40	1,70	1433	325
K	3,67	26,37	-	1,66	8,93	1422	360

Химический состав, данные о плотности и вязкости монощелочных жидких стекол приведены в табл. 2. В табл. 3 сравнены показатели связности, найденные при тестировании монощелочных жидких стекол и составленных из них образцов двойных смесей. На рис. 1 такое сравнение показано в графическом виде (номера стекол те же, что и в табл. 3).

Как следует из приведенных данных, вязкость ряда исходных монощелочных жидких стекол была примерно одинакова (320...360 мПа·с). Бинарные их смеси из этих стекол, демонстрируют синергизм вязкости: после смешивания вязкость смеси повышается в сравнении с предполагаемым аддитивным значением. Чем больше различие размеров ионов-модификаторов в исходных стеклах, тем четче проявляется синергизм их вязкости в смеси.

Приведенные данные позволяют сделать следующие обобщения.

Структура ККА монощелочных жидких стекол определяется видом иона-модификатора. Чем больше его размер, тем меньшее деструктурирующее действие он оказывает на структуру ККА: сохраняется большее число мостиковых связей Q^4 .

В смесях жидких стекол, где проявилось наибольшее синергетическое повышение вязкости, доля мостиковых связей возрастает в сравнении

с долей соответствующих форм связности в монощелочных стеклах. Исключением являются NaK жидкие стекла, где начиная с небольших добавок калиевая составляющая вызывает понижение выхода Q^4 , в том числе и у синергетической композиции.

Изменение связностей для LiNa-4 смеси в точности, а для LiK-5 с меньшей точностью подчиняется стехиометрии уравнения обменной реакции

$$2Q^4 \leftrightarrow Q^2 + Q^3. \tag{1}$$

Указанные стекла демонстрируют наибольшую степень синергизма вязкости.

Для NaK стекол синергетический эффект проявляется в наименьшей мере, и стехиометрия

Таблица 3. Химический состав, плотность и вязкость комбинированных жидких стекол

Номер п/п	Доля второго компонента, мас. %	Доля связностей, %			Вязкость, η, мПа·с
		Q ³	Q ⁴	ΣQ ³ + Q ⁴	
LiNa жидкие стекла					
1	0	38,3	26,5	64,8	325
2	16,3	43,5	23,4	66,9	770
3	33,3	43,4	22,7	66,1	795
4	50,0	36,9	30,8	67,7	815
5	66,7	41,1	21,0	62,1	620
6	83,7	37,8	18,4	56,2	435
7	100	38,1	16,0	54,1	325
LiK жидкие стекла					
1	0	38,5	26,5	65,0	325
2	16,3	37,8	25,0	62,8	1750
3	33,3	33,0	36,9	69,9	2115
4	50,0	38,4	26,9	65,3	6140
5	66,7	40,0	26,4	66,4	20800
6	83,7	40,5	27,4	67,9	1300
7	100	41,3	14,0	55,3	360
NaK жидкие стекла					
1	0	38,6	15,4	54,0	325
2	16,3	43,5	10,3	53,8	395
3	33,3	44,5	11,4	55,9	595
4	50,0	45,3	12,6	57,9	545
5	66,7	47,0	8,0	55,0	445
6	83,7	47,3	8,8	56,1	440
7	100	42,0	12,8	54,8	360

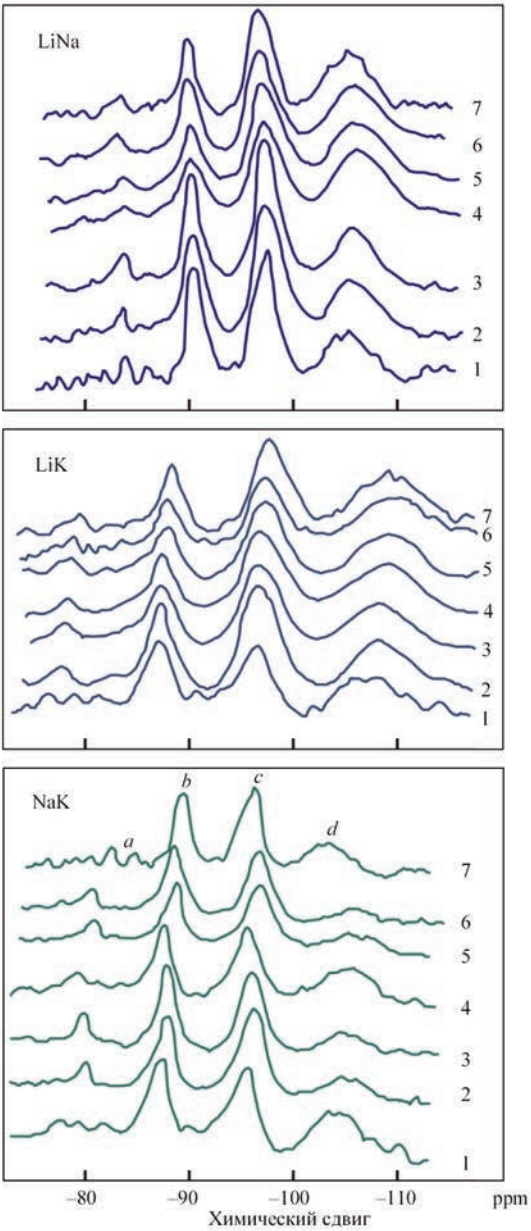


Рис. 1. Эволюция параметров ЯМР²⁹Si комбинированных NaK, LiK и LiNa жидких стекол в зависимости от соотношения входящих в их состав монощелочных компонентов; a, b, c, d — величины интегральных интенсивностей сигналов с характерными для Q^1 , Q^2 , Q^3 и Q^4 значениями химических сдвигов

форм не подчиняется уравнению (1). Сигналы форм с разной связностью различаются не только по интенсивности, но и по ширине, особенно Q^4 . Не исключено, что в них сочетается не один, а 2...3 вида связностей. Для корректного разделения суперпозиций на отдельные составляющие необходимо применение специальных методов.

Качественная связь между вязкостью и долей форм Q^4 в структуре стекол, ответственных за степень полимеризации ККА, иллюстрируется рис. 2. Более тонкую корреляцию между вязкостью и структурой ККА можно установить, если в качестве структурного показателя ориентироваться не на выход Q^4 , а на сумму $(Q^3 + Q^4)$. На рис. 3 такая взаимосвязь демонстрируется в графическом виде. Для LiNa и NaK жидких стекол с малым синергетическим эффектом использована натуральная шкала координат. Для LiK жидких стекол, у которых из-за большой разницы размеров катионов (и, следовательно, ККА) диапазон вязкостей, связанных с синергетическим эффектом расширился больше чем в 20 раз, использована логарифмическая шкала вязкостей.

Прямо пропорциональная зависимость между вязкостью LiNa, NaK стекол и суммарной долей форм связности $(Q^3 + Q^4)$ указывает на то, что обе формы ККА принимают участие в формировании вязкостного эффекта, конкурируя в структурообразовании. Разницей соотношений размеров ионов K и Na, большей, чем ионов Na и Li, можно

объяснить большую крутизну наклона на графике первой прямой, чем второй. Для бинарных LiK стекол с катионами, намного больше отличающихся друг от друга размерами, синергетический подъем вязкости проявляется в наибольшей мере.

Установленные закономерности позволяют более детально рассмотреть механизм синергетического эффекта на примере расплавов $(K_2O-Li_2O-SiO_2)$ [8]. Энергетическая стабильность Li_2O выше, чем K_2O . Из-за большей доли форм связности Q^4 система с оксидом лития характеризуется меньшей основностью, чем система с K_2O . Как катион слабого основания (в концентрированных водных растворах LiOH доминируют тетрамеры $(LiOH)_4(H_2O)_4$) Li^+ стремится координировать вокруг себя кремнекислородные структурные единицы со связностью Q^2 и Q^1 , выход которых в однокомпонентных литиевых стеклах незначителен. Эту способность литиевый катион в большей степени реализует в стеклах с двумя катионами, где он доминирует в конкуренции с ионами K.

В свою очередь окружение K^+ , составят кремнекислородные группы Q^3 и Q^4 . Обменная реакция, учитывающая конкурентную координацию и взаимопревращение форм Q^n , имеет вид

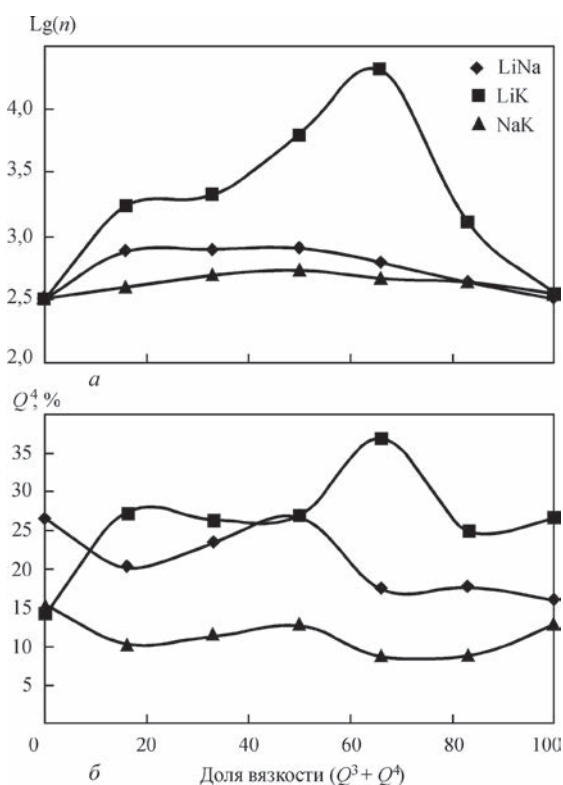
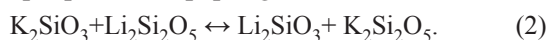


Рис. 2. Влияние концентрации 2-го компонента на вязкость смеси LiNa, LiK и NaK жидких стекол (а), а также на долю связностей Q^4 (б) в структуре ККА

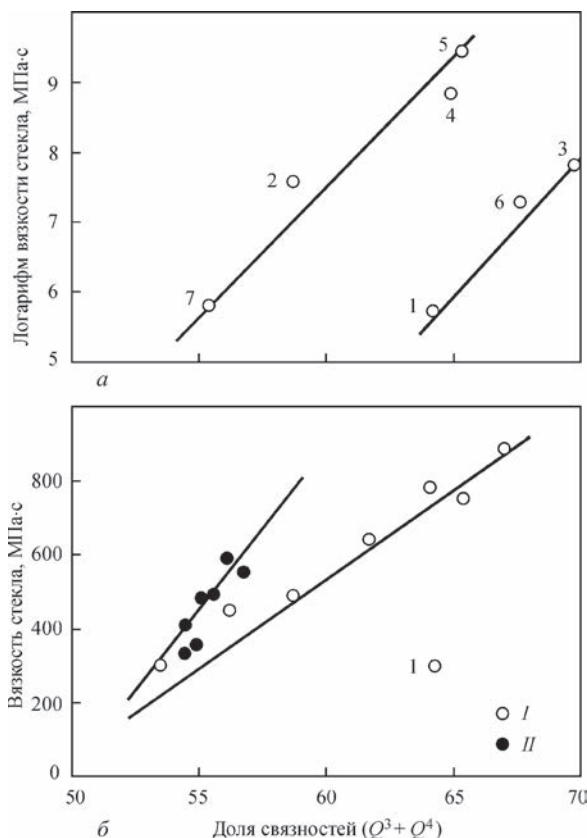


Рис. 3. Зависимость вязкости бинарных LiK (а), а также LiNa (б, I) и NaK (б, II) жидких стекол от суммарной доли форм связности $(Q^3 + Q^4)$. Цифрами возле точек обозначены номера образцов жидких стекол

В результате обмена кремнекислородными группировками литиевая составляющая смеси повысит, а калиевая понизит свой модуль. Наличие нескольких модификаций ККА, находящихся каждая в зоне влияния катиона, затрудняет их перераспределение при сдвиге, и это приводит к соответствующему увеличению вязкости.

Более слабое проявление синергизма вязкости в опытах с LiNa и NaK жидкими стеклами объясняется меньшим различием размеров и кислотно-основных характеристик сравниваемых щелочных катионов. При более высокой исходной вязкости монощелочных жидких стекол синергизм вязкости их смесей проявляется в значительно большей мере [9, 10].

Положение точек 1, 3 и 6, которое особенно заметно на приведенной логарифмической интерпретации изменения вязкости LiK смеси (рис. 3), тоже объясняется влиянием размеров и кислотно-основных характеристик ККА. Для этого нужно по данным ЯМР прецизионно идентифицировать не только формы с различным координационным окружением, но и их возможную изомеризацию. То, что вязкость смеси жидких стекол может иметь не только положительное, но часто и отрицательное отклонение от аддитивных значений, особенно, если для приготовления использованы растворы исходных составляющих с различными модулями, подтверждено экспериментом [9, 10].

Результаты исследований позволяют трактовать причины выявленных особенностей влияния жидких стекол на водоудерживающую способность покрытий, содержание водорода в металле, наплавленном низководородными электродами, и санитарно-гигиенические характеристики электродов для сварки высоколегированных хромоникелевых сталей, исходя из представлений о структурных изменениях жидких стекол, основанных на связностях в ККА [11].

Выводы

1. Комплексное исследование монощелочных (Li, Na, K) и бинарных (LiNa, LiK и NaK) жидких стекол с использованием методов получения разнородной информации о структурно-функциональных преобразованиях силикатов позволило выявить дискретную структуру щелочных жидких стекол. Размеры ККА определяются размерами катионов, ими инкапсулированными. Между структурообразующей способностью разных форм связности находящихся в структуре ККА и вязкостью образованных ими водных растворов имеется тесная взаимосвязь.

2. Структура ККА монощелочных жидких стекол определяется видом иона-модификатора. Чем больше его размер, тем меньшее деструктурирующее дей-

ствие он оказывает на ККА, сохраняя большее число мостиковых связей Q^4 , обеспечивающих более высокий уровень вязкости жидкого стекла.

3. В бинарных смесях жидких стекол, проявляющих при определенных соотношениях щелочных оксидов синергизм вязкости, доля мостиковых связей выше, чем у монощелочных стекол. В наибольшей мере синергетическое повышение вязкости наблюдается у LiK стекол. Между вязкостью бинарных жидких стекол и суммарной долей форм связности ($Q^3 + Q^4$) имеется прямо пропорциональная зависимость: для LiNa и NaK стекол, проявляющих небольшой синергизм вязкости, в обычной, а для LiK, характеризующихся большим синергетическим эффектом — в логарифмической координатной сетке.

1. Uchino T. Interpretation of hydrated states of sodium silicate glasses by infrared and raman analysis / T. Uchino, T. Sakka, M. Iwasaki // J. Am. Ceram. Soc. — 1991. — V. 74, № 2. — P. 306–313.
2. Bukermann W. A. A Further ^{29}Si MAS NMR study on binary alkali silicate glasses / W. A. Bukermann, W. Mueller-Warmuth, G. H. Frichat // Glastechn. Ber. — 1992. — Bd 65, № V. — S. 18–21.
3. The structural groups of alkali silicate glasses determined from ^{29}Si MAS — NMR / H. Maekawa, T. Maekawa, K. Kawamura, T. Yokokawa // J. Non-Cryst. Sol. — 1991. — v. 127. — P. 53–64.
4. Брыков А. С. Состояние кремния в силикатных и кремне-содержащих растворах и их вязжущие свойства / А. С. Брыков, В. В. Данилов, Е. Ю. Алешунина // Журнал прикладной химии. — 2008. — Т.81, Вып. 10. — С. 1589–1593.
5. Брыков А. С. Силикатные растворы и их применение / А. С. Брыков. — СПб.: 2009. — 54 с.
6. Малявский Н. И. Щелочносиликатные утеплители. Свойства и химические основы производства / Н. И. Малявский // Рос. хим. журнал (Ж. рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева). — 2003. — Т. XLVII. № 4. — С. 39–45.
7. Федотов М. А. ЯМР растворов неорганических соединений / М. А. Федотов. — Новосибирск, 2009. — 340 с.
8. Анфилов В. Н. Силикатные расплавы / В. Н. Анфилов, В. Н. Быков, Ф. Ф. Осипов. — М.: Наука, 2005. — 357 с.
9. Марченко А. Е. Жидкие стекла — структурированные жидкости / А. Е. Марченко, Н. В. Скорина // СЭВ. Координац. центр по пробл. «Развитие науч. основ...»: информ. материалы. — К.: Наукова думка, 1981. — Вып. 2. — С. 106–109.
10. Марченко А. Е. Комбинированные щелочные силикаты в производстве низководородных электродов / А. Е. Марченко, Н. В. Скорина // Металлургические и технологические проблемы электродов с основным покрытием: доклады II Междунар. школы стран-членов СЭВ (г. София, ноябрь 1989 г.). — К.: Наукова думка, 1989. — С. 123–130.
11. Марченко А. Е. Влияние технологических факторов изготовления низководородных электродов на содержание водорода в наплавленном металле / А. Е. Марченко, Н. В. Скорина // Автоматическая сварка. — 2013. — № 8. — С. 14–25.

А. Ю. Марченко¹, М. В. Скорина¹, М. О. Кисельов¹,
В. В. Трачевский²

¹ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

²Технічний центр НАН України. 04070, м. Київ,
вул. Покровська, 13. E-mail: trachev@imp.kiev.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ РІДКИХ СТЕКОЛ
ДЛЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОДІВ МЕТОДОМ
ЯДЕРНОЇ МАГНІТНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ

Із застосуванням ядерної магнітної спектроскопії досліджено структуру кремнекисневих аніонів в складі монолужних (Li, Na, K) та бінарних (LiNa, LiK і NaK) рідких стекел. Встановлено, що комбінації різних форм зв'язності відображають структуру кремнекисневих аніонів, що знаходяться в розчині та визначають зміну в'язкості рідких стекел в залежності від їх хімічного складу. Структура ККА монолужних рідких стекел визначається видом іона-модифікатора. Чим більше його розмір, тим меншу

деструктуючу дію він чинить на ККА, зберігаючи більшу кількість місткових зв'язків, що забезпечують більш високий рівень в'язкості рідкого скла. Бінарні суміші рідких стекел при певних співвідношеннях часток лужних оксидів проявляють синергізм в'язкості. Частка місткових зв'язків у таких стекел вище. Синергетичне підвищення в'язкості у LiK стекел виражено в більшій мірі, ніж у LiNa і NaK аналогів, хоча в'язкість монолужних стекел, з яких готувалися суміші, була однаковою. Бібліогр. 11, табл. 3, рис. 3.

Ключові слова: дугове зварювання, зварювальні електроди, технологія виготовлення, рідке скло, структура рідкого скла, застосування метода ЯМР спектроскопії

Поступила в редакцию 18.12.2016

Календарь выставок и конференций в 2017 г.

Дата	Место проведения	Название
24 января	Киев, Украина, ИЭС им. Е. О. Патона	Семинар «Сварочные материалы»
20–24 февраля	Свалява, Карпаты, Украина	17-й Международный научно-технический семинар «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте»
22–24 марта	Львов, Украина	7-я специализированная выставка «Металл, оборудование, инструмент»
28–30 марта	Киев, Украина	9-я Международная специализированная выставка «Киевская техническая ярмарка»
4–7 апреля	Минск, Беларусь	17-я Международная специализированная выставка «Сварка и резка-2017»
апрель	С.-Петербург, Россия	19-я Международная научно-практическая конференция «Технология упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика»
25–28 апреля	С.-Петербург, Россия	18-я Международная выставка-конгресс по сварке, резке и родственными технологиям «Сварка/Welding-2017»
май	Киев, Украина ИЭС им. Е. О. Патона	Сессия научного совета по новым материалам МААН
23–25 мая	Запорожье, Украина	5-я Международная специализированная выставка «Машиностроение. Металлургия. Сварка»
23–26 мая	Киев, Украина, ИЭС им. Е. О. Патона	9-я Международная конференция молодых ученых «Сварка и родственные технологии»
23 мая–2 июня	Одесса, Украина	17-я Международная научно-техническая конференция «Инженерия поверхности и реновации изделий» с семинаром «Сварка, наплавка и другие реновационные технологии»
5–8 июня	Белгород, Россия	Международный научно-практический семинар «Совершенствование сварочных материалов и технологий их производства под прогнозируемые требования»
12–13 июня	Киев, Украина, ИЭС им. Е. О. Патона	Международная конференция «Роботизация и автоматизация сварочных процессов»
25–30 июня	Шанхай, Китай	70-я ассамблея Международного института сварки
11–15 сентября	Одесса, Украина	8-я Международная конференция «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов»
25–29 сентября	Дюссельдорф, Германия	Международная эссенская выставка «Сварка и Резка-2017»
10–13 октября	Москва, Россия	17-я Международная выставка сварочных материалов, оборудования и технологий «Weldex/Россварка»
Ноябрь	Киев, Украина, ИЭС им. Е. О. Патона	12-я Международная научно-практическая конференция «Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы»
21–24 ноября	Киев, Украина	16-й Международный промышленный форум-2017

УДК 621.791.75.042

ПРОИЗВОДСТВО СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРЕДПРИЯТИЯМИ КОРПОРАЦИИ «ПЛАЗМАТЕК»

В. П. СЛОБОДЯНЮК

ПАО «ПлазмаТек». 21036, г. Винница, ул. Максимовича, 18. E-mail: info@plasmatec.com.ua

Изложена информация о ПАО «ПлазмаТек», ведущем производителе сварочных материалов в Украине и СНГ, истории и планах развития, выпускаемой продукции, а также о некоторых особенностях технологии ее изготовления. Библиогр. 4, рис. 9.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварочные материалы, покрытые электроды, производство сварочных материалов

В 2016 г. Публичному акционерному обществу «ПлазмаТек» исполнилось 15 лет. Свою деятельность ПАО «ПлазмаТек» начинало на базе предприятия сельскохозяйственного машиностроения «Агромаш» в пгт. Рудница Винницкой области, которое в небольшом количестве изготавливало сварочные электроды АНО-4 для ремонтных целей в своей отрасли. В течение последующих 15 лет в развитие предприятия вложены существенные инвестиции, проведена коренная техническая модернизация и реорганизация производства, увеличены объемы выпуска продукции (рис. 1, а, б).

Сейчас ПАО «ПлазмаТек» представляет собой современную многопрофильную компанию с годовым оборотом 50 млн. евро, численностью персонала 1340 человек (рис. 2). По объему продаж сварочных материалов корпорация вышла на веду-

щие позиции в СНГ. Дополнительно к электродному производству построен уникальный комплекс по изготовлению омедненной сварочной проволоки стоимостью 10 млн. евро. Он укомплектован шведским технологическим оборудованием с вакуумной плазменной очисткой катанки и рассчитан на изготовление 10 тыс. т проволоки в год (рис. 3). На базе обогатительной фабрики в Ровенской обл. создано и функционирует предприятие по производству сырья для изготовления сварочных электродов, таких как слюда-мусковит, полевой шпат, каолин и кварцевый песок. Предприятие оснащено уникальным технологическим оборудованием и необходимыми контрольно-аналитическими приборами. Рассчитанное, вначале, только на удовлетворение внутрифирменных нужд, оно в ходе дальнейшего

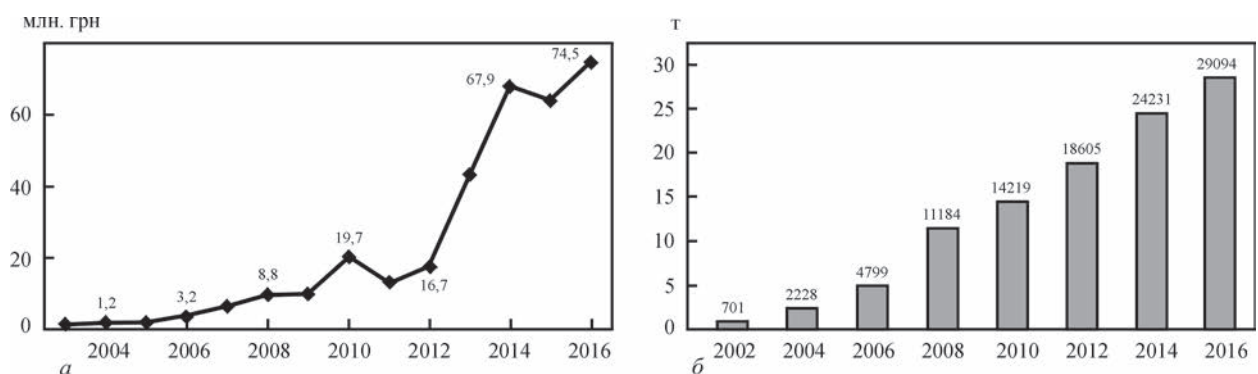


Рис. 1. Инвестиции в развитие корпорации (а) и объемы производства электродов (б) в 2003–2016 гг.



Рис. 2. Панорама производственных корпусов предприятия

© В. П. Слободянюк, 2017



Рис. 3. Новая технологическая линия для изготовления омедненной сварочной проволоки



Рис. 6. Линия изготовления электродов на прессе ПЭО 1000

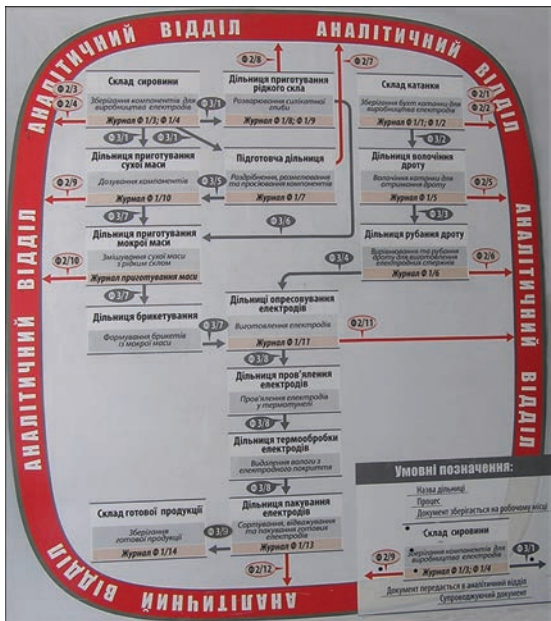


Рис. 4. Структура системы менеджмента качества по ДСТУ ISO 9001



Рис. 7. Рентгеновский спектрометр «Spectromax»



Рис. 5. Грузовой транспорт компании для доставки и оперативной связи с заказчиком продукции



Рис. 8. Разрывная машина Р5М и маятниковый копер 2010 КМ-30

развития переориентируется также на внешние продажи.

В настоящее время производственные мощности, функционирующие в Украине и Беларуси, рассчитаны на выпуск электродов объемом в 46 тыс. т в год. Они поставляются дилерам собственным транспортом из торгово-логистических центров, обслуживая заказчиков на территории стран, занимающих площадь в 21 млн. км². Сейчас ПАО «ПлазмаТек» экспортирует сварочные электроды

более чем в 20 стран на разных континентах. Доля компании «ПлазмаТек» на основных рынках составляет, %: 46 в Украине, 32 в Беларуси, 46 в Румынии, 41 в Молдове, 10 в РФ и т. д.

ПАО «ПлазмаТек», имеющее свои представительства в Европе, намерено в ближайшей перспективе открыть их в ОАЭ, США и Бразилии, а также создать заводы по производству электродов в Казахстане и Азербайджане, постепенно превращаясь в международную корпорацию.

В электродном производстве ПАО «ПлазмаТек» в течение 10 лет функционирует система ме-

неджмента качества, разработанная и сертифицированная в соответствии с положениями ДСТУ ISO 9001. Общая структура системы менеджмента качества приведена на рис. 4, а политика руководства ПАО в области качества — в Приложении.

С 2006 г. ПАО «ПлазмаТек» успешно производит и реализует под торговой маркой МОНОЛИТ, разработанные ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, рутил-целлюлозные электроды АНО-36 (тип Э46 РС по ГОСТ 9467–75). С 2007 г. началось их продвижение на рынок Европы как конкурента электродов ОК 46.00. Для допуска на европейский рынок электроды АНО-36 прошли аттестацию в Институте сварки в Гливице (Польша) на соответствие требованиям международного стандарта ISO 2560. В 2008 г. объем производства электродов АНО-36 превзошел уровень в 10 тыс. т (90 % от общего выпуска электродов предприятием на тот момент). В настоящее время наряду с ними выпускается примерно 8 % электродов с основным покрытием, около 2 % специальных электродов для сварки нержавеющей стали с рутил-основным покрытием, а также электроды для сварки чугуна и для наплавки. Все электроды по свойствам и уровню качества соответствуют требованиям европейских и международных стандартов.

В 2009 г. получено право маркировать электроды АНО-36, изготовленные ПАО «ПлазмаТек», знаком CE, подтверждающим их соответствие стандартам качества и безопасности Европейского союза. В том же году европейским Органом по сертификации TÜV Рейланд сертифицирована система менеджмента качества ПАО «ПлазмаТек» в соответствии с ISO 9001.

Технологическая схема производства электродов наряду с традиционными составляющими включает в себя необходимые в рыночных условиях дополнительные составляющие, такие как менеджмент ресурсов, включая процессы закупок сырья и материалов и взаимодействие с заказчиками, анализ рынка и обслуживание заказчиков продукции (рис. 5).

В настоящее время производство электродов оснащено необходимым технологическим, аналитическим, испытательным оборудованием и приборами, преимущественно отечественного изготовления. Их технические характеристики обеспечивают выпуск широкой номенклатуры марок и типоразмеров электродов, которые востребованы на рынке. Есть оборудование, которое в отечественных условиях не является традиционным. К примеру, для обеспечения качества электродов по разнотолщинности покрытия в технологическую цепочку изготовления стержней включены 4-х, 5-ти-, 6-ти и 8-кратные волочильные станы, работающие с катанки, и современные рубильные

станки AP-04 фирмы «Велма», а для просева порошковых материалов используются вибрационные сита Св-0,8 и Св-1,2.

Для сухого смешивания шихты и приготовления обмазочной массы используются интенсивные противоточные смесители моделей СГИ 060, СИ 10-1А и СИ 20 фирмы «Велма».

Электроды изготавливаются на шести технологических линиях:

- первая линия укомплектована электрообмазочным агрегатом АОЭ-4, модернизированным фирмой «Велма» с целью улучшения гидросистемы и прессовой головки, ее стержнеподающим станком, брикетировочным прессом и зачистной машиной;

- вторая и третья линии оснащены прессами ПЭО 2000 фирмы «Велма» со штатным вспомогательным оборудованием (брикетировочным прессом, стержнеподающим станком, зачистной машиной);

- четвертая линия укомплектована прессом ПЭО 1000 фирмы «Велма» в штатной комплектации; общий вид линии представлен на рис. 6;

- пятая линия оснащена электрообмазочным прессом модели ОБ 2775, изготовленным ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона;

- шестая линия укомплектована вертикальным прессом фирмы «Бруно Бернер» и предназначена для выпуска электродов специального назначения.

На всех линиях по производству электродов установлены приспособления для индивидуальной маркировки и нанесения специального покрытия для поджига дуги на торцы электродов, а также имеются электромагнитные и механические приборы для выборочного контроля разнотолщинности покрытия.

Термообработка электродов осуществляется в конвейерной трехпроходной печи, трех термотоннелях, а также в 7-ми электрических камерных печах с объемом рабочего пространства 5 м³, изготовленных Сарненским заводом мостовых конструкций.

Упаковка электродов пока производится вручную в картонные коробки массой 0,5; 1,0; 2,5 и 5,0 кг и дополнительно в термоусадочную пленку. Предназначенные для реализации через розничную торговлю электроды поставляются в специальной упаковке.

В настоящее время смонтированы и начинают эксплуатироваться две линии по упаковке электродов в тубусы собственного изготовления массой 1,0 и 2,5 кг, которые планируется автоматизировать. Ведутся работы по внедрению вакуумной упаковки электродов в фольгированную пленку.

Технологическая и испытательная лаборатории контролируют характеристики жидкого стекла и зерновой состав порошков электрод-

ных покрытий, химический состав проволоки и наплавленного металла, механические свойства и твердость металла шва и др. Для этого имеется полный комплект приборов и испытательных машин. В частности, ареометры, вискозиметр, рассеивающая машина, рентгеновский спектрометр «Spectromax» (Германия) (рис. 7), разрывная машина Р5М, маятниковый копер 2010 КМ-30 (рис. 8) и др.

Имеется мастерская по изготовлению образцов для испытания свойств металла шва. Измерительная производственная лаборатория ПАО «ПлазмаТек» аккредитована на проведение измерений в сфере компетенции Государственного метрологического надзора.

В течение многих лет ПАО «ПлазмаТек» тесно сотрудничает с ИЭС им. Е. О. Патона в отладке и модернизации технологии производства электродов АНО-36, в обучении персонала, создании системы менеджмента качества, соответствующей положениям стандарта ДСТУ ISO 9001, в испытании новых видов сырьевых материалов, в том числе и тех, производство которых осваивается на обогатительной фабрике, входящей в структуру ПАО «ПлазмаТек». На рис. 9. приведены оптические характеристики (в относительных единицах) отечественной и зарубежной слюды-мусковита. Сравнение структуры подтверждает возможность использования национального сырья в технологических целях.

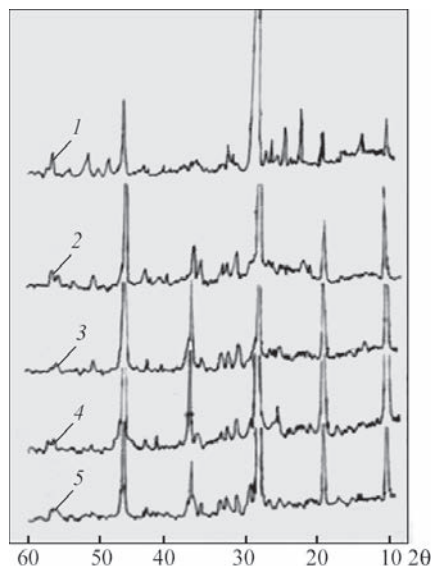


Рис. 9. Сравнение структуры образцов слюды-мусковит: 1–3 — опытные образцы; 4, 5 — пробы индийской и российской слюды марки СМЭ-315

ПАО «ПлазмаТек» является членом Международной Ассоциации «Электрод» и Товариства зварників України (ТЗУ). Результаты совместных работ публикуются в сварочных журналах, издаваемых ИЭС им. Е. О. Патона, а также в изданиях Ассоциации «Электрод» и ТЗУ [1–4].

Приложение

Політика у сфері якості

Компанія ПАТ «ПлазмаТек» є виробником зварювальних електродів та зварювального дроту. Частка продукції ПАТ «ПлазмаТек» займає більше 60 % українського ринку зварювальних електродів. Висока якість продукції дозволяє успішно здійснювати поставки продукції на експортні ринки. Використовуючи інноваційні технології та системний підхід, наша компанія забезпечує споживачів зварювальними матеріалами найвищої та стабільної якості. Основними споживачами продукції «ПлазмаТек» є: будівельні, нафто- і газодобувні галузі, металургійні, машинобудівельні, сільськогосподарські підприємства; приватний покупець.

Ми безперервно удосконалюємо якість обслуговування, намагаючись забезпечити кращий сервіс для наших клієнтів. Наша компанія налаштована на довгострокові, довірчі відносини з нашими клієнтами.

Головним пріоритетом компанії «ПлазмаТек» є задоволений споживач!

Стратегічні цілі у сфері якості спрямовані на:

- постійний контроль за вітчизняним ринком зварювальних матеріалів;
- освоєння закордонних ринків на підставі вивчення попиту та залучення нових клієнтів;
- підтримання постійного зв'язку з клієнтами для збереження ринків збуту;
- створення бережливого підприємства за допомогою зменшення втрат при виробництві продукції.

Політика у сфері якості реалізовується за рахунок:

- дотримання прийнятої системи управління якістю на підставі ISO 9001:2008 та безперервне її удосконалення;
- утримання старих та залучення нових перспективних клієнтів завдяки регіональним представництвам створеним в Україні, Молдові, Казахстані, Білорусії, Румунії;
- розширення географії збуту та освоєння нових ринків в країнах Закавказзя та Європи;
- систематичного аналізу вимог і очікувань споживачів та їх задоволеності нашою продукцією;
- вивчення потреб ринку для розроблення та удосконалення нових марок зварювальних матеріалів;
- забезпечення безперебійного та ефективного функціонування процесів завдяки плануванню та аналізу їх виконання;
- удосконалення системи контролю процесів для вчасного запобігання виникнення невідповідностей;
- створення схеми закупівель для придбання сировини потрібної якості, в потрібній кількості, за встановленою заздалегідь ціною, в потрібний час;
- створення високопрофесійного колективу завдяки можливості підвищення кваліфікації, саморозвитку та залучення перспективних молодих фахівців.

Вище керівництво ПАТ «ПлазмаТек» здійснює нагляд і несе особисту відповідальність за реалізацію Політики у сфері якості та забезпеченні компанії відповідними ресурсами для досягнення поставлених цілей.

1. Слободянюк В. П. Производство электродов ПАО «ПлазмаТек» / В. П. Слободянюк, Н. В. Скорина // Сборник докладов VI Международной конференции по сварочным материалам стран СНГ «Сварочные материалы. Разработка. Технология. Производство. Качество. Конкурентоспособность» (Краснодар, 6–9 июня 2011 г.). – Краснодар, 2011. – С. 116–123.
2. Слободянюк В. П. Производство электродов ПАО «ПлазмаТек» / В. П. Слободянюк, Н. В. Скорина // Сварщик. – 2011. – № 6. – С. 18–25.
3. ПАТ «ПлазмаТек» – 10 лет // Вісник Товариства зварників України. – 2011. – № 2. – С. 19.
4. Слободянюк В. П. Технологические свойства новых видов сырья для производства сварочных электродов / В. П. Слободянюк, Н. В. Скорина // Сборник докладов VII международной конференции по сварочным материалам стран СНГ «Сварочные материалы. Разработка. Технология. Производство. Качество. Конкурентоспособность» (Краснодар, 17–21 июня 2013 г.). – Краснодар, 2013. – С. 148–155.

В. П. Слободянюк

ПАТ «ПлазмаТек».

21036, м. Вінниця, вул. Максимовича, 18.

E-mail: info@plasmatec.com.ua

ВИРОБНИЦТВО ЗВАРЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ПІДПРИЄМСТВАМИ КОРПОРАЦІЇ «ПЛАЗМАТЕК»

Наведена інформація про ПАТ «ПлазмаТек», провідного виробника зварювальних матеріалів в Україні та СНД, історію та плани розвитку продукції, що випускається, а також про деякі особливості технології її виготовлення. Бібліогр. 4, рис. 9.

Ключові слова: дугове зварювання, зварювальні матеріали, покриті електроди, виробництво зварювальних матеріалів

Поступила в редакцію 16.12.2016

IX Международная специализированная выставка
КИЕВСКАЯ
ТЕХНИЧЕСКАЯ ЯРМАРКА



28–30
марта
2017 г.

Организатор:
Международный выставочный центр

 **+38 044 201-11-56, 201-11-58**
e-mail: is@iec-expo.com.ua
maria@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.mvc.ukr
www.tech-expo.com.ua

Технический партнер: 

МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР
Украина, Киев, Броварской пр-т, 15
 "Левобережная"

КОНТРОЛЬ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОШКОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРОИЗВОДСТВЕ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

З. А. СИДЛИН

ООО «ТЕХПРОМ». 107996, г. Москва, ул. Гиляровского, 57, РФ. E-mail: techprom-ru@yandex.ru

Описан производственный опыт по выработке требований к анализу гранулометрического состава материалов, применяемых в электродных покрытиях. Отмечена важность выбора метода анализа и применяемого оборудования. Сделан вывод о необходимости унификации методик анализа у изготовителей материалов и поставщиков порошков. Библиогр. 8, табл. 3.

Ключевые слова: дуговая сварка, покрытые электроды, производство электродов, сухая шихта, порошки, гранулометрический состав, контроль

Усиливающаяся конкуренция с ведущими мировыми продуцентами сварочных материалов предъявляет все возрастающие требования к стабильности технологического процесса их изготовления, что, в свою очередь, диктует рост требований к достоверности данных о характеристиках применяемых компонентов. Растут и требования к экспрессности получения данных. Сказанное, разумеется, относится и к гранулометрическому составу компонентов.

Известно, что гранулометрический состав компонентов сухой шихты — важнейший и часто определяющий фактор технологичности электродов при изготовлении и применении. Рациональные требования к нему должны учитывать способность рудоминеральных компонентов при их перемешивании с жидким стеклом обеспечивать получение обмазочных масс с необходимыми свойствами; химическую активность ряда металлов и ферросплавов в среде жидкого стекла; различия в крупности различных металлов и ферросплавов, предназначенных для легирования наплавленного металла и/или раскисления расплавленного металла [1]. При этом фирменные требования к гранулометрическому составу должны базироваться на достоверных фактических данных и учитывать специфические технологические особенности конкретного предприятия.

В отделе ИЭС им. Е. О. Патона, созданном и в течение многих лет возглавляемом докт. техн. наук И. К. Походней, выполнено множество исследовательских и практических работ, посвященных технологическим вопросам технологии производства сварочных материалов. Разумеется, не обойдены и проблемы, связанные с гранулометрией порошков, рассмотренные, в частности, в работе [2]. Однако в этих работах не освещались

методики анализа крупности материалов. До последнего времени производители сварочных материалов на территории бывшего Советского Союза осуществляли дробление, размол и подготовку компонентов электродных покрытий и порошковых проволок в собственных дробильно-размольных отделениях.

Переход к получению компонентов в виде готовых порошков требует не только четкой формулировки требований потребителя к их грануляции, но и унификации или согласования методик определения размеров частиц с поставщиком. Деликатность проблемы заключается в том, что гранулометрический состав часто является «ноу-хау» изготовителей сварочных материалов. В тех же случаях, когда в технической литературе приведены данные по крупности различных материалов, они представлены, как правило, в общем виде. Так, в работе [3] отмечено, что количество материала на ситах 045, 0355 и верхний предел грануляции минералов в «тазике» сито 005 (по ГОСТ 6613) является ориентировочным. В работе [4] указано, что ситовой анализ проводят, главным образом, при наладке режимов размола, а приводимые данные по гранулометрическому составу приблизительны. Иногда указания о требованиях к крупности подготовленных к применению компонентов можно встретить в отраслевой документации ограниченного пользования.

Отдельными электродными предприятиями накоплен значительный опыт и статистика, на основании которых выработаны требования по гранулометрическому составу различных материалов, используемых в качестве компонентов электродных покрытий. Наиболее известны из них данные Московского опытного сварочного завода (МОСЗ), являющиеся основой норм многих отечественных предприятий [1]. Особо отмечено, что

на каждом электродном предприятии требования к гранулометрическому составу необходимо конкретизировать с учетом специфики производства.

Уточним, что такая специфика, кроме учета номенклатуры выпускаемых электродов, их типоразмерного ряда, физической природы используемых компонентов и их номенклатуры, конструктивных особенностей и возможностей основного технологического оборудования, характеристик связующего и пр. должна учитывать и характеристики испытательного оборудования, используемого для определения гранулометрического состава. Ведь фактически точность ситового анализа определяется качеством фракционирования и точностью сит, а его достоверность — еще и качеством отбора проб и тщательностью проведения.

Данные МОСЗ справедливы при проведении ситового анализа на приборе модели 029 (основные технические характеристики: число колебаний сит 300 об/мин, число ударов ударника 180 уд/мин), где материал в полуавтоматическом режиме просеивают через систему вращающихся и встряхиваемых сит. Другой распространенный прибор модели 01412 — электромагнитный вибратор с частотой колебаний сит 50, с⁻¹, при амплитуде 0,1...1,0 мм. У вибростенда ПЭ 6700, используемого одним из поставщиков готовых порошков (табл. 1, С), число колебаний составляет 12...25 Гц при амплитуде 0,25...4,00 мм. Принцип действия прибора — придание возвратно-поступательных колебаний в вертикальной плоскости закрепленным на рабочем столе ситам.

Таблица 1. Результаты определения гранулометрического состава материалов с использованием различной аппаратуры. Остаток на ситах (в % от массы исходной пробы)

Номер п/п	Наименование материала, модель прибора	Индекс предприятия	Номера сит по ГОСТ 6613–86						
			0315	02	016	01	0063	005	-005
1	Ферробор, ПЭ6700	С	0	н.д.	н.д.	н.д.	91,5	7,6	0,9
	(029)	А	0,6	13,8	10,6	24,2	11,8	8,6	30,0
	(029)	В	0	22,44	0,57	28,27	15,93	7,36	24,58
	01412	А	0	22,16	8,53	23,40	15,52	7,70	22,68
2	Марганец металлический ПЭ6700	С	0	н.д.	н.д.	н.д.	84,5	11,7	3,8
	(029)	А	0	17,2	12,6	22,6	8,0	5,0	33,6
	(029)	В	0	17,09	0,95	29,31	16,76	9,09	27,22
	01412	А	0	14,53	8,78	26,18	14,30	12,1	24,16
3	Феррониобий, ПЭ6700	С	0	н.д.	н.д.	н.д.	78,2	9,9	11,89
	(029)	А	0	7,8	8,6	25,2	11,2	8,2	37,6
	(029)	В	0	9,38	0,68	28,92	20,22	12,10	28,69
	01412	А	0	8,78	6,11	25,78	19,31	13,64	25,59
4	Ферромарганец, ПЭ6700	С	0	н.д.	н.д.	н.д.	85,37	10,62	4,01
	(029)	А	0,2	11,6	10,4	22,0	9,6	9,2	37,0
	(029)	В	0	20,48	1,53	26,35	14,80	10,54	24,58
	01412	А	0	18,33	0,37	64,62	10,54	5,54	0,15
5	Ферросилиций, ПЭ6700	С	0	н.д.	н.д.	н.д.	81,4	13,4	5,2
	(029)	А	0	20,2	12,2	23,4	8,2	5,0	30,2
	(029)	В	0	22,34	0,36	28,22	15,56	6,78	25,97
	01412	А	0	20,02	8,43	23,33	14,59	8,49	24,38
6	Ферротитан, ПЭ6700	С	0	н.д.	н.д.	н.д.	75,38	14,97	9,65
	(029)	А	3,6	22,6	12,4	22,4	8,0	5,8	24,6
	(029)	В	2,69	21,63	7,45	20,74	16,63	8,20	22,46
	01412	А	1,42	20,06	8,09	23,72	16,42	10,88	19,45
7	Феррохром ПЭ6700	С	0	н.д.	н.д.	н.д.	81,85	13,49	4,66
	(029)	А	4,6	22,4	9,6	19,0	7,8	6,4	28,8
	(029)	В	2,75	21,40	6,07	17,22	14,15	8,13	29,1
	01412	А	1,12	21,98	6,59	19,73	12,92	10,75	25,82
8	Хром металлический ПЭ6700	С	0,06	н.д.	н.д.	н.д.	90,3	3,3	6,34
	(029)	А	1,3	23,6	13,6	26,8	8,4	5,2	20,2
	(029)	В	3,08	26,99	7,43	27,87	14,26	5,13	13,45
	01412	А	2,52	27,90	10,40	27,70	12,79	5,40	11,56

Примечание: н.д. — нет данных.

Таблица 2. Результаты ситового анализа порошков различных материалов

Номер п/п	Наименование материала	Индекс предприятия	Номера сит по ГОСТ 6613–86						
			0315	02	016	01	0063	005	-005
1	Феррониобий	A	-	26,50	5,58	28,47	14,57	6,64	20,13
		B	-	24,20	12,5	24,0	12,2	3,9	21,9
2	Феррохром	A	0,06	1,52	12,68	46,81	20,90	6,63	11,27
		B	-	0,6	13,7	55,7	15,1	3,5	11,1
3	Никель	A	0,08	0,55	0,95	90,75	4,55	1,24	1,82
		B	-	0,6	1,8	93,7	1,7	1,2	0

Неудивительно, что при контроле одних и тех же партий порошков различных материалов с использованием различной аппаратуры и результаты различны (табл. 1). При этом определения на приборах модели 029 проводили на двух разных предприятиях (табл. 1, А и В), получив сходные результаты. Разницу данных по ситу 016 в этом случае можно отнести на точность сеток, на чем остановимся ниже.

В табл. 1 приведены данные по контролю отечественных материалов, но аналогичные схожие результаты получены при контроле на приборе модели 029 на предприятиях А и В порошков шведской фирмы МРТ (табл. 2).

Уместно отметить, что в отраслевой технологической документации, да и в большинстве стандартов не указывают типы и модели приборов для ситового анализа. Более точное управление технологическими процессами в электродном производстве требует получение данных также о гранулометрическом составе той части порошков, которые имеют размеры менее 50 мкм, не определяемые обычными вибрационными методами. Объясняется это тем, что для частиц таких размеров силы адгезии и когезии сравнимы с их массой, резко возрастающая при дальнейшем уменьшении размеров. Это ведет к слипанию частиц, забиванию ячеек сит, препятствию рассеву и к получению недостоверных данных [5]. Расширяет возможности анализа гранулометрического состава порошков сухим методом способ электростатического рассева, реализованный, например, в отечественных приборах Элса-М и Гран [6].

Одним из наиболее совершенных является оборудование фирмы «Fritch» (ФРГ), надежно зарекомендовавшее себя в многолетней практике. Например, вибрационный грохот Analysett 3 с вер-

тикальным движением высококачественных аналитических сит обеспечивает измерение частиц в диапазоне от 63 мм до 20 мкм. Лазерные дифракционные измерители серии Analysett 22, использующие физический принцип флуктуации электромагнитных волн, обеспечивают возможность измерения частиц от 0,1 мкм, причем модель Analysett 22 NanoTek одновременно распознает и форму частиц. Программное обеспечение Авто-рассев позволяет проводить автоматическую обработку результатов, в том числе графическое изображение, расчет статистических величин, расчет значений, ведение банка данных [7]. К сожалению, до настоящего времени российские предприятия не располагают подобным оборудованием.

Металлические сетки, используемые для отсева материалов, поставляют по стандартам ГОСТ 2715 «Сетки металлические проволоочные. Типы, основные параметры и размеры» и ГОСТ 6613 «Сетки проволоочные тканые с квадратными ячейками». Для контроля гранулометрического состава в электродном производстве используют, в основном, сетки по ГОСТ 6613, изготавливаемые из цветных металлов и сплавов. Систематизация сеток для сварочного производства была проведена авторами работы [8].

В кратком виде сетки обозначаются номером, соответствующим размеру стороны ячейки в свету в мм. Сокращенную запись для ячеек менее 1,0 мм производят без запятой, отделяющей целую часть от дробной, и опускают нули после значащих цифр. Например, сетку с размером ячейки в свету 0,315 мм обозначают номером 0315, а сетку с размером ячейки в свету 0,100 мм — номером 01. Ранее в СССР, да и теперь в ряде стран номер сетки обозначал количество ячеек, приходящихся на 1 линейный дюйм (меш). В зависимости от но-

Таблица 3. Результаты ситового анализа порошков фирмы МРТ

Номер сетки	Номинальные стороны ячейки, мкм	Точность изготовления					
		Н		В		К	
		Максимальное отклонение от номинала, мкм	Доля, %	Максимальное отклонение от номинала, мкм	Доля, %	Максимальное отклонение от номинала, мкм (интервал)	Доля, %
005	50	34	≤ 8	25	≤ 5	13...23	≤ 5
01	100	60		40		19...34	
0315	315	151		79		40...67	
04	400	180		96		47...78	

мера сетки стандартом предусмотрен различный вид переплетения проволок основы и утка: полотняный – через одну проволоку и саржевый — переплетение через две проволоки:

Номер сетки	Вид и порядок переплетения
004...0063	Саржевое 2/2
0071...014	Саржевое 2/2 или полотняное 1/1
016...2,5	Полотняное 1/1

Сетки различают по точности изготовления: Н — нормальной, В — высокой, К — контрольной, отличающихся, в первую очередь, допусками по максимальному отклонению размера стороны ячейки от номинала. В качестве примера в табл. 3 приведены соответствующие данные для нескольких сеток, используемых в электродном производстве.

К сожалению, по данным проведенного нами опроса предприятий-изготовителей в стране выпускается только сетка нормальной точности изготовления, которую, практически, и применяют в ситах, используемых в установках, в том числе выпускаемых ОАО «Литмашприбор». Сказанное следует учитывать при рассмотрении результатов анализа. В то же время, так как в промышленных ситах используют также сетки нормальной точности, исключается необходимость корректировки гранулометрического состава по данным анализа для практического применения.

Единый подход к нормированию требований по гранулометрическому составу отсутствует даже в государственных стандартах на материалы электродных покрытий. Также в большинстве нормативной документации на материалы электродных покрытий, поставляемых в порошковом виде, недостаточно прописаны методики определения гранулометрического состава. Даже в отдельном стандарте, например ГОСТ 19724, охватывающем метод определения гранулометрического состава плавикового шпата, в том числе флотационного концентрата, указано лишь, что применяется механический встряхиватель и сетки по ГОСТ 6613. Анализ пылевидного кварца по ГОСТ 8077 должен проводиться мокрым способом с использованием аналогичных сеток; при анализе слюды по ГОСТ 14327 предписано (ГОСТ 19572) использование ситового механического анализатора с частотой не менее 280 колебаний в минуту и т. д.

Из изложенного выше вытекает необходимость унификации методик определения гранулометрического состава у предприятий-изготовителей сва-

рочных материалов и предприятий-изготовителей порошковых материалов, а также включение в договора на поставку порошковых материалов норм по гранулометрическому составу с согласованием методик приемо-сдаточных испытаний. Практическая реализация такого подхода при работе с основным отечественным поставщиком порошковых ферросплавов ООО «МЕЛДИС-ФЕРРО» позволила устранить встречавшиеся ранее недоразумения и обеспечить в дальнейшем стабильную и согласованную работу.

1. Сидлин З. А. Производство электродов для ручной дуговой сварки / З. А. Сидлин. — К.: Екотехнологія, 2009. — 464 с.
2. Марченко А. Е. Влияние зернового состава шихты на реологические характеристики и структуру напорного потока обмазочных масс для низководородных электродов / А. Е. Марченко // Автоматическая сварка. — 2014. — № 6-7. — С. 167–175.
3. Благовещенская В. В. Технология изготовления электродов для дуговой сварки / В. В. Благовещенская, Б. А. Гололобов, В. Я. Строгова. — М-Л.: Машиностроение, 1966. — 146 с.
4. Гарник И. И. Производство металлических электродов / И. И. Гарник, Г. М. Пиолунковский. — М.: Металлургия, 1975. — 119 с.
5. Коузов П. А. Основы анализа дисперсионного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П. А. Коузов. — Л.: Химия, 1974. — 280 с.
6. Перспективные приборы для определения гранулометрического состава порошкообразных материалов / Г. А. Старостин, В. М. Крашенинников, А. П. Стецовский [и др.] // Межотраслевой сборник «Научно-технические достижения», 1985. — № 2. — С. 72–77.
7. Проспекты фирмы «Fritch», ФРГ.
8. Гридин А. А. Систематизация сеток и рекомендации по набору сит для определения гранулометрического состава порошковых материалов в сварочном производстве / А. А. Гридин, Н. А. Тархов // Сварочное производство. — 1981. — № 10. — С. 25–28.

З. А. Сидлін

ТОВ «ТЕХПРОМ».

107996, м. Москва, вул. Гіляровського, 57, РФ.

E-mail: techprom-ru@yandex.ru

КОНТРОЛЬ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ПОРОШКІВ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ У ВИРОБНИЦТВІ ЗВАРЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Описано виробничий досвід по встановленню вимог до аналізу гранулометричного складу матеріалів, що застосовуються в електродних покриттях. Відзначено важливість вибору методу аналізу і обладнання, що застосовується. Зроблено висновок про необхідність уніфікації методик аналізу у виробників матеріалів і постачальників порошків. Бібліогр. 8, табл. 3.

Ключові слова: дугове зварювання, покриті електроди, виробництво електродів, суха шихта, порошки, гранулометричний склад, контроль

Поступила в редакцию 18.11.2016

ПОРОШКОВАЯ ПРОВОЛОКА ДЛЯ ИЗНОСОСТОЙКОЙ НАПЛАВКИ ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А. А. БАБИНЕЦ, И. А. РЯБЦЕВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Электродуговая наплавка износостойких слоев на листовые конструкции толщиной меньше 4 мм сопряжена с опасностью возникновения прожогов и излишней деформации листов вследствие их значительного проплавления. Одним из возможных путей уменьшения проплавления является выбор оптимального способа наплавки и разработка соответствующих технологий и наплавочных материалов. Экспериментальным путем установлено, что обеспечить минимальное проплавление с учетом качественного формирования наплавленного металла возможно при наплавке открытой дугой порошковой проволокой диаметром менее 1,6 мм. Применение разработанной технологии и техники наплавки и усовершенствованной самозащитной порошковой проволоки ПП-АН198 обеспечило качественное формирование наплавленного металла, отсутствие прожогов, пор и других дефектов, а также позволило свести к минимуму остаточные деформации при наплавке листов из стали Ст3 толщиной 3 мм. Полученные результаты могут быть использованы при выборе наплавочных материалов и технологий наплавки износостойких слоев на тонколистовые конструкции, которые эксплуатируются в горнодобывающей и металлургической промышленности в условиях различных видов абразивного изнашивания. Библиогр. 8, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: дуговая наплавка, порошковая проволока, тонколистовые конструкции, проплавление, деформации, наплавленный металл

Порошковые проволоки, вследствие своей универсальности, нашли широкое применение для механизированной и автоматизированной дуговой наплавки в различных отраслях промышленности. В первую очередь это объясняется достаточно простой адаптацией их химического состава к составу и свойствам наплавляемых деталей, высокой стабильностью горения дуги, относительно небольшим разбрызгиванием электродного металла и хорошим формированием наплавленных слоев [1–6].

Одним из перспективных направлений применения порошковых проволок является их использование для наплавки тонколистовых конструкций (толщина листов ≤ 4 мм), эксплуатирующихся в горнодобывающей и металлургической промышленности в условиях различных видов абразивного изнашивания.

Основные проблемы при наплавке тонколистовых конструкций заключаются в возможном появлении прожогов и значительных деформаций таких конструкций. Для решения этих проблем было предложено использовать наплавочные порошковые проволоки небольшого диаметра (1,2...1,6 мм) и минимально возможные режимы наплавки, при которых будет обеспечиваться стабильный процесс и качественное формирование наплавленных слоев [7].

Для проведения экспериментов в качестве прототипа была взята разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона порошковая проволока ПП-АН198 системы легирования Fe–C–Cr–Mn–Si.

Таким образом, целью данной работы была оптимизация состава шихты порошковой проволоки ПП-АН198 для получения требуемого состава наплавленного металла при минимальном диаметре проволоки и разработка техники и технологии наплавки, обеспечивающих хорошее формирование наплавленного слоя и отсутствие в нем дефектов типа прожогов, пор и так далее.

Известно, что способ наплавки (под флюсом, в среде защитных газов или открытой дугой) оказывает значительное влияние на величину проплавления и качество формирования наплавленного металла даже при наплавке на одинаковых режимах и использовании проволоки одной и той же марки и диаметра [8].

Исходя из этого, в первую очередь, было необходимо установить при каком способе наплавки можно получить минимальное проплавление основного металла при качественном формировании наплавленных валиков. Для проведения экспериментов было изготовлено шесть опытных партий порошковой проволоки ПП-АН198 диаметрами 1,6 и 1,8 мм для наплавки под флюсом, в защитном газе и открытой дугой. В предварительной серии экспериментов наплавка выполнялась на пластины из стали Ст3 в широком диапазоне режимов по току (150...300 А) и напряжению (20...28 В) при постоянной скорости наплавки 30 м/ч.

На рис. 1 приведены экспериментальные данные глубины проплавления основного металла для проволок диаметром 1,6 мм (сплошные линии) и диаметром 1,8 мм (штриховые линии) при наплавке тремя разными способами: под флюсом

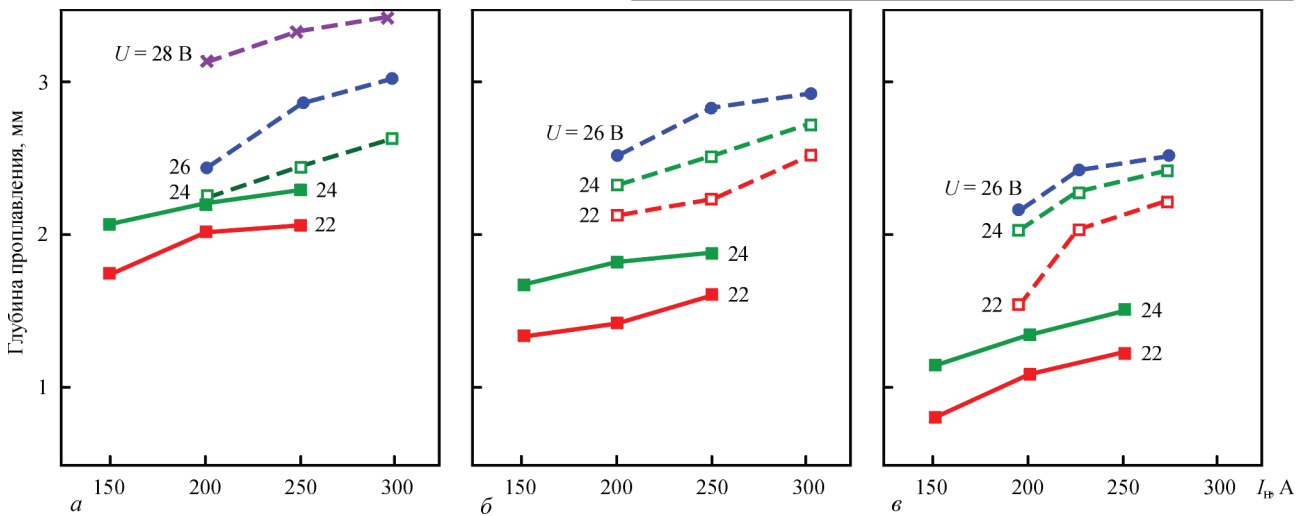


Рис. 1. Влияние тока на глубину проплавления при наплавке под флюсом (а), в защитных газах (б) и открытой дугой (в) (сплошные линии — проволока диаметром 1,6 мм; штриховые линии — проволока диаметром 1,8 мм)

(а), в среде защитных газов (б) и открытой дугой (в). Из рис. 1 видно, что с увеличением тока и напряжения также возрастает и глубина проплавления основного металла. При этом обеспечить минимальное проплавление, с учетом качественного формирования наплавленного металла, возможно при наплавке открытой дугой порошковой проволокой диаметром 1,6 мм. Исходя из полученных результатов, было решено продолжить работу именно с этим типом порошковой проволоки.

Для обеспечения надежной защиты сварочной ванны и получения качественного наплавленного металла при наплавке на минимально возможных режимах было необходимо произвести выбор газослакообразующей системы порошковой проволоки.

Для этой цели изготовили четыре опытных варианта самозащитных порошковых проволок ПП-АН198 диаметром 1,6 мм с различными системами газослакообразующих компонентов: $\text{CaO}+\text{TiO}_2+\text{MgO}+\text{CaF}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ (проволока с условным обозначением ПП-Оп-1); $\text{CaO}+\text{MgO}+\text{CaF}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ (ПП-Оп-2); $\text{CaO}+\text{CaF}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ (ПП-Оп-3) и $\text{CaO}+\text{CaF}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ (ПП-Оп-4).

В процессе наплавки указанными проволоками проводилась экспертная оценка сварочно-технологических свойств самозащитных порошковых проволок всех четырех типов (характер переноса

са металла, величина разбрызгивания, покрытие шлаком наплавленных валиков и так далее). Для этого использовалась следующая система оценок. Перенос характеризовался баллами: 1 — мелкокапельный; 2 — крупнокапельный; 3 — смешанный; разбрызгивание также оценивалось в баллах: 1 — малое; 2 — среднее; 3 — значительное; степень покрытия шлаком оценивалась в процентах; наличие пор характеризовалось двумя показателями: есть или нет; формирование наплавленного металла оценивали как хорошее, удовлетворительное или плохое.

Для оценки сварочно-технологических свойств выполняли наплавку образцов на одинаковом токе 160...180 А и скорости наплавки 30 м/ч. Так как решающее влияние на образование пор и качество формирования наплавленных валиков при наплавке порошковыми проволоками открытой дугой оказывает напряжение [4], то его изменяли от 20 В и выше до появления пор в наплавленном металле или до ухудшения качества формирования для каждого типа порошковой проволоки (таблица).

По результатам экспериментов было установлено, что из четырех порошковых проволок наилучшим комплексом сварочно-технологических свойств обладает самозащитная порошковая проволока ПП-АН198 (Оп-1), которая и применялась в дальнейшем для наплавки тонких листов.

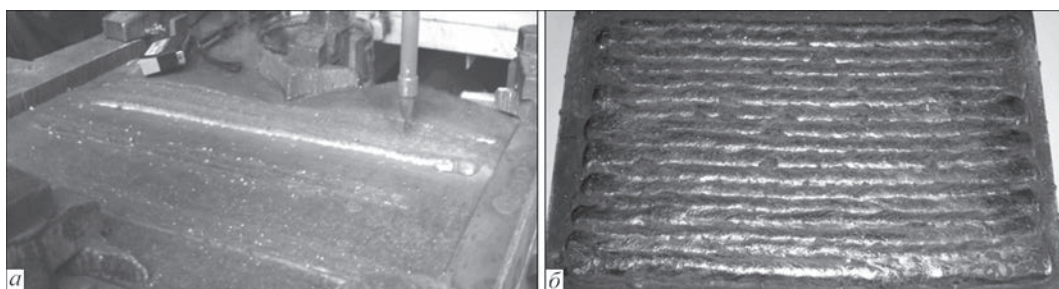


Рис. 2. Процесс наплавки стальной пластины толщиной 3 мм, закрепленной на водоохлаждаемом медном столе (а) и внешний вид наплавленной пластины (б)

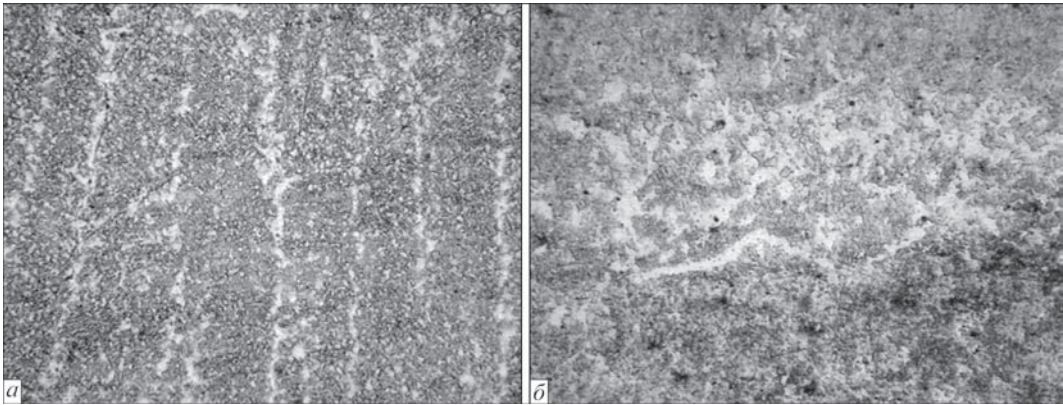


Рис. 3. Микроструктура (×250) металла, наплавленного самозащитной порошковой проволокой ПП-АН198 (а) и зоны его сплавления со сталью Ст3 (б)

Результаты оценки сварочно-технологических свойств опытных самозащитных порошковых проволок типа ПП-АН198

Условное обозначение проволоки	Напряжение, В	Вид переноса, баллы	Разбрызгивание, баллы	Покрытие шлаком, %	Поры	Качество формирования
ПП-АН198 (Оп-1)	20	2	1	100	нет	хорошее
	22	3	2	100	нет	хорошее
	24	3	2	100	есть	удовлетворительное
ПП-АН198 (Оп-2)	20	3	1	100	нет	удовлетворительное
	22	3	2	80	есть	плохое
ПП-АН198 (Оп-3)	20	3	1	100	нет	хорошее
	22	3	2	100	нет	удовлетворительное
	24	3	3	80	есть	удовлетворительное
ПП-АН198 (Оп-4)	20	2	1	90	нет	хорошее
	22	3	2	90	нет	удовлетворительное
	24	3	3	90	есть	плохое

Как указано выше, одна из основных проблем при наплавке листов толщиной < 4 мм заключается в возможности образования прожогов. Вероятность этого увеличивается в процессе наплавки вследствие роста температуры наплавляемого листа и его деформации, что приводит к увеличению зазора между листом и поверхностью наплавочного стола. Так как в работе использовались листы относительно небольшого размера (3×400×600 мм), для снижения их температуры и деформации применялось приспособление с охлаждаемым медным столом, на котором листы закреплялись при помощи прижимных планок (рис. 2, а).

Для проведения экспериментов по отработке технологии дуговой наплавки листов из стали Ст3 толщиной 3 мм была изготовлена порошковая проволока ПП-АН198 (Оп-1) диаметром 1,6 мм. При изготовлении порошковой проволоки в качестве оболочки использовалась лента из стали 08кп производства меткомбината «Запорожсталь». Лента имеет относительно невысокие показатели относительного удлинения (≈ 25 %), поэтому изготовить проволоку меньшего диаметра не удалось. Опыт показывает, что при использовании ленты импортного производства, у которой относительное удлинение находится на уровне 40 % можно

изготовить наплавочную порошковую проволоку диаметром 1,2...1,4 мм.

Наплавку листов из стали Ст3 толщиной 3 мм порошковой проволокой ПП-АН198 (Оп-1) диаметром 1,6 мм выполняли на следующих режимах: ток 160...180 А, напряжение 21...22 В; скорость наплавки 30 м/ч; перекрытие соседних валиков 50 %. На рис. 2, б приведен внешний вид листа, наплавленного по указанной технологии. Визуальным контролем было установлено, что на поверхности наплавленного листа прожоги, поры, трещины и другие дефекты отсутствуют.

Были проведены металлографические исследования образцов наплавленного металла и зоны его сплавления с основным металлом. Было установлено, что микроструктура верхнего слоя металла, наплавленного проволокой ПП-АН198, состоит из феррита, сосредоточенного по границам кристаллитов, и мартенситно-сорбитной смеси с небольшим количеством карбидов хрома, расположенных в теле кристаллитов (рис. 3, а). Ферритные оторочки по границам кристаллитов имеют ширину 10...20 мкм. Ширина кристаллитов составляет 40...75 мкм. Твердость верхнего наплавленного слоя HV1 – 2970...3090 МПа.

В структуре наплавленного металла вблизи границы сплавления с основным металлом ко-

личество ферритной составляющей несколько больше, чем возле поверхности, соответственно, его твердость ниже $HV1 - 1930 \dots 1980$ МПа. Вдоль линии сплавления основного металла с наплавленным образуется прерывистая ферритная полоска (рис. 3, б). Таким образом, металлографические исследования также подтвердили получение качественного соединения и отсутствие дефектов как в наплавленном металле, так и в зоне сплавления.

Выводы

1. Установлено, что для электродуговой наплавки тонколистовых конструкций ($\delta \leq 4$ мм) необходимо использовать самозащитные порошковые проволоки диаметром $\leq 1,6$ мм и минимальные режимы наплавки, обеспечивающие отсутствие прожогов и хорошее формирование наплавленных валиков.

2. Изготовлено приспособление и разработана техника и технология наплавки стальных листов толщиной 3 мм самозащитной порошковой проволокой ПП-АН198 диаметром 1,6 мм усовершенствованного состава. Применение данных технологий и наплавочных материалов позволяет получить тонкие биметаллические листы, в которых отсутствуют прожоги, поры и другие дефекты, а также сведены к минимуму остаточные деформации.

1. Походня И. К. Сварка порошковой проволокой / И. К. Походня, А. М. Суптель, В. Н. Шлепаков. – К.: Наукова думка, 1972. – 223 с.
2. Металлургия дуговой сварки, взаимодействие металла с газами / И. К. Походня, И. Р. Явдошин, А. П. Пальцевич [и др.]. – К.: Наукова думка, 1994. – 444 с.
3. Исследования и разработки ИЭС им. Е. О. Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой (Обзор) / И. К. Походня, В. Н. Шлепаков, С. Ю. Максимов [и др.] // Автоматическая сварка. – 2010. – № 12. – С. 34-42.
4. Юзвенко Ю. А. Наплавка порошковой проволокой / Ю. А. Юзвенко, Г. А. Кирилук. – М.: Машиностроение, 1973. – 45 с.

5. Рябцев И. А. Наплавка деталей машин и механизмов / И. А. Рябцев. – К.: Екотехнологія, 2004. – 160 с.
6. Кондратьев И. А. Порошковые проволоки для наплавки стальных валков горячей прокатки / И. А. Кондратьев, И. А. Рябцев // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6-7. – С. 99-100.
7. Влияние электрических параметров дуговой наплавки порошковой проволокой на стабильность процесса и проплавление основного металла / Ю. Н. Ланкин, И. А. Рябцев, В. Г. Соловьев [и др.] // Автоматическая сварка. – 2014. – № 9. – С. 27-32.
8. Влияние способов дуговой наплавки порошковой проволокой на проплавление основного металла и формирование наплавленного металла / А. А. Бабинец, И. А. Рябцев, А. И. Панфилов [и др.] // Автоматическая сварка. – 2016. – № 11. – С. 20-25.

А. А. Бабинец, И. О. Рябцев

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ПОРОШКОВИЙ ДРІТ ДЛЯ ЗНОСОСТІЙКОГО НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКОЛИСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Електродугове наплавлення зносостійких шарів на листові конструкції товщиною менше 4 мм пов'язане з небезпечкою виникнення пропалів та зайвої деформації листів внаслідок їх значного проплавлення. Одним з можливих шляхів зменшення проплавлення є вибір оптимального способу наплавлення і розробка відповідних технологій та наплавних матеріалів. Експериментальним шляхом встановлено, що забезпечити мінімальне проплавлення з урахуванням якісного формування наплавленого металу можливо при наплавленні відкритою дугою порошковим дротом діаметром менше ніж 1,6 мм. Застосування розробленої технології і техніки наплавлення та вдосконаленого самозахисного порошкового дроту ПП-АН198 забезпечило якісне формування наплавленого металу, відсутність пропалів, пор та інших дефектів, а також дозволило звести до мінімуму залишкові деформації при наплавленні листів із сталі Ст3 товщиною 3 мм. Отримані результати можуть бути використані в процесі вибору наплавлювальних матеріалів і технологій наплавлення зносостійких шарів на тонколистові конструкції, що експлуатуються в гірничодобувній та металургійній промисловості в умовах різних видів абразивного зношування. Бібліогр. 8, табл. 1, мал. 3.

Ключові слова: дугове наплавлення, порошковий дріт, тонколистові конструкції, проплавлення, деформації, наплавлений метал

Поступила в редакцію 23.11.2016



ЗАКАЖИТЕ ИНФОРМАЦИОННЫЙ БЮЛЛЕТЕНЬ!
Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас подписаться на бесплатное получение электронного информационного бюллетеня журнала «Автоматическая сварка».

Для подписки необходимо выслать по электронной почте письмо с темой «Информационный бюллетень/АС» на адрес редакции журнала: journal@paton.kiev.ua.

АДГЕЗИОННО-АКТИВНЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ ИЗНОСОСТОЙКИЕ НАПЛАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ КМХ И КМХС

А. М. КОСТИН¹, В. А. МАРТЫНЕНКО¹, А. Б. МАЛЫЙ², В. В. КВАСНИЦКИЙ³

¹Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова.

54025, г. Николаев, пр-т Героев Сталинграда, 9. E-mail: university@nuos.edu.ua

²ГП НПКГ «Зоря-Машпроект». 54018, г. Николаев, пр-т Богоявленский, 42-а. E-mail: office@zorya.com.ua

³НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, пр-т Победы, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

Разработаны новые адгезионно-активные износостойкие жаропрочные композиционные наплавочные материалы КМХ и КМХС, обеспечивающие существенное повышение износостойкости контактных поверхностей деталей горячего тракта газотурбинных двигателей. Установлено, что дополнительное введение карбида хрома в сплав на основе твердого раствора кобальта, легированного молибденом, хромом, бором и кремнием, способствует стабилизации его структуры и свойств с одновременным снижением температуры плавления композиции. Бор и кремний обеспечивают повышение адгезионной активности сплавов при нанесении на контактные поверхности и образуют равномерно распределенные термодинамически устойчивые высокодисперсные комплексные силициды и бориды. Испытания износостойкости показывают, что среднее значение интенсивности износа рабочих поверхностей, наплавленных новыми материалами КМХ и КМХС, в условиях работы при критических температурах в окислительной среде в 3...4 раза ниже, чем поверхностей, наплавленных известными промышленными сплавами. Высокие характеристики износостойкости и возможность работы в условиях действия критических температур позволили рекомендовать разработанные композиционные материалы и технологию их наплавки к промышленному применению. Библиогр. 10, табл. 3, рис. 1.

Ключевые слова: наплавка, адгезионно-активные износостойкие композиционные материалы, жаропрочные сплавы, структура, фазовый состав, интенсивность изнашивания

Одной из главных проблем судового машиностроения является повышение эффективности, надежности и ресурса газотурбинных двигателей (ГТД). Прежде всего, эти параметры определяются износом контактных поверхностей рабочих лопаток, которые эксплуатируются в экстремальных условиях при высоких рабочих нагрузках и температурах.

В настоящее время существует широкий выбор износостойких материалов для наплавки на контактные поверхности с расплавлением или без расплавления основного металла.

Основными критериями их технологичности являются: температура плавления и возможные способы нанесения на контактные поверхности жаропрочных сплавов. На практике перечисленные критерии могут иметь взаимоисключающее влияние, что существенно усложняет либо делает невозможным одновременный выбор оптимального состава сплава для наплавки и способа формирования износостойкого слоя, который мог бы удовлетворять специфическим требованиям конкретного производства [1].

Целью настоящей работы являлась разработка новых адгезионно-активных износостойких жаропрочных композиционных материалов, обеспечивающих существенное повышение ре-

сурса контактных поверхностей деталей горячего тракта ГТД.

Известно, что в судовом газотурбостроении для изготовления турбинных рабочих лопаток применяют жаростойкие никелевые сплавы типа ЧС88У-ВИ, ЧС70У-ВИ и др. Эти сплавы упрочняются дисперсными выделениями γ' -фазы $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$, имеющей склонность к коагуляции в процессе контактного взаимодействия при высоких температурах, что приводит к формированию благоприятных условий для увеличения износа, в том числе и за счет интенсификации процессов окисления поверхностного слоя, обедненного легирующими элементами. Эти сплавы относятся к материалам с неудовлетворительной технологической свариваемостью, поэтому температура их нагрева при нанесении износостойкого слоя на контактную поверхность не должна превышать 1220 ± 10 °С. В противном случае невозможно избежать резкого снижения прочности основного металла в результате деградации γ' -фазы и формирования трещин в месте наплавки [2]. В этой связи сплавы, применяемые для упрочнения контактных поверхностей, должны, при нанесении в виде расплава, иметь температуру плавления не выше 1220 ± 10 °С. При более высокой температуре плавления износостойкого материала его нанесение осуществляют пайкой, но

конструкция лопаток турбин не всегда позволяет применить этот эффективный метод.

Таким образом, износостойкие сплавы удобно разделить на две группы по температуре плавления: до и более 1220 ± 10 °C.

Крайне сложной проблемой является разработка сплавов, относящихся к первой группе, имеющих необходимый уровень износостойкости при рабочих температурах (до 900 °C) и способных выдержать кратковременный нагрев до температуры 1150 °C, которая близка к температуре растворения упрочняющей γ' -фазы в основном металле.

К сплавам первой группы относится композиция КБНХЛ-2, имеющая никель-кобальтовую матрицу с содержанием, мас. %: 35,5...36,5 никеля; 20,5...21,5 кобальта; 24,5...25,5 хрома; 11,5...12,5 карбида хрома; 2,5...3,5 бориды хрома и 2,9...3,1 бора [3]. Высокая относительная износостойкость сплава обеспечивается упрочнением никель-кобальтовой матрицы карбидами и бориды хрома. Недостатком сплава является его низкая температура плавления ($\sim 1070\text{--}1090$ °C), что не обеспечивает сплаву возможность выдерживать кратковременные термические нагрузки при температурах до 1150 °C.

Все другие известные сплавы можно отнести ко второй группе, что существенно затрудняет их использование при нанесении на контактную поверхность наплавкой. Например, известен сплав на основе кобальта ВЗК-р, имеющий в своем составе в качестве основных легирующих элементов, мас. %: 28,0...32,0 хрома; 7,0...11,0 вольфрама; 1,6...2,0 углерода и дополнительно легированный в небольшом количестве Si, Mn, Ni, B, Fe. Упрочнение сплава обеспечивается образованием карбидов вольфрама и хрома [4]. Температура стабильной эксплуатации этого сплава не превышает 600 °C.

Похожий химический состав имеет сплав на основе кобальта Stellite 12, имеющий в своем составе в качестве основных легирующих элементов, мас. %: 28,0...31,0 хрома; 7,2...9,2 вольфрама; 1,55...1,75 углерода и дополнительно Ni, Si, Fe, Mo. Упрочнение сплава происходит в результате образования карбидов вольфрама и хрома [5]. Температура эксплуатации этого сплава так же не превышает 600 °C.

Известен сплав на основе никеля Х30Н50Ю5Т2, содержащий, мас. %: 32,0...36,0 хрома; 5,0...6,0 алюминия; 1,4...2,1 титана; 1,2...1,6 углерода в качестве основных легирующих эле-

ментов и дополнительно в небольшом количестве бор и железо. Высокая относительная износостойкость этого сплава обеспечивается путем образования интерметаллидов $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ и комплексных карбидов хрома и титана. Такой механизм упрочнения является недостаточно эффективным ввиду нестабильности γ' -фазы в условиях действия значительных контактных нагрузок при повышенных температурах в окислительной среде. Это способствует увеличению интенсивности изнашивания сплава, что является его существенным недостатком.

В авиационной технике достаточно успешно применяют сплав на основе кобальта ХТН-61, содержащий, мас. %: 19,0...21,0 хрома; 15,0...16,0 ниобия; 2,7...3,3 вольфрама; 1,8...2,2 молибдена; 0,8...1,2 алюминия; 1,95...2,30 углерода, упрочненный дисперсными выделениями монокарбида ниобия и имеющий высокую износостойкость, превышающую износостойкость сплавов на основе никеля за счет стойкости упрочняющей фазы [6]. Существенным недостатком этого сплава является его низкая жаростойкость и потеря свойств при расплавлении (температура плавления 1340 ± 10 °C). Нанесение этого сплава на контактные поверхности возможно исключительно пайкой.

Похожий состав имеет сплав на основе кобальта ХТН-62, содержащий, мас. %: 5,0...25,0 хрома; 13,5...17,0 ниобия; 6,0...12,0 вольфрама; 2,0...3,5 алюминия; 2,0...5,0 железа; 1,6...1,9 углерода. Сплав обладает высокой жаростойкостью, однако относительно низкое содержание карбидной фазы (NbC) приводит к значительному снижению износостойкости сплава, что является существенным недостатком и не обеспечивает в полной мере всего необходимого комплекса свойств.

В основу разработки новых адгезионно-активных износостойких жаропрочных композиционных материалов поставлена задача обеспечения необходимого уровня их износостойкости при рабочих температурах (до 900 °C), способности выдерживать временные термические нагрузки в окислительной среде при температурах до 1150 °C и возможности нанесения в виде расплава на контактные поверхности при температурах их нагрева не выше 1220 ± 10 °C.

Совместно с ГП НПКГ «Зоря-Машпроект», разработаны новые износостойкие жаропрочные материалы КМХ и КМХС, которые соответствуют требованиям, приведенным в работах [7, 8].

Таблица 1. Свойства сплавов КМХ и КМХС

Марка сплава	Химический состав, мас. %							Температура плавления*, °C
	Co	Cr	Mo	Si	B	Ni	Cr_3C_2	
КМХ	Основа	17...18	27...28	2,8...3,2	0,8...1,2	-	-	1185
КМХС	Основа	17...18	27...28	2,8...3,2	0,8...1,2	2,8...3,2	1,9...2,1	1165

* Температура плавления определялась методом высокотемпературного дифференциального термического анализа.

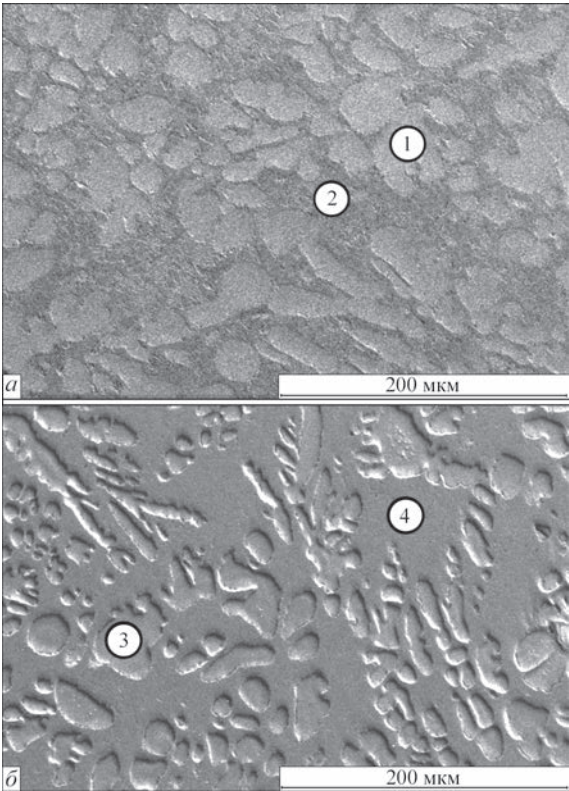
Химический состав и температура плавления сплавов КМХ и КМХС приведены в табл. 1.

Идеология конструирования новых материалов базируется на использовании в качестве матрицы легированного молибденом и хромом твердого раствора на основе кобальта, который хорошо выдерживает контактные и термические нагрузки до температур 1000 °С включительно, с дополнительным введением бора и кремния, которые снижают температуру плавления и повышают адгезионную активность сплавов до необходимого уровня во время нанесения на контактные поверхности в жидком состоянии. Кроме того, после кристаллизации бор и кремний активно формируют равномерно распределенную, термодинамически устойчивую, высокодисперсную упрочняющую фазу, которая состоит из комплексных силицидов и боридов, что обеспечивает необходимый высокий уровень износостойкости сплавов. Дозированные добавки карбидов хрома в сплав КМХС несколько снижают температуру плавления, по сравнению со сплавом КМХ, и стабилизируют его структуру и свойства.

Микроструктура сплавов, полученных вакуумно-индукционной плавкой в вакууме порядка 10^{-2} Па с последующим отжигом в течение 1 ч при температуре 1100 °С, показана на рисунке. Сплавы имеют регулярную двухфазную структуру, плотность и однородность которой повышаются при переходе от сплава КМХ к КМХС. Твердость сплава КМХ составляет порядка 710...715 ед. (HV10), а сплава КМХС — 735...740 ед. Средняя микротвердость (H_μ50) составляющих фаз для сплава КМХ соответствует 4771 МПа (зона 1, рисунок) и 2365 МПа (зона 2), а для сплава КМХС соответственно 6661 МПа (зона 3) и 3213 МПа (зона 4).

Рентгеноструктурный анализ образцов сплавов свидетельствует о том, что основу обоих сплавов составляет твердый раствор легированного стабильного кубического кобальта (β — модификация), который равномерно армирован дисперсными выделениями упрочняющих фаз: CoB, Mo₂B, MoSi, CoSi. Сплав КМХС, кроме этого, содержит карбиды хрома Cr₂C₆ (табл. 2). Все идентифицированные фазы имеют переменный стехиометрический состав и содержат в различном соотношении химические элементы — компоненты сплавов.

Сравнительные испытания износостойкости промышленных сплавов и новых композиционных материалов КМХ и КМХС осуществляли по известной методике [10] в условиях высокотемпературного фреттинга на газодинамическом стенде, позволяющем полностью воссоздать условия работы контактных поверхностей рабочих лопаток турбин в двигателе как по нагрузкам, уровням ускорений, скоростям нагрева и охлаждения, частоте вибраций,



Микроструктура сплавов КМХ (а) и КМХС (б)

так и по газовой среде. В качестве топлива использовали авиационный керосин ТС-1.

При испытаниях износостойкости исследуемых образцов определяли интенсивность изнашивания: $J_v = V/N$, где J_v — объемная интенсивность изнашивания, мм³/цикл; V — объем изношенно-

Таблица 2. Фазовый состав сплавов КМХ и КМХС

Марка сплаву	Межплоскостное расстояние (экспериментальные данные), d_{hkl}	Межплоскостное расстояние (литературные данные), d_{hkl}	Фаза [9]
КМХ	2,046	2,040	Co
	1,775	1,770	Co
	0,219	0,219	CoB
	0,185	0,183	CoB
	0,237	0,237	Mo ₂ B
	0,220	0,219	Mo ₂ B
КМХС	0,237	0,237	MoSi
	0,219	0,220	MoSi
	0,198	0,197	CoSi
	0,181	0,183	CoSi
	0,238	0,237	Cr ₂ C ₆
	0,218	0,219	Cr ₂ C ₆

Таблица 3. Результаты испытаний износостойкости наплавленных образцов

Испытываемый материал	X30H50Ю5T2	ВЗК-р	КБНХЛ-2	КМХ	КМХС
\min/\max среднее	7,718/14,408 10,126	разрушился	разрушился	1,817/3,750 2,761	1,548/2,894 2,372
Интенсивность изнашивания, J_v , мм ³ /цикл	(на базе испытаний 40 мин)			(на базе испытаний 2 ч)	(на базе испытаний 2 ч)

го материала, мм³; N — количество циклов нагружения (производная от частоты колебаний образцов). Остальные параметры соответствовали следующим условиям: статическая контактная нагрузка — 50 МПа; амплитуда относительного перемещения образцов — 0,169 мм; частота колебаний — 2500 мин⁻¹; время испытаний — 2 ч; температура в области контакта исследуемых образцов ~ 1150 °С.

Исследуемые образцы из жаропрочного никелевого сплава ЧС88У-ВИ с размерами полок 22×12×2 мм наплавливали слоем износостойкого материала толщиной 2 мм с последующим отжигом при температуре 1100 °С в вакууме 10⁻² Па на протяжении одного часа для снятия напряжений. Все наплавочные материалы использовали в виде прутков сечением 2×2 мм. Промышленные наплавочные материалы X30H50Ю5T2 и ВЗК-р наплавливали аргонодуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона (код сварки 141), при этом микротрещины в переходной зоне от основного к наплавленному металлу условно не считали недопустимыми дефектами. Наплавку стеллитом КБНХЛ-2 и новыми адгезионно-активными наплавочными материалами КМХ и КМХС выполняли ацетилено-кислородным пламенем нормальной регулировки горелкой ГС-2, наконечник № 2 (код сварки 311). Поверхность под наплавку и наплавочные прутки флюсовали раствором флюса ПВ200 в спирте (соотношение 1:7). После наплавки образцы очищали от остатков флюса гальваническим способом, механически обрабатывали и проводили неразрушающий контроль люминесцентным методом. Испытания на износ выполняли на парах идентичных образцов с площадью взаимного контакта около 50 % (12...14 мм²). Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Анализ результатов испытаний показал, что в условиях нагрева до температуры ~1150 °С промышленные износостойкие жаропрочные сплавы ВЗК-р и КБНХЛ-2 не выдерживают контактные нагрузки и полностью разрушаются. Образцы, наплавленные промышленным износостойким жаропрочным сплавом X30H50Ю5T2, могут лишь ограниченное время работать в таких условиях ввиду интенсивного износа. Разработанные новые адгезионно-активные материалы КМХ и КМХС демонстрируют значительно более высокую износостойкость, при этом среднее значение интенсивности их износа на базе испытаний два часа в 3...4

раза ниже, чем поверхностей, наплавленных промышленным сплавом X30H50Ю5T2 на базе испытаний сорок минут. Дозированные добавки карбидов хрома (в количестве около 2 мас. %) в сплав КМХС одновременно со снижением температуры плавления сплава (на ~20 °С) приводят к повышению его износостойкости по сравнению со сплавом КМХ на 15...20 %. Высокие характеристики износостойкости и возможность работы в условиях действия критических температур позволили рекомендовать разработанные композиционные материалы и технологию их наплавки на бандажные полки лопаток судовых газотурбинных двигателей к промышленному применению на ГП НПКГ «Зоря-Машпроект».

Выводы

1. В условиях нагрева до критических температур промышленные износостойкие жаропрочные сплавы, используемые в судовом машиностроении, такие как ВЗК-р, КБНХЛ-2, X30H50Ю5T2, не выдерживают контактные нагрузки и разрушаются.

2. Предложенные новые адгезионно-активные композиционные материалы КМХ и КМХС не только способны выдерживать критические температуры до 1150 °С, но и демонстрируют при этом высокие показатели износостойкости, удовлетворяющие эксплуатационным требованиям и требованиям к восстановительному ремонту современных судовых ГТД.

1. Костин А. М. Материалы для упрочнения лопаток газовых турбин / А. М. Костин, А. Ю. Бутенко, В. В. Квасницкий // Автоматическая сварка. — 2014. — № 6-7 (733). — С. 136–138.
2. Костин А. М. Анализ материалов для упрочнения бандажных полок лопаток турбин (Обзор) / А. М. Костин, А. Ю. Бутенко, А. Б. Малый // Вестник НУК. — 2012. — № 5. — С. 137–141 (<http://ev.nuos.edu.ua/ru/material?publicationId=19317>)
3. Алтухов А. А. Применение жаростойкого материала КБНХЛ-2 для наплавки деталей газовых турбин / А. А. Алтухов, О. В. Гаврилов // Сварщик. — 2004. — № 2. — С. 22–23.
4. Пейчев Г. И. Сравнительные характеристики износостойких сплавов для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток газотурбинных двигателей / Г. И. Пейчев, В. Е. Замковой, Н. В. Андрейченко // Вестник двигателестроения. — 2009. — № 2. — С. 123–125.
5. Сом А. И. Плазменно-порошковая наплавка стеллитом фиксаторов труб / А. И. Сом, В. Ю. Ищенко, А. Б. Малый // Сварщик. — 2004. — № 2. — С. 18–19.
6. Структура и свойства износостойкого сплава на основе кобальта с карбидом ниобия / Г. П. Дмитриева, Т. С. Че-

- репова, Т. А. Косорукова [и др.] // Металлофизика и новейшие технологии. – 2015. – т. 37, № 7. – С. 973–986.
7. Пат. № 107286 Украина, МПК C22C 19/07, C22F 1/10. Зносостійкий жароміцний композиційний сплав на основі кобальту / О. М. Костін, В. О. Мартиненко, О. Б. Малий, А. Ю. Бутенко; заявник та патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № у 2015 12664; заявл. 21.12.2015; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.
 8. Пат. № 111213 Украина, МПК C22C 19/07, C22C 29/00. Жароміцний зносостійкий композиційний сплав на основі кобальту / О. М. Костін, В. О. Мартиненко, О. Б. Малий, А. Ю. Бутенко; заявник та патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № у 2016 02906; заявл. 22.03.2016; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 21.
 9. Миркин Л. И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов. Справочник / Л. И. Миркин. – М.: Машиностроение, 1979. – 134 с.
 10. Іщенко Л. Й. Метод трибологічних випробувань за умов циклічного силового і температурного навантаження / Л. Й. Іщенко, А. Г. Андрієнко // Металознавство та обробка металів. – 1996. – № 3. – С. 62–65.

О. М. Костін¹, В. О. Мартиненко¹, О. Б. Малий²,
В. В. Квасницький³

¹Національний університет
кораблебудування ім. адмірала Макарова.
54025, м. Миколаїв, пр-т Героїв Сталінграду, 9.
E-mail: university@nuos.edu.ua
²ДП НВКГ «Зоря-Машпроект».
54018, м. Миколаїв, пр-т Богоявленський, 42-а.
E-mail: office@zorya.com.ua

³НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».
03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37. E-mail: kvas69@ukr.net

АДГЕЗИЙНО-АКТИВНИ ЖАРОМІЦНІ ЗНОСОСТІЙКІ МАТЕРІАЛИ КМХ ТА КМХС ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ

Розроблено нові адгезійно-активні зносостійкі жароміцні композиційні матеріали КМХ і КМХС для наплавлення, що забезпечують істотне підвищення зносостійкості контактних поверхонь деталей гарячого тракту газотурбінних двигунів. Встановлено, що додаткове введення карбиду хрому в сплав на основі твердого розчину кобальту, легованого молібденом, хромом, бором і кремнієм сприяє стабілізації його структури і властивостей з одночасним зниженням температури плавлення композиції. Бор і кремній забезпечують підвищення адгезійної активності сплавів при нанесенні на контактні поверхні і утворюють рівномірно розподілені термодинамічно стійкі високодисперсні комплексні силіциди та бориди. Випробування зносостійкості доводять, що середнє значення інтенсивності зносу робочих поверхонь, наплавлених новими матеріалами КМХ і КМХС, в умовах роботи при критичних температурах в окислювальному середовищі у 3...4 рази нижче, ніж поверхонь, наплавлених відомими промисловими сплавами. Високі характеристики зносостійкості і можливість роботи в умовах дії критичних температур дозволили рекомендувати розроблені композиційні матеріали і технологію їх наплавлення до промислового застосування. Бібліогр. 10, табл. 3, рис. 1.

Ключові слова: наплавка, адгезійно-активні зносостійкі композиційні матеріали, жароміцні сплави, структура, фазовий склад, інтенсивність зношування

Поступила в редакцію 09.12.2016

Компания «Витаполис» — новый национальный производитель на рынке сварочных материалов

Первого декабря 2016 г. производственную площадку завода компании ООО «Витаполис» в г. Боярка (Киевская обл.) посетила делегация Института электросварки им. Е. О. Патона в составе зам. директора, акад. Лобанова Л. М., акад. Григоренко Г. М., член-корр. Ахонина С. В. Делегацию принимали технический директор Алимов А. Н. и коммерческий директор Водопьянов А. В.

Гостям были продемонстрированы производственные возможности компании «Витаполис» в части производства сварочных проволок специального назначения диаметром 0,8...4,0 мм из перлитных, ферритных, мартенситных и аустенитных сталей. Все проволоки производятся с прецизионной намоткой на каркасные катушки после специальной обработки поверхности до и после волочения, разработанной специалистами предприятия. В составе завода работает лаборатория контроля качества производства и готовой продукции, аккредитованная НААУ с 7 ноября 2016 года.

После ознакомления с производственными возможностями компании «Витаполис», обсуждались направления сотрудничества с ИЭС им. Е. О. Патона в разработке и запуске производства сварочных материалов специального назначения для решения широкого круга производственно-технических задач промышленности Украины в авиационной, ракетно-космической и военной технике, а также энергетике и машиностроении. Стороны договорились о долгосрочном сотрудничестве в области производства сварочных проволок и других сварочных материалов.

А. Н. Алимов,
технический директор ООО «Витаполис»



СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ РЫНКА СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ В УКРАИНЕ

С. В. ПУСТОВОЙТ, Н. В. СКОРИНА, В. С. ПЕТРУК

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Сварка как основная технология соединения материалов является неотъемлемой составляющей промышленного сектора экономики, интегрированной в производственный процесс базовых отраслей промышленности. В статье представлена систематизированная экономико-статистическая информация о состоянии и развитии рынка сварочных электродов в Украине, показатели объемов их производства и экспортно-импортных операций. Мощности украинских предприятий-производителей позволяют как удовлетворять спрос на внутреннем рынке на сварочные электроды, так и поставлять свою продукцию на внешний рынок. Библиогр. 12, табл. 3, рис. 11.

Ключевые слова: сварка, сварочное производство, сварочные электроды, технологии, состояние рынка, перспективы

Процессы глобализации в мире и их влияние на внутренние рынки обуславливают необходимость проведения исследований рынка сварочной техники в Украине для выявления перспективных направлений развития сварочного производства в связи с его высокой значимостью в национальной экономике, поскольку сварка как способ получения неразъемных соединений металлов и неметаллов является базовой технологией во многих отраслях промышленности и строительстве.

Экономико-статистический анализ состояния мирового и региональных рынков сварочной техники в Украине и перспектив его развития приведен в работах [1–7]. Эти исследования позволяют найти оптимальные пути успешного функционирования украинских производителей для обеспечения спроса на их продукцию в условиях жесткой конкуренции не только на внешних рынках, но и на внутреннем. Чтобы обеспечить устойчивое функционирование украинских производителей сварочных материалов в этих условиях, необходимо оперативно реагировать на постоянно изменяющиеся требования потребителей за счет совершенствования уже выпускаемой продукции, востребованной на рынке, и создания новой [8, 9].

Важным элементом при планировании деятельности предприятия является оценка конкурентоспособности производимых сварочных материалов в каждой области их применения [10].

Выпуск сварочных материалов является ведущей составляющей сварочного производства в Украине. Мощности украинских предприятий-производителей сварочных материалов, в т.ч. и сварочных электродов, способны удовлетворить потребности как внутреннего рынка, так и осуществлять поставки своей продукции на внешние рынки [11]. Этому способствует наличие сырьевой базы для выпуска сварочных электродов общего назначения, используемых для сварки углеродистой и низколегированной сталей (марок АНО-4, АНО-21, МР-3 с рутиловым покрытием, а также электродов с основным покрытием типа УОНИ-13). Это обусловлено тем, что их продукция была востребованной на многих предприятиях машиностроительного комплекса, в строительстве и других сферах производства (рис. 1). Потребности в специальных марках электродов для сварки в энергетике, трубопроводов, высоколегированных сталей, цветных металлов, чугуна и

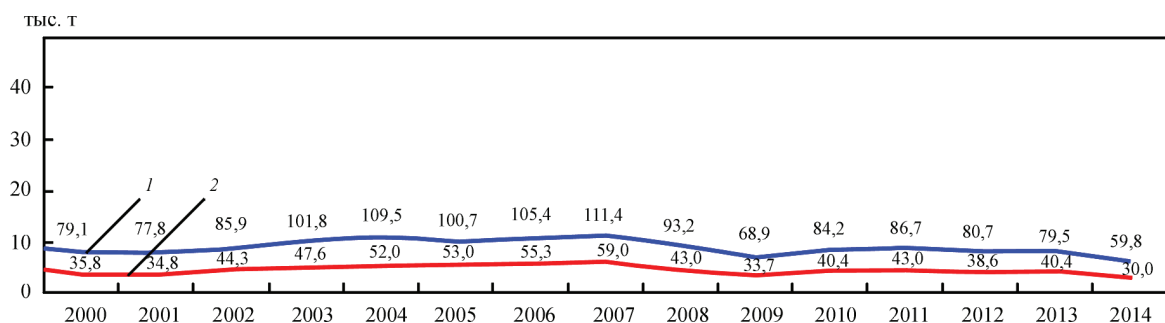


Рис. 1. Динамика производства сварочных материалов и электродов; 1 — объем производства СМ, 2 — объем производства электродов; 1990 г. — 429,9 (СМ), 162,4 (сварочные электроды); 1995 г. — 93,4 и 54,2 соответственно

© С. В. Пустовойт, Н. В. Скорина, В. С. Петрук, 2017

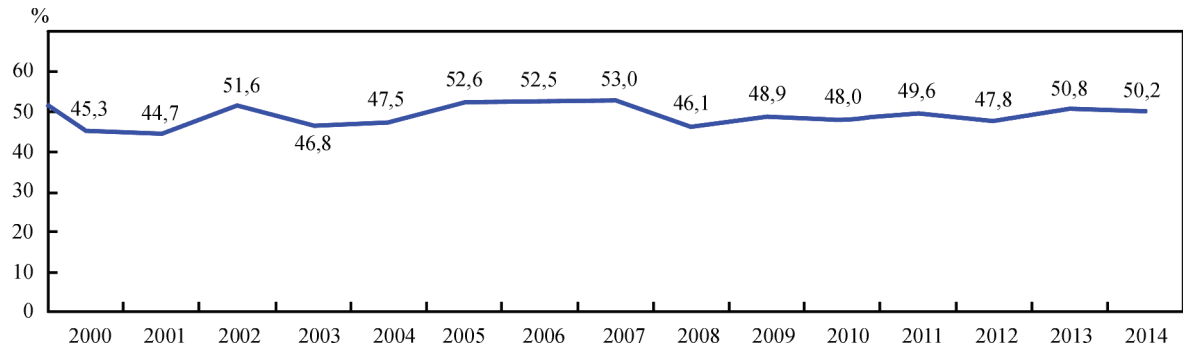


Рис. 2. Доля сварочных электродов в общем объеме производства сварочных материалов; 1990 — 37,88, 1995 — 58 %

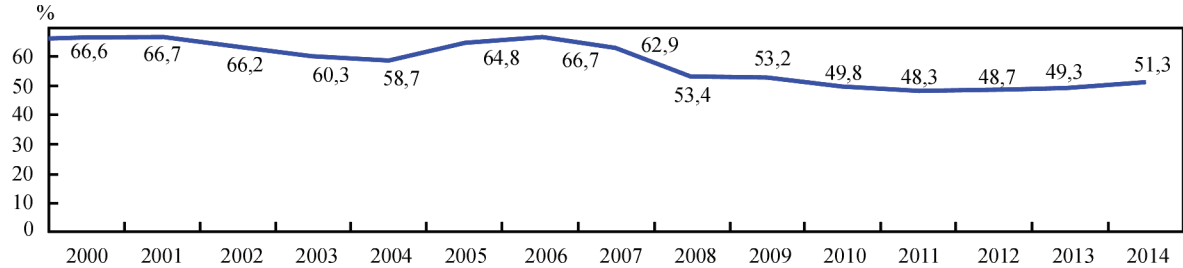


Рис. 3. Доля РДС (по наплавленному металлу); 1990 — 41,98; 1995 — 65,1 %

для наплавочных работ во времена СССР удовлетворялись, в основном, поставками из России.

Длительный экономический кризис в странах СНГ привел к значительному сокращению объемов производства сварочных материалов, в том числе и сварочных электродов. С 1995 г. объем производства сварочных материалов и электродов стабилизировался в новом диапазоне. В годы роста промышленного производства в Украине и странах СНГ (основных рынках сбыта) выпуск сварочных материалов и сварочных электродов

увеличивался. В годы экономического и финансового кризиса как в Украине, так и в мире наблюдался спад производства сварочных материалов и электродов. Такое почти синхронное изменение объемов производства вызвано тем, что удельный вес сварочных электродов в структуре выпуска сварочных материалов занимает основную часть (рис. 2).

Увеличение доли выпуска сварочных электродов вызвано увеличением объемов работ, выполняемых с помощью ручной дуговой сварки

Т а б л и ц а 1. Доля основных отраслей в общем объеме промышленного производства, %

Отрасль	1990	1995	2000	2005	2008	2010	2012	2013	2014	2015
Энергетика	3,2	11,0	15,2	15,9	17,8	21,3	24,5	24,6	24,6	21,9
Горно-металлургический комплекс	12,1	23,4	29,8	30,4	31,4	28,9	26,5	26,1	27,4	29,6
Машиностроение	30,5	16,0	13,4	12,7	13,3	10,9	10,2	10,0	7,2	6,4
Легкая промышленность	10,8	2,8	1,7	1,1	0,9	0,8	0,7	0,7	0,8	0,9
Пищевая промышленность	18,6	15,1	17,7	16,3	15,2	18,1	18,2	18,5	21,2	21,8

Т а б л и ц а 2. Выпуск некоторых видов промышленной продукции

Вид продукции	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Готовый прокат, млн. т	38,6	16,6	22,6	32,2	29,2	31,0	29,3	29,1	23,8	21,3
Стальные трубы, млн. т	6,5	1,6	1,7	2,4	2,0	2,4	2,3	1,8	1,6	1,0
Металлорежущие станки, тыс. шт.	37,0	6,0	1,3	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,07	0,04
Кузнечно-прессовое оборудование, тыс. шт.	10,9	1,4	0,4	0,1	0,05	0,022	0,051	0,011	0,007	0,008
Сварочное оборудование, тыс. шт.	49,6	18,3	16,2	25,4	16,9	18,1	22,8	18,2	13,0	-
Экскаваторы, тыс. шт.	11,2	2,3	0,2	0,6	0,11	0,12	0,08	0,05	-	0,03
Тракторы, тыс. шт.	106,0	10,4	4,0	5,5	5,2	6,4	5,3	4,3	4,1	4,2
Автомобили, автобусы, тыс. шт.	196,0	67,4	31,9	196,6	82,9	104,4	73,3	50,4	26,8	-
Сборный железобетон, млн. м³	23,3	5,6	2,0	3,2	1,9	2,3	2,1	2,0	1,9	1,7

Таблица 3. Структура способов дуговой сварки, % (по наплавленному металлу)

Страна	Способ сварки	1965	1975	1985	1995	2000	2005	2012	2015
Западная Европа	РДС	74	58	34	18	15	12	8,9	10
	CO ₂		31	56	70	71	75	63,9	56
	ПП		2	3	6	6,5	6,5	19,1	22
	АФ		9	7	6	7,5	6,5	8,1	13
США	РДС	71	53	42	25	19,5	15	10,3	11
	CO ₂		25	38	54	54	58,5	61,4	56
	ПП		13	13	19	19	19,5	22,1	23
	АФ		9	7	7	7,5	7	6,2	10
Япония	РДС	85	67	44	22	14	12	7,3	8,8
	CO ₂		20	39	52	54	54,5	49,5	45,9
	ПП		1	11	25	25	27	35,9	35,1
	АФ		9	10	7	7	6,5	7,3	10,2
Украина	РДС	63	52,4	44,9	65,1	66,6	64,8	48,9	50,3
	CO ₂		9,5	23,7	35	26,5	23,3	32,5	31,5
	ПП		0,5	3,2	0,9	0,5	3,2	1,4	1,3
	АФ		27	20,7	16,7	7,5	15,9	17,2	16,9

Примечание: РДС — ручная дуговая сварка, CO₂ — сварка в среде защитного газа, ПП — сварка порошковой проволокой, АФ — автоматическая сварка под флюсом.

(рис. 3) в связи с изменением структуры промышленного производства (табл. 1) — сокращением доли машиностроения (до 6,4 %), вследствие сокращения выпуска основных видов промышленной продукции (табл. 2), при изготовлении которой широко используется автоматическая и механизированная сварка. По мере стабилизации экономических процессов в стране и росте промышленного производства доля ручной дуговой сварки по наплавленному металлу несколько снижается, но по сравнению с экономически развитыми странами остается высокой (табл. 3 и рис. 4).

Данные, приведенные на рис. 4, свидетельствуют, что доля ручной дуговой сварки в Украине, составлявшая в 1965 г. 64 %, была ниже, чем в экономически развитых странах (80...90 %). К 1990 г. она была на уровне 42 %, что сопоставимо с показателями США и Японии. В последующие годы в связи с причинами, указанными выше, доля ручной дуговой сварки в Украине существенно увеличилась. Широкое использование РДС отразилось и на объеме рынка сварочных электродов — увеличил-

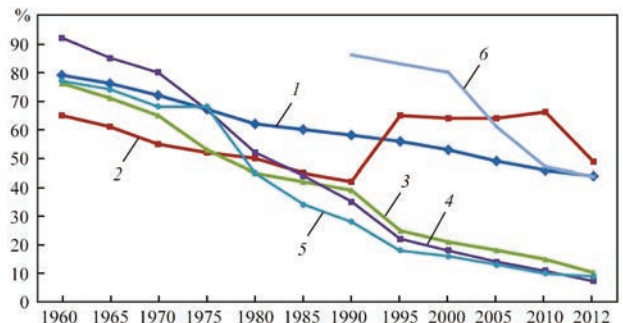


Рис. 4. Доля ручной дуговой сварки в странах мира (% по наплавленному металлу): 1 — РФ, 2 — Украина, 3 — США, 4 — Япония, 5 — Западная Европа, 6 — Китай

ся объем их производства и потребления в Украине (см. рис. 2 и 3).

На рис. 5 представлена динамика производства, экспорта, импорта и видимого потребления сварочных электродов на внутреннем рынке. Основные потребности в электродах предприятий машиностроения и строительства удовлетворяются их производством украинскими предприятиями. Сейчас в Украине реально действуют 14 пред-

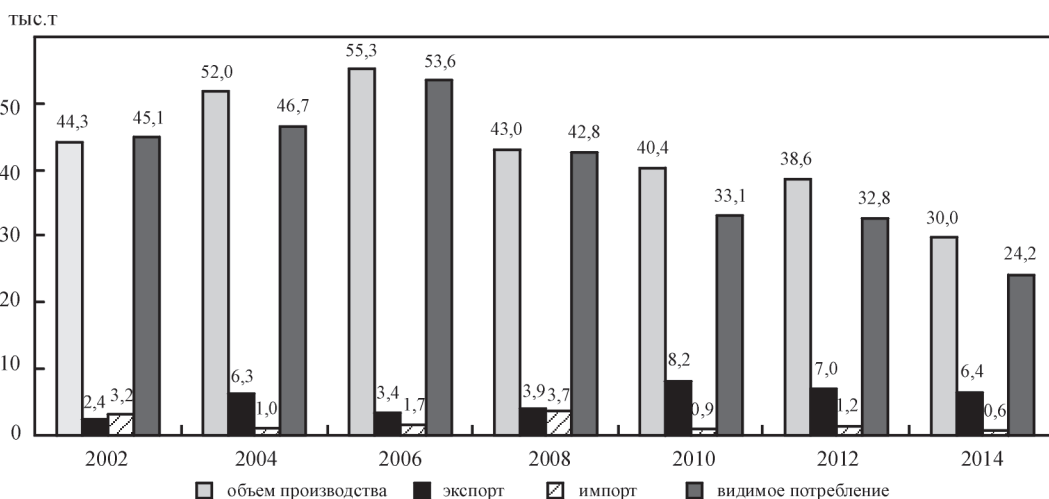


Рис. 5. Объем внутреннего потребления электродов в Украине, тыс. т

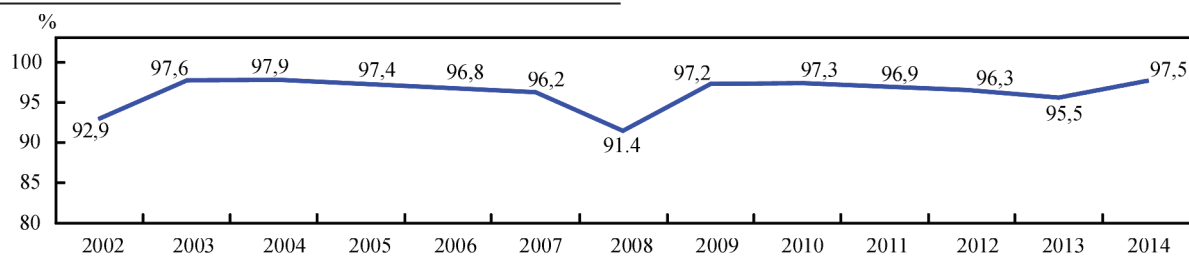


Рис. 6. Доля украинских производителей на внутреннем рынке

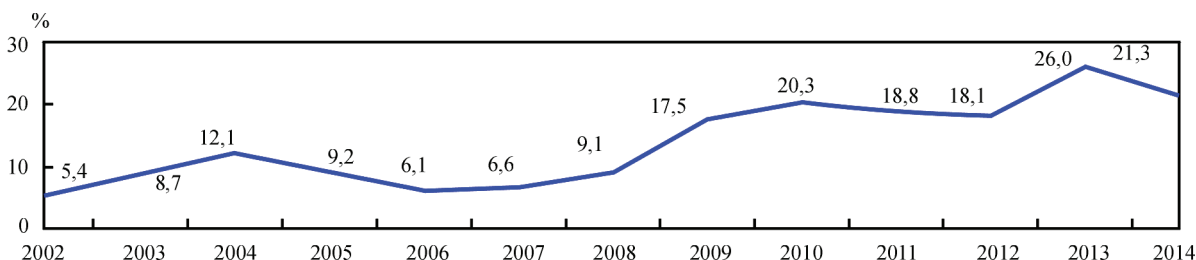


Рис. 7. Доля экспорта в общем объеме производства

приятый по производству сварочных электродов, хотя в 1990-е и начале 2000-х их количество доходило до ста предприятий. Основными производителями в настоящее время являются: ПАО «Плазматек» (г. Винница), Машзавод «Победа труда» Вистек (г. Бахмут Донецкой обл.), ООО «Сумы электрод» (г. Сумы), ОЗСМ ИЭС им. Е. О. Патона (г. Киев), ООО «Галэлектросервис» (г. Львов), ООО «ИИ БадмАтд» (г. Днепр), ООО «Ганза» (г. Кривой Рог).

Украинские предприятия-производители занимают на внутреннем рынке лидирующие позиции. Их доля на внутреннем рынке превышает 90 % (рис. 6).

Динамика доли экспорта в общем объеме производства сварочных электродов за 2002–2014 гг. [12] представлена на рис. 7. Объемы экспорта во многом зависят от экономического состояния на основных региональных рынках сбыта продукции. В годы роста промышленного производства на этих рынках растет спрос на продукцию украинских производителей и, соответственно, растут объемы экспортных операций. Вследствие девальвации национальной денежной единицы (гривны) в годы финансового кризиса украинская продукция становится более востребованной и конкурентоспособной, что способствует экспорту.

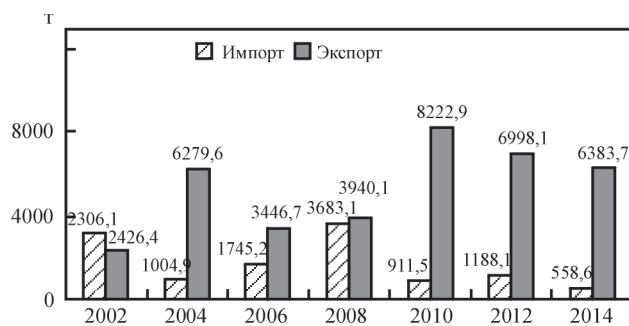


Рис. 8. Динамика экспорта-импорта сварочных электродов

С 2002 по 2014 г. доля импорта в структуре внутреннего рынка в среднем составляла около 4 %, но в отдельные годы этот показатель достигал 8,6 %.

Динамика экспортно-импортных операций по группе товаров сварочных электродов представлена на рис. 8. Объемы экспортных поставок сварочных электродов значительно превышают импортные. Это обеспечивает положительный внешнеторговый баланс по этой группе товаров, предприятия-производители электродов способствуют поступлению иностранной валюты в страну и поддержанию курса гривны.

Основными региональными объединениями по экспортно-импортным операциям являются страны СНГ и Европейского союза. На долю этих стран приходится 70...90 % объема экспорта-импорта (рис. 9). Динамика экспортно-импортных операций со странами СНГ и ЕС представлена на рис. 10.

Основным регионом экспорта украинских предприятий-производителей являются страны СНГ. Ведущими экспортерами стали такие предприятия, как «Плазматек» и «Сумы-электрод». На рынки этих стран в основном поставляются электроды общего назначения марок УОНИ 13/45, УОНИ 13/55, МР-3, АНО-4, АНО-21, АНО-36. Доля специальных электродов относительно невелика и включает четыре марки электродов для сварки высоколегированных сталей ЦЛ-11, ОЗЛ-18, ЭА-400/10У и ЭА-395/9, две марки электродов для сварки чугуна ЦЧ-4 и МНЧ-2 и две марки наплавочных электродов Т-620 и Т-590.

Объем импорта из этих стран в 2009-2014 гг. значительно сократился и стал на порядок меньше показателей экспорта. По импорту поставляют в основном электроды специального назначения. Снижение импорта стало возможным в результате импортозамещения ряда марок сварочных

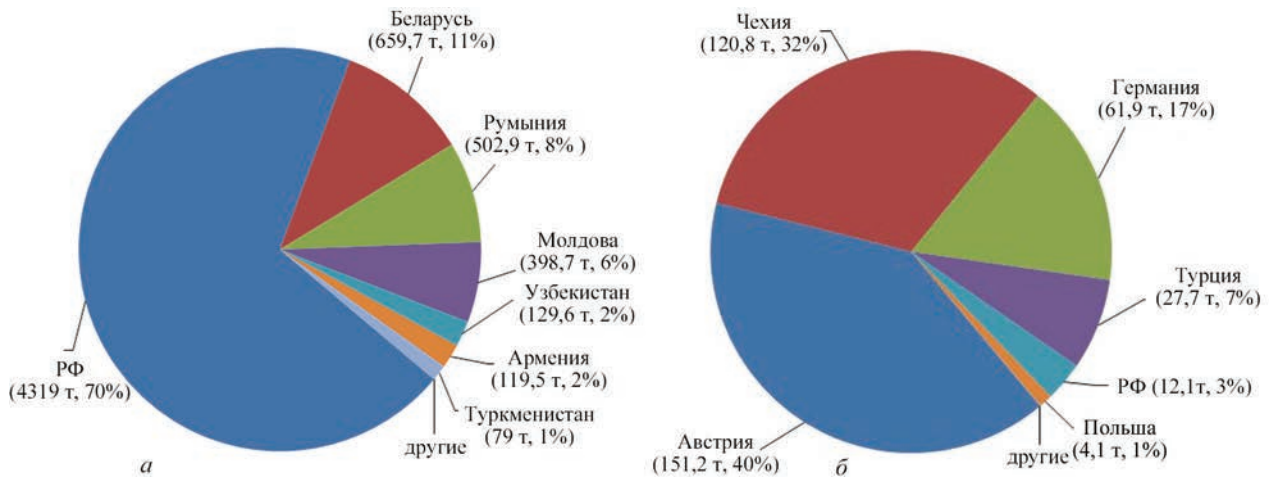


Рис. 9. География экспортно-импортных операций по группе товаров сварочных электродов за 2015 г.: а — экспорт; б — импорт

электродов. На большинстве предприятий освоено производство специальных марок сварочных электродов, их доля в общем объеме выпуска продукции растет и на некоторых предприятиях становится доминирующей (ООО «Сумы-электрод», «Гефест», ВелдинТек). На ПАО «Плазматек» и ООО «Сумы-электрод» разработаны и запущены в производство ряд марок электродов с рутиловым покрытием для сварки высоколегированных сталей, которые соответствуют лучшим зарубежным аналогам.

За последние годы ведущими предприятиями Украины разработаны и освоены современные марки электродов с рутиловым и основным покрытием, которые по качеству соответствуют уровню лучших зарубежных марок (АНО-36, Монолит РЦ, МД6013, Протон Е6013, УОНИ-13/55 Плазма, Протон Е6013 и др.).

Значительный объем импортных поставок по группе товаров сварочных электродов с 2009 г. приходится на страны Европейского союза. Основными поставщиками являются ведущие мировые производители, такие как ESAB и BOHLER, которые поставляют в основном высококачественные электроды для сварки трубопроводов (OK 53.70, OK 74.30, FOX EV50, FOX PIPE, Phoenix 7018), которых нет в Украине, а также электроды для сварки высоколегированных сталей с рутиловым покрытием, имеющие превосходные сварочно-технологические свойства. Аналоги этих электродов в Украине (например, ЦЛ-11, ОЗЛ-8 и др.) существенно уступают им по сварочно-технологическим свойствам.

Следует отметить динамику поставок сварочных электродов из Китая в 2005–2008 гг. Ежегодный рост импортных поставок в этот период составлял 250...600 % (рис. 11). После резкого падения объемов продаж сварочных электродов в 2009 г. к 2013 г. объемы импортных поставок практически достигли показателей докризисного периода. Из Китая, в основном, поставлялись электроды общего назначения типа АНО-21 (по AWS тип Е6013). Однако из-за низкого содержания марганца в наплавленном указанными электродами металле у потребителей имелись к ним претензии. Вследствие девальвации гривны поставки сварочных электродов из Китая практически прекратились.

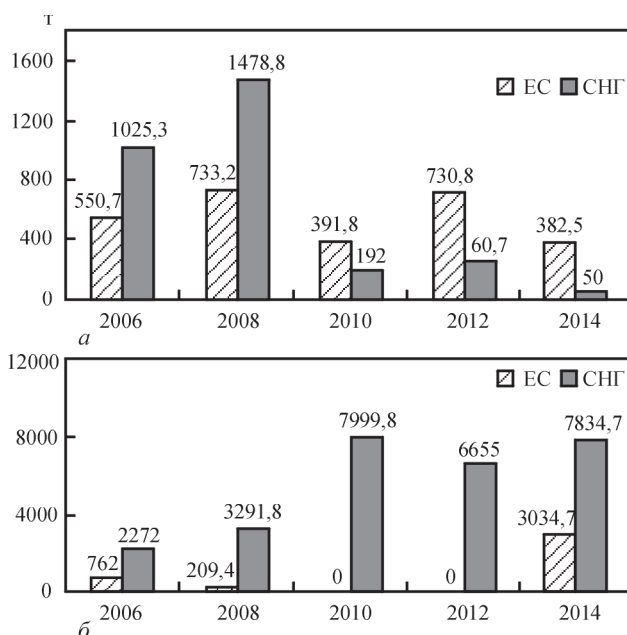


Рис. 10. Динамика экспортно-импортных операций со странами СНГ и ЕС; а — импорт; б — экспорт

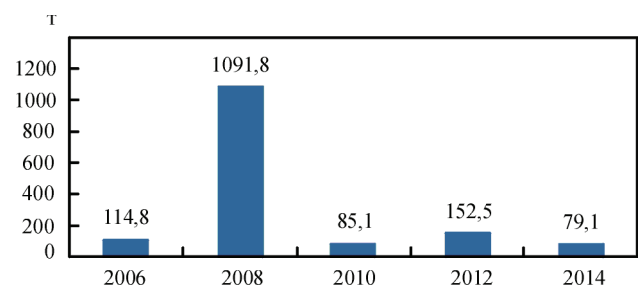


Рис. 11. Динамика поставок сварочных электродов из Китая

Известными турецкими фирмами «ASKA-NYAK» и «GEDIK» осуществлялись поставки сварочных электродов общего назначения с рутиловым и основным покрытием, а также электродов для сварки высоколегированных сталей с рутиловым покрытием, электродов для сварки чугуна и меди. Указанные электроды имеют хорошее соотношение качества и стоимости.

Падение объемов промышленного производства в Украине 2014–2015 гг. вследствие политического и экономического кризиса привело к снижению спроса на сварочные электроды и, соответственно, к снижению их поставок из стран ЕС, Турции и Китая.

Выводы

Сварка является ведущим технологическим процессом в украинской промышленности, а национальный рынок сварочных электродов динамично развивается.

Имеющиеся в Украине производственные мощности позволяют удовлетворить внутренние потребности машиностроительных предприятий по большинству позиций группы товаров сварочных электродов.

Дальнейшее устойчивое и эффективное развитие производства сварочных электродов и повышение их конкурентоспособности возможно при использовании результатов фундаментальных и прикладных исследований, имеющемся высоком потенциале, активном трансфере высоких сварочных технологий и других инноваций.

1. Бернадский В. Н. Состояние и перспективы мирового сварочного рынка / В. Н. Бернадский, А. А. Мазур // Автоматическая сварка. – 1999. – № 11. – С. 49–55.
2. Bruno Pekari // Svetsaren. – 2006. – № 3. – Р. 12–16.
3. Бернадский В. Н. Сварочное производство и рынок сварочной техники в современной экономике / В. Н. Бернадский, О. К. Маковецкая // Автоматическая сварка. – 2007. – № 1. – С. 44–48.
4. Маковецкая О. К. Современный рынок сварочной техники и материалов / О. К. Маковецкая // Автоматическая сварка. – 2011. – № 6. – С. 23–38.

5. Маковецкая О. К. Основные тенденции на рынке сварочной техники в 2008–2011 гг. и прогноз его развития (Обзор) / О. К. Маковецкая // Автоматическая сварка. – 2012. – № 6. – С. 44–50.
6. Задольский А. Н. Обзор рынка сварочного производства Украины / А. Н. Задольский, Пин Ма // Бизнесинформ. – 2009. – № 5. – С. 33–39.
7. Миддельдорф К., фон Хофе Д. Тенденции развития технологий соединения материалов / К. Миддельдорф, Д. фон Хофе // Мир техники и технологий. – 2009. – № 11. – С. 12–16.
8. Явдошин И. Р. Новая информация о «старых» электродах / И. Р. Явдошин, О. И. Фольборт // Автоматическая сварка. – 2011. – № 1. – С. 56–57.
9. Марченко А. Е. Состояние разработки и производства низководородных электродов с двухслойным покрытием в странах СНГ / А. Е. Марченко, Н. В. Скорина, В. П. Костюченко // Автоматическая сварка. – 2011. – № 1. – С. 47–51.
10. Шлепаков В. Н. Современные электродные материалы и способы электродуговой сварки плавлением / В. Н. Шлепаков // Автоматическая сварка. – 2011. – № 10. – С. 31–35.
11. Економіко-статистичний огляд зварювального виробництва і ринку зварювальної техніки України в 1990–2014 рр. – К.: Вид-во ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2015. – 75 с.
12. Зовнішньоекономічна діяльність України в 2002–2015 рр. (зварювальні матеріали та обладнання). – К.: Вид-во ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2016. – 35 с.

С. В. Пустовойт, М. В. Скорина, В. С. Петрук

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ РИНКУ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОДІВ В УКРАЇНІ

Зварювання як основна технологія з'єднання матеріалів є невід'ємною складовою промислового сектора економіки, інтегрованої в виробничий процес базових галузей промисловості. У статті представлено систематизовану економіко-статистичну інформацію про стан і розвиток ринку зварювальних електродів в Україні, показники обсягів їх виробництва і експортно-імпорتنних операцій. Потужності українських підприємств-виробників дозволяють як задовольняти попит на внутрішньому ринку на зварювальні електроди, так і постачати свою продукцію на зовнішній ринок. Бібліогр. 12, табл. 3, рис. 11.

Ключові слова: зварювання, зварювальне виробництво, зварювальні електроди, технології, стан ринку, перспективи

Поступила в редакцію 08.12.2016



Восьмая международная конференция ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

11 – 15 сентября 2017 г.
Украина, Одесса, отель «Курортный»

Тематика конференции

- Лазерная и электронно-лучевая сварка, резка, наплавка, термообработка, нанесение покрытий
- Электронно-лучевая плавка и рафинирование
- Гибридные процессы
- 3D-технологии
- Моделирование лучевых технологий
- Материаловедческие проблемы лазерных и электронно-лучевых технологий

E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2017

Производство порошковых проволок в компании «ТМ.ВЕЛТЕК»

В 1993 г. в Киеве по инициативе группы сотрудников ИЭС им. Е.О. Патона было создано совместное российско-украинское предприятие ООО «СП «ТМ.ВЕЛТЕК». Успешное начало производства порошковых проволок в новых политических и экономических условиях 90-х гг. удалось осуществить благодаря поддержке «Днепропетровского метизного производственного объединения», руководство которого с пониманием отнеслось к идее восстановления производства порошковых проволок. В 2001 г. производство порошковых проволок было выделено в отдельное подразделение — компанию ООО «ТМ.ВЕЛТЕК».

Тесное сотрудничество с ведущими научными центрами, в том числе и в области сварки и высокий профессионализм инженерно-технических работников и рабочих позволили в совершенстве отработать стабильную классическую технологию производства сварочных и наплавочных порошковых проволок, а также проволок для электродугового напыления.

За период работы компании реализован комплекс мероприятий по ремонту и модернизации основного оборудования, в частности линий производства порошковых проволок, шихтового подразделения. Освоены современные виды поставки продукции. Отработаны технологии изготовления порошковых проволок диаметрами от 1,0 до 6,0 мм.

Усилия предприятия позволили сохранить значительную часть рынка сварочных материалов Украины за отечественным производителем и обеспечить потребителей качественными материалами по демократичным ценам. В практике работы предприятия — оказание консультационной помощи по выбору материала, оптимальной технологии и оборудования для ее реализации, обеспечение инженерного сопровождения продукции. В ряде случаев предприятие изготавливает порошковые проволоки по отдельно согласованным с Заказчиком техническим требованиям. Постоянно совершенствуются сварочно-технологические свойства уже освоенных марок проволок и разрабатываются новые, не имеющие аналогов, марки.

Высокий научный и технических потенциал предприятия позволяет независимо от номенклатуры и объемов партий выполнять заказы в кратчайшие сроки и с требуемым качеством. Это позволило занять достаточно большую долю рынка в Украине, обеспечить стабильное выполнение зарубежных контрактов и стать постоянным партнером многих предприятий.

По назначению и техническим характеристикам порошковые проволоки марки ВЕЛТЕК не уступают продукции ведущих зарубежных компаний, что подтверждается их высокой оценкой на отечественных и зарубежных выставках, признанием ведущими предприятиями Украины и СНГ, непрерывным расширением областей применения и ростом объемов продаж, несмотря на непрерывно меняющиеся экономические и политические условия. За годы работы предприятие приобрело статус надежного партнера на рынке сварочных материалов Украины, России, Белоруссии, Узбекистана и других стран СНГ, Литвы, Латвии, а также Чехии, Индии.

С 2004 г. на предприятии реализована система менеджмента качества, сертифицированная УкрСЕПРО и Российским Морским Регистром Судоходства, соответствующая требованиям ДСТУ ISO 9001:2009 (ISO 9001:2008, IDT). Получены Сертификаты соответствия УкрСЕПРО на более чем 100 марок сварочных и наплавочных порошковых проволок, Сертификат об одобрении сварочных материалов Российского Морского Регистра Судоходства, Сертификат об одобрении сварочных материалов Lloyds Register и Сертификат об одобрении сварочных материалов Регистра Судоходства Украины.

Порошковые проволоки марки ВЕЛТЕК используются в самых разных отраслях промышленности: на железнодорожных предприятиях, на комбинатах горно-металлургического комплекса, на заводах металлоконструкций, машиностроительных заводах шахтного, транспортного, грузоподъемного оборудования, в судостроении, тепловозостроении, вагоностроении. Ниже кратко представлена номенклатура широкой гаммы порошковых проволок для сварки и наплавки, изготавливаемых ООО «ТМ.ВЕЛТЕК».

Предприятие ООО «ТМ. ВЕЛТЕК» выпускает порошковые проволоки для сварки малоуглеродистых и низколегированных сталей (ПП-АН1, ПП-АН4, ПП-АН8, ППС-ТМВ6, ППС-ТМВ8, ППС-ТМВ29, ППС-ТМВ7, ППС-ТМВ10Н), низколегированных высокопрочных (BeT ППС-ТМВ57) и





теплостойких сталей (BeT ППс-TMB14, BeT ППс-TMB15), а также для сварки высокомарганцовистых сталей типа 110Г13Л в сочетании с низколегированными и легированными конструкционными сталями (ВЕЛТЕК-Н210У, ВЕЛТЕК-215, BeT ППв-TMB11). Последние проволоки также могут использоваться для наплавки буферных слоев перед нанесением твердосплавного покрытия. Также ООО «ТМ. ВЕЛТЕК» производит большое количество наплавочных порошковых проволок, которые применяются в различных отраслях промышленности и предназначены для восстановления после различных видов износа деталей машин.

Порошковые проволоки, применяемые на железнодорожных предприятиях (ВЕЛТЕК-Н250, ВЕЛТЕК-Н290, ВЕЛТЕК-Н351, ВЕЛТЕК-Н490, ВЕЛТЕК-285), предназначены для наплавки подпятников тележек и колес железнодорожных вагонов, осей, валов, наплавки и ремонта дефектных участков путей и автосцепных устройств вагонов.

Проволоки применяемые для восстановительной и упрочняющей наплавки (ВЕЛТЕК-Н290, ВЕЛТЕК-Н300-PM, ВЕЛТЕК-Н350-PM, ВЕЛТЕК-Н351, ВЕЛТЕК-Н370-PM, ВЕЛТЕК-Н380, ВЕЛТЕК-Н450, ВЕЛТЕК-Н455, ВЕЛТЕК-Н475), предназначены для восстановительной наплавки посадочных мест осей, валов, шеек роликов МНЛЗ, а также для упрочняющей наплавки тракторных катков и гусениц, роликов ролягангов, бандажей, крановых колес, тормозных шкивов, зубьев шестерен, опорных роликов и др.

Порошковые проволоки, применяемые на крупных металлургических комбинатах для деталей, испытывающих значительные удельные давления и износ при повышенной температуре (ВЕЛТЕК-Н390, ВЕЛТЕК-Н410, ВЕЛТЕК-Н415, ВЕЛТЕК-Н420, ВЕЛТЕК-Н460, ВЕЛТЕК-Н462, ВЕЛТЕК-Н465, ВЕЛТЕК-Н470, ВЕЛТЕК-Н472, ВЕЛТЕК-Н480, ВЕЛТЕК-Н495, ВЕЛТЕК-Н500-PM, ВЕЛТЕК-Н505-PM, ВЕЛТЕК-Н550-PM, ВЕЛТЕК-Н555, ВЕЛТЕК-Н565), предназначены для наплавки роликов МНЛЗ, плунжеров гидропрессов, валков горячей прокатки трубопрокатных и сортопрокатных станков, ножей горячей и холодной резки металла, штампового и прессового инструмента, уплотнительных поверхностей общепромышленной арматуры.

Наплавочные порошковые проволоки, применяемые для восстановительной и упрочняющей наплавки марганцовистых сталей типа 110Г13Л и деталей работающих в условиях высоких удельных давлений, (ВЕЛТЕК-Н200, ВЕЛТЕК-Н220У, ВЕЛТЕК-Н230, ВЕЛТЕК-Н240, ВЕЛТЕК-Н245, ВЕЛТЕК-Н285), предназначены для наплавки ж/д крестовин, щек дробилок, деталей лопаток дробебетонеров, бил молотковых дробилок, тяжело-нагруженных крановых колес, восстановления размеров и исправления дефектов литья из стали 110Г13Л.

Выпускаются проволоки, применяемые для нанесения буферного слоя перед упрочняющей наплавкой: ВЕЛТЕК-Н210У, ВЕЛТЕК-Н215, BeT ППс-TMB11. Порошковые проволоки, применяемые для наплавки деталей, работающих в условиях ударно-абразивного износа (ВЕЛТЕК-Н552, ВЕЛТЕК-Н575, ВЕЛТЕК-Н600, ВЕЛТЕК-Н620), предназначены для наплавки зубьев и ковшей карьерных экскаваторов для работы на скальных грунтах и мерзлоте, черпаков драг, лопастей грейдеров, ножей бульдозеров, мельниц для размолва твердых материалов, измельчителей, асфальтомешалок, роторов вертикальных дробилок ударного действия, вальцовых прессов, деталей землесосов и пульпонасосов.

Порошковые проволоки, используемые для наплавки деталей испытывающих сильный абразивный износ (ВЕЛТЕК-Н560, ВЕЛТЕК-Н580, ВЕЛТЕК-Н605, ВЕЛТЕК-Н617, ВЕЛТЕК-Н640, ВЕЛТЕК-Н634, ВЕЛТЕК-Н635, ВЕЛТЕК-Н650), предназначены для наплавки деталей сельского хозяйства, изношенных деталей горнорудных и металлургических предприятий, строительной и дорожной техники, шнеков, деталей смесителей, лопаток дымососов, корпусов и рабочих колес землесосов, цементно- и бетононасосных деталей и т.п. Порошковые проволоки, применяемые для наплавки деталей испытывающих сильный абразивный износ в сочетании с высокой температурой (ВЕЛТЕК-Н479, ВЕЛТЕК-Н630, ВЕЛТЕК-Н690), предназначены для наплавки защитных поверхностей засыпных конусов и чаш, грохотов и измельчителей агломерационных фабрик, механизмов выгрузки кокса, деталей горно-обогащительных фабрик и фабрик формирования окатышей, режущих кромок и зубьев роторных экскаваторов, лопастей мешалок, шнековых конвейеров, измельчителей цементного клинкера, бетонных и цементных насосов и других деталей, изнашиваемых трением, работающих при повышенных температурах. Предприятие также выпускает проволоки порошковые наплавочные по ГОСТ 26101-84.

А. А. Голякевич, Л. Н. Орлов, В. Н. Упырь

Становление и развитие фирмы «ВЕЛМА» — производителя оборудования для изготовления электродов

В 1991 г. в период перестройки была организована фирма «ВЕЛМА». Практически все ее сотрудники ранее работали в ИЭС им. Е. О. Патона и, в частности, в отделе № 10 под руководством академика И. К. Походни. Среди них Д. М. Кушнерев, М. Ф. Гнатенко, В. С. Ворошило, А. М. Зарубин, А. С. Бибилов, В. М. Ющенко, А. В. Булат, а также бывшие сотрудники ОКБ ИЭС им. Е. О. Патона А. Д. Сучок и Е. В. Емцов, которые в свое время участвовали в разработке лабораторного опрессовочного участка для отдела № 10 и оборудования электродного цеха для Агропрома в г. Дубровица (Ровенская обл.).

Можно констатировать, что сотрудники фирмы прошли очень хорошую начальную школу по изучению и решению технологических проблем изготовления электродов, по разработке и совершенствованию конструкций отдельных узлов и единиц оборудования для производства электродов. Важно, что И. К. Походня сумел научить молодых сотрудников эффективно использовать результаты научных исследований в области технологии изготовления электродов для ее совершенствования на электродных предприятиях, а также учитывать технологические особенности при доработке старых и разработке новых образцов оборудования. И. К. Походня научил творчески подходить к решению возникающих задач по всей цепочке экспериментальной работы: исследование→технология→оборудование→эффективность производства и качество электродов.

Такой подход был взят фирмой на вооружение с первых дней работы. А с учетом принципов работы, привитых И. К. Походней, а именно: настойчивость, инициатива, критический подход, ответственность, исполнительность, коллективизм и др., мы добились положительного результата, который стараемся развивать далее. При этом, на протяжении всего времени фирма «ВЕЛМА» продолжает активно сотрудничать со специалистами ИЭС им. Е. О. Патона, обмениваясь опытом, решая разные задачи в области технологии и оборудования для изготовления электродов, в том числе проводя экспертные оценки технического уровня оборудования с участием специалистов-электродчиков и производственников.

Отличительные особенности оборудования фирмы «ВЕЛМА»:

- высокое соответствие особенностей конструкции каждой единицы оборудования функциональному назначению с обеспечением высокого качества на каждом переделе;
- простота и надежность конструкции и соответственно низкие эксплуатационные издержки, в том числе легкость обслуживания и наладки;
- низкие металлоемкость и энергопотребление оборудования;
- универсальность оборудования, т. е. возможность изготовления электродов любых типоразмеров с учетом различных особенностей технологических (в том числе пластических) свойств обмазочных масс;
- очень многие конструктивные и технологические решения имеют мировую новизну (ранее защищены авторскими свидетельствами и патентами);
- конкурентоспособность с зарубежными образцами.

В целом, с учетом оптимизации технологических режимов работы оборудования, затраты энергоресурсов на изготовление 1 т электродов достигаются ниже на 15...25 % по сравнению с оборудованием других фирм.

С более подробными сведениями о номенклатуре и технических характеристиках технологического оборудования для производства электродов и приборах, производимых ООО «ВЕЛМА», можно ознакомиться на сайтах фирмы.

М. Ф. Гнатенко

Пути расширения рынка сбыта сварочных материалов

Членство Украины во Всемирной торговой организации (ВТО), подписание соглашения об ассоциации и свободной торговле с Европейским сообществом (ЕС) обязывает Украину проводить гармонизацию национальных стандартов с Международными и Европейскими стандартами, а украинских производителей сварочных материалов с целью расширения рынков сбыта вести подготовку к работе в условиях конкуренции с европейскими партнерами.

Для этого производителям сварочных материалов необходимо документально оформить и поддерживать систему заводского производственного контроля (ЗПК) с целью обеспечения соответствия выпускаемой на рынок продукции Международным и Европейским стандартам, регламентирующим рабочие характеристики.

Система ЗПК должна состоять из процедур, регулярных проверок и испытаний и / или оценок, а также использования результатов для контроля качества сырья и других исходных материалов, производственного процесса и продукции.

- Система ЗПК, должна соответствовать требованиям:
- EN ISO 9001:2015 «Системы менеджмента качества. Требования».
 - EN 12074-2000 «Материалы сварочные. Требования к качеству при производстве, поставке и продаже сварочных материалов для сварки и смежных процессов».
 - EN 13479:2004 (Fpr 13479: 2016) «Сварочные материалы. Общие требования к сварочным материалам и флюсам для сварки плавлением металлических материалов».

Оборудование для взвешивания, измерения и испытания должно быть прокалибровано и регулярно проверяться согласно документально оформленным процедурам, критериям, и с заданной периодичностью.

Оборудование, используемое в процессе производства, должно проходить регулярные проверки и техническое обслуживание, чтобы его эксплуатация, износ или неисправность не приводили к несоответствиям в процессе производства.

Проверки и техническое обслуживание должны проводиться и документально фиксироваться в соответствии с письменными процедурами изготовителя.

Должны быть задокументированы:

- технические требования ко всей сырьевой базе изготовителя;
- входной контроль;
- планы проверок для обеспечения соответствия продукции в процессе производства.

Изготовитель должен разработать процедуры, обеспечивающие соответствие установленных значений всех характеристик требованиям нормативных документов по назначению (табл. 1).

Изготовитель должен разработать процедуры, обеспечивающие соответствие рабочих характеристик сварочных материалов задекларированным значениям, полученным на основе результатов предварительного испытания.

Вид и частота испытаний должны соответствовать требованиям:

EN ISO 15972-1. Сварочные материалы. Методы испытаний. Часть

Таблица 1

Электроды	
EN ISO 2560	Низколегированные и мелкозернистые стали
EN ISO 3581	Нержавеющие стали
EN ISO 3580	Жаропрочные стали
EN ISO 18275	Высокопрочные стали
EN ISO 14172	Никель и никелевые сплавы
ISO 1071	Чугун
Проволоки сплошного сечения	
EN ISO 14341	Низколегированные и мелкозернистые стали
EN ISO 14171	Проволока-флюс для низколегированных и мелкозернистых сталей
EN ISO 14343	Нержавеющие и жаропрочные стали
EN ISO 18273	Алюминий и алюминиевые сплавы
EN ISO 18274	Никель и никелевые сплавы
EN ISO 16834	Высокопрочные стали (в защитных газах)
EN ISO 636	Низколегированные и мелкозернистые стали (вольфрамовым электродом в защитных газах)
EN ISO 26304	Высокопрочные стали (под флюсом + порошковые)
EN ISO 24034	Титан и титановые сплавы
EN ISO 21952	Жаропрочные стали (в защитных газах)
EN ISO 24598	Жаропрочные стали (под флюсом + порошковые)
Порошковые проволоки	
EN ISO 17632	Низколегированные и мелкозернистые стали
EN ISO 17633	Нержавеющие и жаропрочные стали (с защитой и без)
EN ISO 17634	Жаропрочные стали (с защитой)
EN ISO 18276	Высокопрочные стали
EN ISO 12153	Никель и никелевые сплавы
EN 14700	Сварочные материалы для наплавки

1: Методы испытаний наплавленного металла, образцы стали, никеля и никелевых сплавов;

EN ISO 15972-2. Сварочные материалы. Методы испытаний. Часть 2: Подготовка образцов для испытаний при одно- двухпроходной сварки стали;

EN ISO 15972-3. Сварочные материалы. Методы испытаний. Часть 3: Классификационные испытания сварочных материалов по положению сварки и глубине проплавления корня углового шва.

Рабочие характеристики сварочных материалов, которые проверяются на соответствие задекларированным значениям, приведены в табл. 2.

По результатам испытаний оформляется сертификат согласно EN 10204, минимальный тип 2.2.

Экономически целесообразно проводить первичные испытания сварочных материалов с учетом требований EN ISO 15610 и привлечением независимой третьей стороны для одновременного получения Протокола подтверждения технологии сварки (WPQR) согласно требований серии стандартов EN ISO 15614.

При этом проводится полный комплекс испытаний сварных соединений, полученных с использованием классифицируемой марки сварочных материалов: контроль визуальным, радиографическим (или ультразвуковым), магнитопорошковым (или цветной дефектоскопией) методами; механические испытания образцов: поперечное растяжение, поперечный загиб, ударная вязкость, твердость; макроскопическое исследование и, при необходимости, другие испытания, например на межкристаллитную коррозию.

Результаты вышеперечисленных испытаний могут быть использованы для подтверждения соответствия требованиям Европейских директив, Технических регламентов, если сварные конструкции, при сварке которых используются классифицируемые сварочные материалы, подлежат обязательной маркировке Национальным знаком соответствия или знаком СЕ (рис. 1, 2).

Оценку сварочных материалов на соответствие EN 13479 имеет право проводить Европейский нотифицированный орган по подтверждению соответствия. После получения сертификата производитель сварочных материалов оформляет Декларацию соответствия, которая дает право на маркировку своей продукции знаком СЕ.

В настоящее время три украинских производителя сварочных материалов получили право маркировки знаком СЕ своей продукции: ООО «ВИТАПОЛИС», г. Боярка, Киевская обл.; ООО ПП «МЕТИЗ», г. Бровары, Киевская обл.; ООО «СУМЫ-ЭЛЕКТРОД», г. Сумы.

Таблица 2

Размеры и форма по EN ISO 544	
Механические свойства металла шва в соответствии	
EN ISO 4136	Растяжение с поперечным швом
EN ISO 9016	Ударная вязкость
EN ISO 9017	Разрушение
EN ISO 5178	Растяжение вдоль шва
EN ISO 5173	Загиб
EN ISO 9015-1	Твердость
EN ISO 9015-2	Микротвердость
EN ISO/TR 16060	Травление для макро- и микро исследования
EN ISO 17639	Макро- и микро исследования
EN ISO 8249	Определение ферритной фазы (FN)
EN ISO 9018	Растяжение крестовых соединений и внахлест
EN ISO 3690	Определение водорода
Химический состав наплавленного металла	
EN ISO 6847	Определение химсостава



Рис. 1. Национальный знак соответствия



Рис. 2. Знак маркировки СЕ

Н. А. Проценко

Подписка на журнал «Автоматическая сварка» www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/as

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
720 грн.	1440 грн.	5400 руб.	10800 руб.	90 дол. США	180 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств: Каталог видань України, «Прессцентр», «Блицинформ», «Меркурий» (Украина); каталог «Газеты. Журналы» агентства «Роспечать», Объединенный каталог «Пресса России» (Россия); каталог АО «Казпочта» Издания Украины (Казахстан); каталог зарубежных изданий «Белпочта» (Беларусь).



Подписка на журнал «The Paton Welding Journal» www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
750 грн.	1500 грн.	5400 руб.	10800 руб.	174 дол. США	348 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Журнал «Автоматическая сварка» в полном объеме переиздается на английском языке под названием «The Paton Welding Journal» и распространяется по редакционной подписке (тел./факс: 38044 200-82-77, 200-54-84, E-mail: journal@paton.kiev.ua).



Правила для авторов, лицензионные соглашения, архивные выпуски журналов на сайте издательства www.patonpublishinghouse.com.

В 2017 г. в открытом доступе выпуски журналов с 2009 по 2015 гг. в формате *.pdf.

Реклама в журналах «Автоматическая сварка» и «The Paton Welding Journal»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- ♦ Первая страница обложки, 190×190 мм
- ♦ Вторая, третья и четвертая страницы обложки, 200×290 мм
- ♦ Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки, 200×290 мм
- ♦ Вклейка А4, 200×290 мм
- ♦ Разворот А3, 400×290 мм
- ♦ А5, 165×130 мм

Стоимость рекламы

- ♦ Цена договорная
- ♦ Предусмотрена система скидок
- ♦ Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади
- ♦ Публикуется только профильная реклама (сварка и родственные технологии)
- ♦ Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Подписано к печати 26.12.2016. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 9,11. Усл.-отт. 10,21. Уч.-изд. л. 10,88 + 2 цв. вклейки.
Печать ООО «Фирма «Эссе».
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.