

## 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. Юценко

Ученые университетов Украины

В. В. Дмитрик, НТУ «ХПИ», Харьков,  
В. В. Квасницкий,  
НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев,  
В. Д. Кузнецов,  
НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», 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. Пиларчик

Ин-т сварки, Гливице, Польша

Г. А. Туричин

С.-Петербургский гос. политехн. ун-т, РФ

Редакторы

Т. В. Юштина (отв. секр.), К. Г. Григоренко,

Н. А. Питула

Электронная верстка

И. Р. Наумова, Д. И. Середя, А. И. Сулима

Адрес редакции

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ

03680, Украина, Киев-150,

ул. Казимира Малевича, 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 KB 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

Пленарные доклады международной конференции  
«Роботизация и автоматизация сварочных процессов»  
12–14 июня 2017 г., Киев, Украина

Корниенко А. Н., Макаренко Н. А. У истоков механизации и автоматизации сварочного производства .....	3
Мазур А. А., Маковецкая О. К., Пустовойт С. В. Основные тенденции развития автоматизации и роботизации в сварочном производстве (Обзор) .....	8
Коротынский А. Е., Скопюк М. И. Интеллектуализация процессов контроля параметров дуговой сварки .....	15
Цыбулькин Г. А. Некоторые проблемы роботизации дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа .....	20
Юйхуэй Яо, Пелешенко С. И., Коржик В. Н., Хаскин В. Ю., Квасницкий В. В. Концепция создания усовершенствованной системы искусственного интеллекта и компьютеризированного тренажера для виртуальной сварки .....	26
Турык Е., Шуберт Л., Дудек С., Гробош В. Роботизированная сварка тонкостенных деталей способом TIG с системой контроля режима сварки .....	35
Ланкин Ю. Н., Семикин В. Ф., Байштрук Е. Н. Стабилизация сварочного тока контактных точечных машин при колебаниях напряжения питающей сети .....	40
Рябцев И. А., Соловьев В. Г., Ланкин Ю. Н., Бабинец А. А. Компьютерная система автоматического управления процессов дуговой наплавки электродными проволоками .....	43
Pfeifer T., Rozanski M., Grobosz W., Rykala J., Riabcew I. A. Technological Aspects of the Robotic TIG Surfacing of Boiler Steel Tubes Using Alloy Inconel 625 .....	46
Лобанов Л. М., Шаповалов Е. В., Гончаров П. В., Долиненко В. В., Тимошенко А. Н., Скуба Т. Г. Технология роботизированной ТИГ-сварки элементов конструкций из нержавеющей стали .....	54
Долиненко В. В., Шаповалов Е. В., Скуба Т. Г., Коляда В. О., Куц Ю. В., Галаган Р. М., Карпінський В. В. Роботизована система неруйнівного вихрострумowego контролю виробів зі складною геометрією .....	60
Максимов С. Ю. Разработка технологии герметизации труб теплообменника автоматической морской подводной сваркой .....	68
Коржик В. Н., Сидорец В. Н., Шангуо Хан, Бабич А. А., Гринюк А. А., Хаскин В. Ю. Создание роботизированного комплекса для гибридной плазменно-дуговой сварки тонкостенных конструкций .....	72
Скачков І. О. Моніторинг технологічного процесу дугового роботизованого зварювання .....	83
Руденко П. М., Гавриш В. С., Кучук-Яценко С. И., Дидковский А. В., Антипин Е. В. Влияние параметров процесса стыковой контактной сварки оплавлением на прочностные характеристики стыков железнодорожных рельсов .....	87
Коржик В. Н., Войтенко А. Н., Пелешенко С. И., Ткачук В. И., Хаскин В. Ю., Гринюк А. А. Разработка автоматизированного оборудования для изготовления трехмерных металлических изделий на основе аддитивных технологий .....	91
Лендел И. В., Лебедев В. А., Максимов С. Ю., Жук Г. В. Автоматизация сварочных процессов с использованием механического сварочного оборудования .....	99
Вертецкая И. В., Коротынский А. Е. Использование дифференциального тейлоровского преобразования для моделирования процессов в резонансных источниках питания .....	105

## Информация

Диссертации на соискание ученой степени .....	82, 107
Выставка «Сварка и резка-2017» .....	108
Олімпіада студентів зі зварювання та споріднених процесів і технологій .....	110
TPS/i Robotics — идеальная сварочная система для роботизированного применения .....	112
Оборудование для автоматической дуговой сварки .....	114
Гибкое производство сварных корпусов легкобронированных боевых машин из укрупненных узлов .....	116
Комплексные решения компании ESAB для роботизированной сварки и резки металлов .....	118

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор  
Б. Є. Патон

Вчені ІЕЗ ім. Є. О. Патона  
С. І. Кучук-Яценко (заст. гол. ред.),  
В. М. Ліподаєв (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 ім. Ігоря Сікорського», Київ,  
В. Д. Кузнєцов,  
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 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 «Одропрес», 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. Турчин  
С.-Петербурзький держ. політехн. ун-т, РФ

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

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  
видавчів для публікації праць  
здобувачів вчених ступенів

За зміст рекламних матеріалів редакція  
журналу відповідальності не несе

Ціна договірною  
Видається щомісячно

## ЗМІСТ

Пленарні доповіді міжнародної конференції  
«Роботизація та автоматизація зварювальних процесів»  
12–14 червня 2017 р., Київ, Україна

Корнієнко О. М., Макаренко Н. О. У витоків механізації та автоматизації зварювального виробництва .....	3
Мазур О. А., Маковецька О. К., Пустовойт С. В. Основні тенденції розвитку автоматизації і роботизації в зварювальному виробництві (Огляд) .....	8
Коротинський О. Є., Скопюк М. І. Інтелектуалізація процесів контролю параметрів дугового зварювання .....	15
Цибулькін Г. О. Деякі проблеми роботизації дугового зварювання плавким електродом в середовищі захисного газу .....	20
Юйхуей Яо, Пелешенко С. І., Коржик В. М., Хаскін В. Ю., Квасницький В. В. Концепція створення удосконаленої системи штучного інтелекту і комп'ютеризованого тренажера для віртуального зварювання .....	26
Турик Є., Шуберт Л., Дудек С., Гробош В. Роботизоване зварювання тонкостінних деталей способом ТОРТІГ з системою контролю режиму зварювання .....	35
Ланкін Ю. М., Семикін В. Ф., Байштрук Є. М. Стабілізація зварювального струму контактних точкових машин при коливаннях напруги мережі живлення .....	40
Рябцев І. О., Соловйов В. Г., Ланкін Ю. М., Бабінець А. А. Комп'ютерна система автоматичного управління процесів дугового наплавлення електродними дрютами .....	43
Пфайффер Т., Ружанські М., Гробош В., Рикала Я., Рябцев І. О. Технологічні аспекти роботизованого ТОРТІГ наплавлення котельних сталевих труб з використанням сплаву Inconel 625 .....	46
Лобанов Л. М., Шаповалов Є. В., Гончаров П. В., Долиненко В. В., Тимошенко О. М., Скуба Т. Г. Технологія роботизованого ТІГ-зварювання елементів конструкцій з нержавіючих сталей .....	54
Долиненко В. В., Шаповалов Є. В., Скуба Т. Г., Коляда В. О., Куц Ю. В., Галаган Р. М., Карпінський В. В. Роботизована система неруйнівного вихрострумового контролю виробів зі складною геометрією .....	60
Максимов С. Ю. Розробка технології герметизації труб теплообмінника автоматичним мокрим підводним зварюванням .....	68
Коржик В. М., Сидорець В. М., Шангуо Хан, Бабіч О. А., Гринюк А. А., Хаскін В. Ю. Створення роботизованого комплексу для гібридного плазмово-дугового зварювання тонкостінних конструкцій .....	72
Скачков І. О. Моніторинг технологічного процесу дугового роботизованого зварювання .....	83
Руденко П. М., Гавриш В. С., Кучук-Яценко С. І., Дідковський О. В., Антипін Є. В. Вплив параметрів процесу стикового контактного зварювання оплавленням на характеристики міцності стиків залізничних рейок .....	87
Коржик В. М., Войтенко О. М., Пелешенко С. І., Ткачук В. І., Хаскін В. Ю., Гринюк А. А. Розробка автоматизованого обладнання для виготовлення тривимірних металевих виробів на основі адитивних технологій .....	91
Лендел І. В., Лебедєв В. О., Максимов С. Ю., Жук Г. В. Автоматизація зварювальних процесів з використанням механічного зварювального устаткування .....	99
Вертецька І. В., Коротинський О. Є. Використання диференціального тейлорівського перетворення для моделювання процесів в резонансних джерелах живлення .....	105

## Інформація

Дисертації на здобуття вченого ступеню .....	82, 107
Виставка «Зварювання та різання-2017» .....	108
Олімпіада студентів зі зварювання та споріднених процесів і технологій .....	110
TPS/i Robotics — ідеальна зварювальна система для роботизованого використання .....	112
Устаткування для автоматичного дугового зварювання .....	114
Гнучке виробництво зварних корпусів легкоброньованих бойових машин з укрупнених вузлів .....	116
Комплексні рішення компанії ESAB для роботизованого зварювання і різання металів .....	118

## У ИСТОКОВ МЕХАНИЗАЦИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Важными условиями научно-технического прогресса являются снижение энерго- и ресурсозатрат, повышение производительности труда, улучшение экологических показателей производства, эксплуатационных качеств и др. С начала XX века все более значительное место занимают электротехнологии. В 1920-х гг. появляются металлоконструкции и машины, при изготовлении которых клепка была заменена сваркой. Продолжали развиваться военная техника, транспорт, энергетика, увеличиваться размеры конструкций, усложняться режимы эксплуатации, что требовало разработки новых технологий сварки.

Среди десятка видов сварки, созданных на основе использования электрической энергии, ведущее место заняла дуговая сварка, которая до настоящего времени не имеет конкурентов по универсальности и простоте применения. Значительное место в сварочном производстве заняли высокопроизводительные технологии контактной сварки. Электрошлаковая, электронно-лучевая, лазерная сварка, гибридные способы сварки, созданные во второй половине XX века, оказались незаменимыми в производстве новых видов техники. Кроме упомянутых, список сварочных и родственных технологий содержит еще десятки способов. Каждый из них имеет свои особенности и уникальные преимущества. Но общим для большинства инновационных технологий является расширение технологических возможностей, повышение уровня механизации и автоматизации, интенсификация процессов.

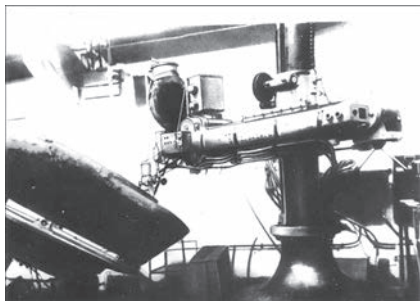


Е. О. Патон с делегатами конференции по автоматической сварке, Киев, 1940 г.

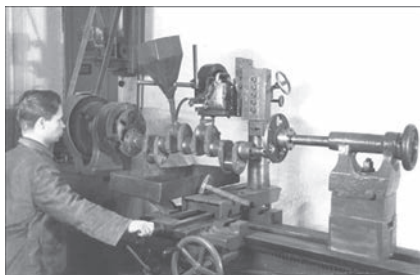
История создания и развития автоматической сварки, возникновения и развития механизации и автоматизации сварочного производства описана в значительном количестве отечественных и зарубежных публикаций. Сварка и родственные технологии продолжают развиваться, поэтому актуальность исследований в этих направлениях сохраняется.

Потребность в прогрессивных технологиях сварки резко возросла в связи с курсом СССР на индустриализацию. В 1929 г. Евгений Оскарович Патон создал в системе Всеукраинской академии наук Электросварочную лабораторию и наметил пути производства сварных конструкций. Е. О. Патон писал: «Основной проблемой электросварки во второй пятилетке является возможно более полная механизация сварочного процесса. Эта мера даст большую экономию сварочной аппаратуры, времени и рабочей силы. Автоматы должны заменить ручную дуговую сварку везде, где это возможно и целе-





Автоматическая сварка башни танка Т-34, Нижний Тагил, 1942 г.



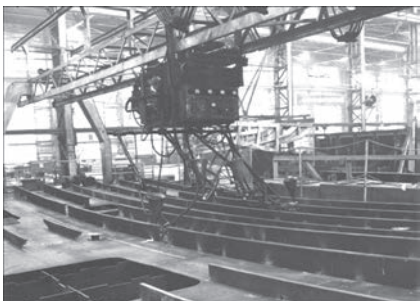
Установка для наплавки коленвалов, 1948 г. (М. Л. Звонков)

С 1941 г. начался период еще более интенсивного развития дуговой автоматической сварки, находились решения, опередившие мировой уровень на несколько лет. С началом войны ИЭС был эвакуирован в Нижний Тагил и разместился на территории Уральского вагоностроительного завода. Туда же был перебазирован Харьковский завод им. Коминтерна, где и был создан танк Т-34. Е. О. Патон поставил задачу автоматизировать сварку бронетанковой техники. Впервые в мире была разработана технология автоматической сварки брони (В. И. Дятлов, А. И. Иванов), исследованы процессы плавления под флюсом (Б. Е. Патон, А. М. Макара).

В начале 1942 г. на основе открытия принципа саморегулирования плавления электрода впервые в мире созданы одномоторные сварочные головки с постоянной скоростью подачи плавящегося электрода, исключена система поддержания длины дуги. Производительность автоматической сварки в 8...10 раз превысила производительность других способов сварки.



Е. О. Патон с сыновьями у аппарата ТС-17, 1950 г.



Механизированная сварка корабельных секций шланговыми полуавтоматами, Николаев, 1950 г.

сообразно... Развитие у нас автоматов должно быть поставлено на повестку дня. Не приходится рассчитывать на импортные автоматы, необходимо создать советские».

2 января 1934 г. было принято Постановление Совета Народных Комиссаров УССР о создании Института электросварки — первого в мире специализированного центра научных и инженерных работ в области сварки. За короткое время было разработано несколько вариантов сварки: с автоматической подачей штучных электродов, электродной проволокой с обмазкой и с впрессованным флюсом. В Приказе по Народному комиссариату тяжелой промышленности от 23 мая 1936 г. № 869 «О развитии автоматической сварки» отмечались успехи ИЭС в создании сварочных автоматов.

Работа над совершенствованием дуговой автоматической сварки продолжалась. К началу 1940 г. был создан новый вид сварки — автоматическая дуговая сварка плавящимся электродом под слоем флюса. Был найден состав флюса и предложена кремнемарганцевая стальная электродная проволока (В. И. Дятлов). Стационарная сварочная головка была создана на основе дифференциального редуктора (П. П. Бушкетт). Новая технология оказалась на порядок более производительной, чем ручная дуговая сварка. Первая в мире монография (Е. О. Патона) «Скоростная автоматическая сварка под слоем флюса» вышла в 1940 г.

Конструкторская группы ИЭС спроектировала 20 типов установок для сварки узлов танков, САУ, авиабомб, торпед и др. (П. И. Севбо, В. Е. Патон). За годы войны автоматами сваривали 4 млн метров швов, было сэкономлено 5 млн кВт/ч электроэнергии. Всего за годы войны в Советском Союзе было выпущено 102857 танков и САУ. В США только в 1944 г. сумели разработать технологию автоматической сварки броневых сталей; в Германии вся бронетехника сваривалась ручными электродами, причем качество соединения было невысоким.

С 1944 г., после возвращения ИЭС в Киев, основной задачей института стала конверсия высокоэффективной военной технологии автоматической сварки для гражданского применения. Однако большинство изделий были сконструированы без учета условий, требующихся для применения автоматической сварки. Одна из идей Е. О. Патона заключалась в «расчленении» конструкций на узлы и сварке специализированными автоматами на отдельных позициях конвейерных линий. Путем совершенствования форм в ИЭС решались задачи технологичности сварных изделий, снижения их массы, уменьшения количества соединительных деталей. Примером изменения конструкций может служить решение проблемы массового производства вагонеток на Торецком машиностроительном заводе в Дружковке. Длина сварных швов составляла 24...72 м, а выполняли их вручную. Новая конструкция при общей



длине швов 12 м позволила совместить автоматическую сборку и сварку узлов с применением специальных установок. В результате процесс изготовления сократился в 20 раз.

Научные основы проектирования высокоэффективных источников питания и систем управления сварочными процессами были разработаны Б. Е. Патоном. Им впервые в мире была создана теория автоматического регулирования процессов дуговой сварки, предложены схемы простых и надежных сварочных головок.

Коллективу под руководством Е. О. Патона удалось совершить прорыв в создании принципиально нового оборудования — источников питания, аппаратов управления, универсальной мобильной сварочной аппаратуры (тракторов и шланговых полуавтоматов) и специализированной аппаратуры для массового производства однотипных изделий, и опередить мировое развитие такой техники на десятилетия.

Стремясь к унификации сварочного оборудования, коллектив конструкторов ИЭС (П. И. Севбо, В. Е. Патон и др.) во второй половине 1950-х гг. сконструировал сварочную головку АБС с постоянной скоростью подачи электродной проволоки. АБС и аппараты на ее основе выпускали несколько десятилетий. Универсальный сварочный автомат-трактор ТС-17 стал одним из основных средств механизации сварочных работ в народном хозяйстве страны (В. Е. Патон). Его конструкция послужила основой для большой гаммы аппаратов для дуговой сварки и развивается до сих пор. Были созданы тракторы для сварки за один проход на скользящей медной подкладке с формированием обратной стороны шва; универсальный двухдуговой трактор ДТС-23 и трехдуговая самоходная головка (В. Р. Лашкевич, В. Е. Патон, П. И. Севбо, А. И. Чвертко и др.).

В 1946–1948 гг. на Мариупольском заводе им. Ильича с участием ИЭС им. Е. О. Патона была построена высокомеханизированная линия для изготовления железнодорожных цистерн; применили автоматическую сварку трактором двух внутренних продольных, внутренних круговых, наружных продольных и наружных круговых швов. Внедрению автоматической сварки в судостроение способствовало создание электромагнитных стенов с флюсовыми подушками. В ИЭС им. Е. О. Патона разработали новую технологию непрерывного производства труб. Были спроектированы трубосварочный стан (Р. И. Лашкевич), схемы управления сварочным процессом (Б. Е. Патон), сварочные головки (В. Е. Патон) и технология высокопроизводительной сварки (Б. И. Медовар). В 1948–1949 гг. был смонтирован на Харцызском трубном заводе первый в СССР стан, на котором сборку и сварку двумя последовательно расположенными дугами выполняли в одном агрегате при стационарно установленной сварочной головке и подвижной трубе. Скорость сварки достигала 200 м/ч.

Впервые в мире была создана новая технология строительства крупногабаритных резервуаров (Г. В. Раевский). Стенку, крышу и днище сваривали автоматами под флюсом в цехах, полотнища сворачивали в транспортабельные рулоны и разворачивали на месте монтажа. Применение новой технологии в 5...10 раз ускорило строительство.

В 1948 г. впервые в мире была решена проблема дуговой автоматической сварки швов, расположенных в различных пространственных положениях. Был найден принцип принудительного формирования и кристаллизации металла ванны с помощью ползунов (Г. З. Волошкевич), которые передвигались по изделию вместе со



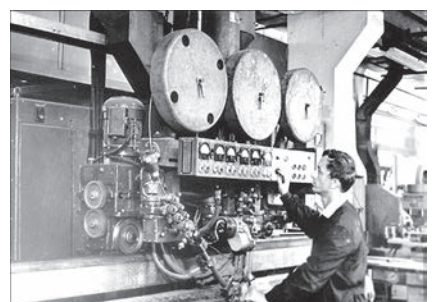
ТС-17 на трассе газопровода Дашава–Киев–Москва, 1950 г.



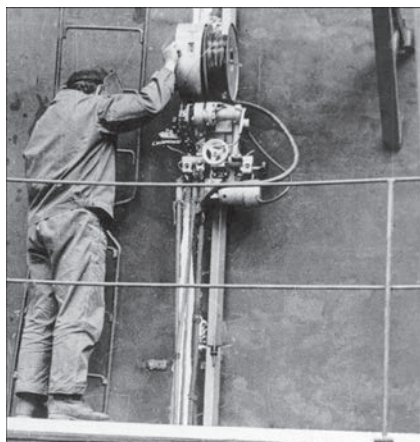
Сварка в углекислом газе, Николаев, 1950 г.



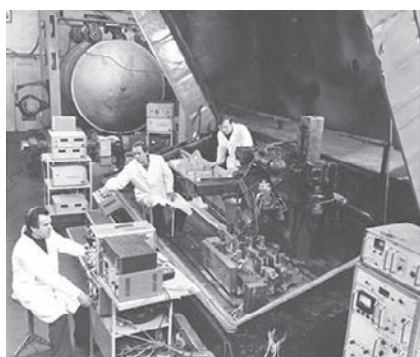
Автоматизация процесса сварки балок, 1951 г.



Установка скоростной трехдуговой сварки, 1952 г.



Автоматическая сварка вертикальных монтажных швов при строительстве моста им. Е. О. Патона, 1953 г.



Камера для электронно-лучевой сварки, Киев, 1954 г.



Демонстрация автоматической наплавки руководителям государства, 1957 г.

сварочной головкой. Новый технологический процесс стал основой для механизации дуговой сварки в различных пространственных положениях при строительстве домен, газгольдеров, корпусов судов, цельносварного моста им. Е. О. Патона через Днепр и других монтажно-строительных работах.

В 1949 г. впервые в мире создан способ электрошлаковой сварки (ЭШС), позволяющий соединять за один проход толстенные металлоконструкции (Б. Е. Патон, Г. В. Волошкевич). Создано принципиально новое оборудование для сварки проволочными электродами, электродами большого сечения и плавящимся мундштуком (аппараты и источники питания); технологическая оснастка для выполнения швов любой толщины, конфигурации и протяженности. На основе применения ЭШС были разработаны новые принципы конструирования сварно-литых, прокатно-сварных и сварно-кованых крупногабаритных многотонных металлоконструкций. Процесс ЭШС на Всемирной выставке в Брюсселе был удостоен высшей награды — Гран-при.

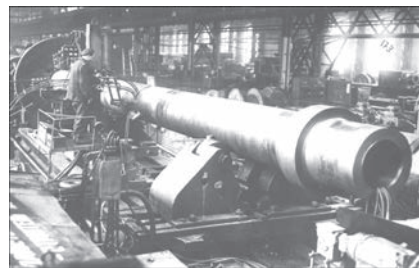
Важной восстановительной технологией стала наплавка. Для восстановления изношенных и повышения стойкости новых деталей наплавкой под специальными флюсами была сконструирована серия специального оборудования: автоматы для наплавки бандажей вагонных колес, вальцenaплавочные станки и др.

В 1944–1945 гг. Б. Е. Патон, разрабатывая теории автоматов, выдвинул идею интенсификации саморегулирования процесса плавления электрода и необходимости осуществления сварки при высокой плотности тока (до  $200 \text{ А/мм}^2$ ). Результаты этих исследований решили проблему механизированной сварки плавящимся электродом, под флюсом, в углекислом и в инертных газах. Новый способ полуавтоматической сварки под флюсом получил название «шлангового», так как электродная проволока подается к месту сварки по шлангу. Дуговая сварка в защитных газах обладает широкими возможностями автоматизации процессов выполнения швов различной геометрии во всех пространственных положениях. Для решения проблем разбрызгивания плавящегося электрода, управления плавлением основного металла, расширения диапазона свариваемых материалов и видов соединений в ИЭС им. Е. О. Патона были разработаны приставки к стандартным источникам питания и специальные источники, обеспечивающие управление электрическими параметрами режима по определенной жесткой программе или с автокоррекцией. Дуговая сварка в углекислом газе, созданная впер-

вые в мире совместно специалистами НИАТ, ИЭС им. Е. О. Патона, ВНИИЭСО, завода «Электрик», стала основой для механизации при строительстве стальных конструкций.

Под руководством Б. Е. Патона были развернуты широкомасштабные исследования контактной сварки, в том числе вторичных цепей машин, особенностей сварочного контакта, оплавления, возможностей повышения тепловой мощности и др. Максимальная механизация сборочно-сварочных работ в транспортном машиностроении, котлостроении, приборостроении и ряде других отраслей была обеспечена применением всех способов контактной сварки. Для точечной контактной сварки разработаны станки и малогабаритные клещи со встроенным трансформатором. На основе созданных впервые в мире принципиально новых трансформаторов — кольцевого и контурного типов — разработана гамма подвесных, стационарных и перемещаемых машин для стыковой сварки оплавлением рельсов и труб.

Был предложен ряд конструктивных решений, в том числе касающихся вторичного контура сварочной машины с пониженным сопротивлением короткого замыкания, различные типы регуляторов тока. Выдающимся вкладом в развитие сварки является изо-



ЭШС вала Варваринской ГЭС, 1959 г.



брение контурных трансформаторов (В. К. Лебедев, Н. Г. Остапенко). Кроме технологических и электротехнических проблем конструкторам пришлось решать сложную проблему снижения мощности и массы сварочных машин, обеспечения надежности работы сложных электросхем, механических и гидравлических узлов в полевых условиях. Впервые в мире были разработаны в комплексе технологии и основные узлы сварочных машин.

В 1950–1960-х гг. впервые в мире созданы сборочно-сварочные передвижные комплексы для сварки непрерывным оплавлением труб и железнодорожных рельсов в полевых условиях, установки для сварки оплавлением стержней, инструмента, профильного проката (В. К. Лебедев, С. И. Кучук-Яценко, В. А. Сахарнов и др.). В 1970-гг. впервые в мире для строительства трубопроводов диаметром 1420 мм созданы:

передвижной трубосварочный комплекс «Север» с аппаратом, перемещающимся внутри трубопровода; оборудование для сварки высокопрочной стержневой арматуры, используемой в строительных конструкциях, и деталей сложного профиля из высокопрочных алюминиевых сплавов для узлов авиационной и ракетной техники (В. К. Лебедев, С. И. Кучук-Яценко, В. А. Сахарнов и др.). Применение контактной сварки непрерывным оплавлением обеспечило расширение номенклатуры изделий, повышение производительности, снижение расхода электроэнергии до двух раз, потребляемой мощности в 3...4 раза.

В середине 1950-х гг. в ФРГ, США, СССР (в ИЭС им. Е. О. Патона — Б. А. Мовчан, Г. С. Крыштаб, в Московском энергетическом институте — Н. А. Ольшанский) были начаты исследования электронно-лучевых процессов и разработка оборудования для таких видов электронно-лучевых технологий, как сварка, плавление, испарение. В 1960-х гг. продолжался интенсивный поиск средств формирования мощных лучей (О. К. Назаренко, В. Е. Локишин и др.), разработка высоковольтных источников питания, систем управления лучом (В. Д. Шелягин, Ю. Н. Ланкин, Г. И. Лесков, Е. И. Истомин и др.). Были созданы электронно-лучевые пушки с мощностью пучка 0,1...100 кВт и ускоряющим напряжением 10...200 кВ.

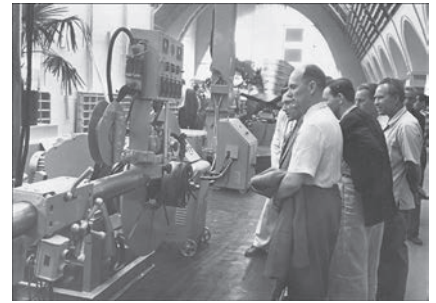
В 1967 г. впервые в мире в ИЭС им. Е. О. Патона создана подводная механизированная дуговая сварка и резка порошковой проволокой в неограниченном пространстве, не требующая для проведения подводных работ водолазных камер. Разработан ряд погружных полуавтоматов, установок для орбитальной сварки стыковых соединений, автоматической приварки грузоподъемных проушин и других уникальных изделий на глубинах до 1 км (В. Е. Патон и др.).

В 1964 г. началось проектирование сварочной установки для экспериментов в космосе. Были учтены требования, предъявляемые к бортовой аппаратуре по весовым характеристикам и надежности. Особенностью было функционирование высокотемпературных источников нагрева с потенциально высокой поражающей способностью на летающем объекте. Процессы дуговой и электронно-лучевой сварки на аппарате «Вулкан» были автоматизированы. Первый в мире технологический эксперимент в космических условиях был осуществлен на борту орбитального корабля «Союз-6» 11–16 октября 1969 г. космонавтом В. Н. Кубасовым.

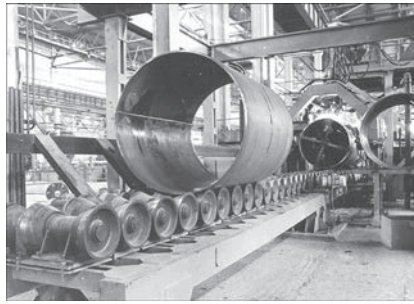
Оригинальные технологии и конструктивные решения, созданные в ИЭС им. Е. О. Патона, послужили основой для создания техники нового поколения во многих странах мира.



Испытания аппарата контактной стыковой сварки рельсов, 1960 г.



Делегация ИЭС на ВДНХ СССР во главе с Б. Е. Патonom, Москва, 1960 г.



Автоматическая сварка на Харцызском трубном заводе, 1961 г.



Установка «Вулкан» для сварки и резки в космосе (В. Н. Кубасов и А. А. Загребельный, г. Киев, 1968 г.)

# ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТИЗАЦИИ В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ (ОБЗОР)

А. А. МАЗУР, О. К. МАКОВЕЦКАЯ, С. В. ПУСТОВОЙТ

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

Представлена систематизированная экономико-статистическая информация о развитии автоматизации и роботизации в сварочном производстве. Главной особенностью мировой экономики на современном этапе является использование передовых автоматизированных (роботизированных) систем. Уменьшение затрат на переоснащение предприятий вследствие снижения стоимости роботов, компьютерных числовых контроллеров, аппаратных средств автоматизации и программного обеспечения способствует инвестированию в автоматизацию промышленного производства. Библиогр. 14, табл. 4, рис. 8.

*Ключевые слова:* сварка, автоматизация, роботизация, сварочные роботы

Главной особенностью мировой экономики на современном этапе является переход от эры промышленной автоматизации к всемерному использованию передовых автоматизированных/роботизированных систем в производстве. Широкое внедрение информационных и компьютерных технологий изменило концепцию автоматизации современного производства, и дало потенциал для ее глобального роста. Рынок средств и технологий автоматизации стал привлекательным для инвестиций во всем мире. Средний ежегодный рост продаж на мировом рынке автоматизации производства в течение последних 10 лет составил около 6,6 %; объем продаж в 2015 г. превысил 185 млрд дол. США, а к 2024 г., по прогнозу [1], достигнет 352 млрд дол. США.

Основной причиной привлекательности инвестирования в автоматизацию промышленного производства стало существенное уменьшение затрат на переоснащение предприятий. Снижение стоимости роботов, компьютерных числовых контроллеров, аппаратных средств автоматизации (датчики, процессоры), программного обеспечения привело к сокращению срока окупаемости технологического оборудования и инвестиций. Средняя цена робота в 2015 г., по сравнению с 2000 г., снизилась на 30 %. Как пример можно привести данные о стоимости робота для точечной сварки. По данным Бостонской исследовательской компании (BSG) его стоимость снизилась на 27 % — в среднем от 182 тыс. дол. США до 133 тыс. дол. США (по сравнению с 2005 г.), а к 2025 г. ее снижение составит еще 22 %. В ближайшее десятилетие ожидается снижение цен на аппаратное и программное обеспечение, которое составит свыше 20 %.

Динамика изменения структуры стоимости типового робота для точечной контактной сварки в

автомобилестроении, согласно данным [2, 3], приведена на рис. 1 [3]. На период до 2025 г. ожидается снижение затрат на управление проектами внедрения роботов на производстве, уменьшение расходов на системную инженерию, поскольку в основном достигнуты преимущества оффлайн программирования. За счет устранения защитных ограждений и датчиков будут сокращены затраты на периферийные устройства. Незначительно снизится стоимость самих роботов (включая программное обеспечение), поскольку она становится близка к издержкам на материалы, а объем производства для автомобильной промышленности уже высок.

В то же время, в соответствии с прогнозом, производительность робототехнических систем будет ежегодно возрастать примерно на 5 %. В настоящее время роботы выполняют более 10 % всех производственных операций, а к 2025 г. уже более 40 % всех производственных операций в промышленности будет выполняться роботами.

Стоимость, тыс. дол. США

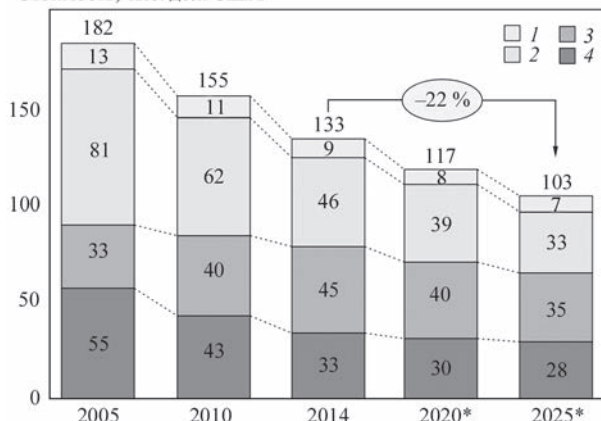


Рис. 1. Динамика изменения структуры стоимости системы типового робота точечной сварки в автомобильной промышленности США (\* — прогноз): 1 — управление проектом; 2 — системная инженерия; 3 — периферийные устройства; 4 — робот



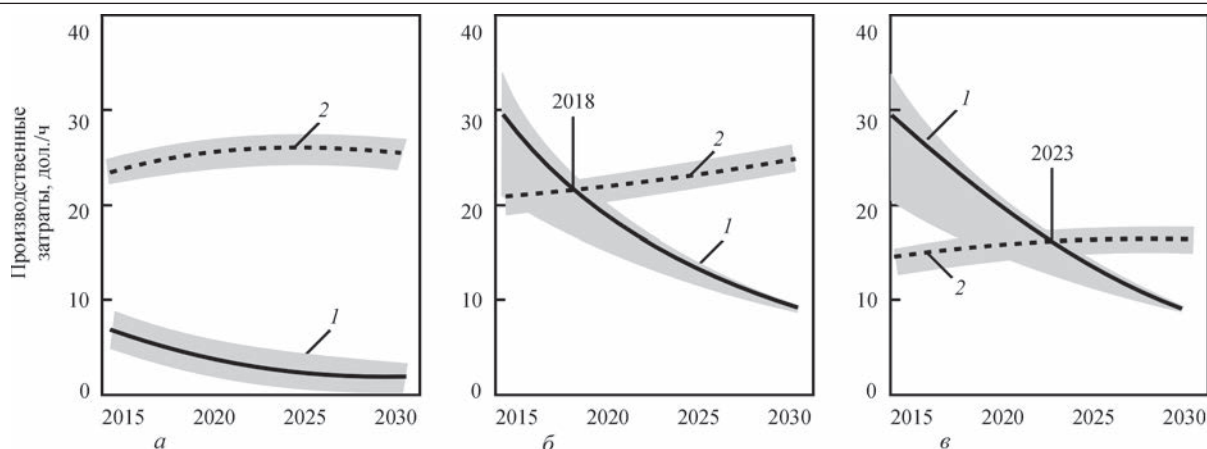


Рис. 2. Сравнение производственных затрат при использовании роботов (1) и труда рабочего (2) в ряде отраслей промышленности США: а — автомобилестроение; б — электрооборудование; в — мебельное производство

Неуклонное снижение стоимости робототехники делает ее более привлекательной для малого и среднего бизнеса и открывает новые возможности ее широкого применения, а это позволит повысить производительность труда во многих сферах деятельности.

Весомой причиной внедрения робототехники в промышленности является также дефицит рабочей силы на мировом рынке труда. По данным Американского сварочного общества дефицит сварщиков в США в 2020 г. составит около 290 тыс. рабочих и эти рабочие места будут замещены роботами. В соответствии с докладом ARK Invest «Будущее автоматизации» к 2035 г. примерно половина рабочих мест в США будут автоматизированы и роботизированы. В докладе отмечается, что автоматизация увеличит добавочную стоимость труда на один долларовый выпуск на 103 %, добавив 12 трлн. дол. США к общему реальному ВВП. Повышенная производительность, обеспечиваемая автоматизацией, окажет большое влияние на экономический рост, причем реальный ВВП на одного рабочего в США удвоится с 113 тыс. дол. США в 2013 г. до 236 тыс. дол. США в 2035 г. или в годовом исчислении на 3,4 %. [3, 4].

Данные, представленные на рис. 2 [3], показывают, что робототехника уже является экономически жизнеспособной альтернативой труда человека во многих отраслях промышленности США.

Современный рынок становится все более динамичным. Сокращение жизненного цикла продукта, необходимость быстрой смены линейки выпускаемой продукции, учет индивидуальных потребностей и пожеланий заказчика при производстве продукции — залог успеха в конкурентной борьбе на мировом рынке. Все это требует быстрой адаптации, большей точности и согласованности на производственной линии, что сложно осуществить, используя труд рабочих, но становится возможным при автоматизации процесса производства, а это также определяет рост по-

требности в универсальном и программируемом автоматизированном оборудовании. Одним из решений этих задач стало создание нового поколения робототехники — коллаборативной, направленной на совместную работу робота и человека, которое уже начинает вытеснять поколение «изолированных» роботов.

Современные исследования показывают, что совместная работа робота и человека на 80 % продуктивнее, чем работа каждого по отдельности. Короботы — это новые роботы, созданные пионерами рынка (Baxter от компании Rethink Robotics, Universal Robot) и мировыми лидерами, такими как ABB и KUKA. Разработчики короботов доказали, что фактически любого современного робота можно превратить в сертифицированного коробота, полностью безопасного для человека, для этого достаточно лишь перестроить его систему управления, научив её «слушать» новые сенсоры.

В 2008 г. Universal Robots продал первый в мире кобот, как их прозвали в мире — задолго до того, как термин для этого нового класса роботов был широко использован. Сегодня это самый быстрорастущий сегмент мирового рынка робототехники, который по прогнозу аналитиков будет ежегодно увеличиваться на 50 % и ожидается, что в 2020 г. его объем достигнет \$ 3 млрд дол. США [5].

В сегменте средств автоматизации наиболее динамично растет спрос на промышленные роботы (ПР), которые в структуре мирового рынка автоматизации составляют около 4 %, а в структуре мирового рынка средств автоматизации на их долю приходится 17 %. Промышленные роботы выполняют технологические операции быстрее и точнее людей, обеспечивают повышение производительности и снижение общих издержек производства как в развивающихся, так и развитых странах.

Динамика развития мирового рынка автоматизации за 2011–2015 г. представлена в табл. 1 [6].

Рост доходов от продаж в сегменте робототехники более чем на 40 % превышает средний рост

доходов от продаж в сегменте средств автоматизации и на 15 % средний рост доходов на рынке автоматизации в целом.

По данным Международной федерации робототехники (IFR) с 2010 г. по 2015 г. средний ежегодный рост продаж ПР на мировом рынке составил 16 %, а среднегодовые продажи ПР выросли до 183 тыс. ед. Увеличение продаж почти на 60 % свидетельствует о значительном росте спроса на ПР и инвестиций во всем мире. Стоимостной объем рынка ПР в 2015 г. по отношению к предыдущему году увеличился на 9 % и достиг нового максимума — 11,1 млрд дол. США, а с учетом программного и аппаратного обеспечения — составил 35 млрд дол. США (+15,5 %).

Мировой парк ПР в 2015 г. превысил 1664 тыс. ед., но фактическая численность действующего парка ПР, вероятно, значительно больше, поскольку на практике большинство ПР успешно эксплуатируется и после истечения их нормативного срока службы (12–15 лет). По прогнозу IFR мировой парк ПР в 2019 г. составит 2,6 млн ед. — на 1 млн больше, чем в 2015 г.

В табл. 2 приведены данные о количественном объеме ежегодных продаж и парке ПР в мире и основных регионах в 2010, 2014 и 2015 г., а также оценка на 2016 г. [7].

За последние шесть лет применение ПР почти утроилось в основном за счет стран Азии. Рынок азиатского региона — крупнейший, быстро растущий региональный рынок, который составляет более половины мирового рынка ПР. Мировыми лидерами являются Китай, Республика Корея, Япо-

ния, а также США и Германия — их суммарная доля составляет более 75 % мирового рынка.

В 2015 г. продажи ПР в азиатском регионе выросли на 20 % и составили 156 тыс. ед. Китай лидирует по росту продаж как на региональном, так и мировом рынке ПР. В 2015 г. объем реализации ПР в Китае достиг 68,6 тыс. ед., что составило 44 % всего объема продаж в азиатском регионе. В соответствии с данными China Robot Industry Alliance (CRIA) в Китае значительно выросло собственное производство ПР. Объем реализации ПР китайского производства на внутреннем рынке в 2015 г. увеличился на 29 % и составил около 20,4 тыс. ед., а по сравнению с 2013 г. производство увеличилось более чем в 2 раза. Данные о динамике реализации ПР в Китае национального и зарубежного производства представлены на рис. 3 [8].

В 2015 г. продолжился тренд роста продаж ПР и в других странах азиатского региона — Республике Корея (+55%; 38,3 тыс. ед.), Японии (+20 %; 35,0 тыс. ед.), Тайване (+4 %; 7,2 тыс. ед.) и др.

На европейском рынке в 2015 г. объемы продаж ПР выросли на 10 %, при этом основными его сегментами являются Германия (20,1 тыс.

Таблица 1. Динамика роста дохода от продаж основных продуктовых сегментов на мировом рынке средств автоматизации 2011–2015 гг., %

Доход от продаж	2011	2012	2013	2014	2015
Средства автоматизации, всего включая:	5,9	4,3	5,3	5,3	5,5
роботы	6,6	8,3	8,6	7,5	7,5
средства «машинного зрения»	6,6	3,7	7,1	6,2	6,7
сенсоры	5,6	3,6	3,6	4,2	4,2
реле и переключатели	5,5	3,5	3,6	4,2	4,3
устройства движения	4,9	1,5	3,7	4,3	4,4
другие	6,5	6,0	6,0	6,0	6,0

Объем реализации ПР, тыс. ед.

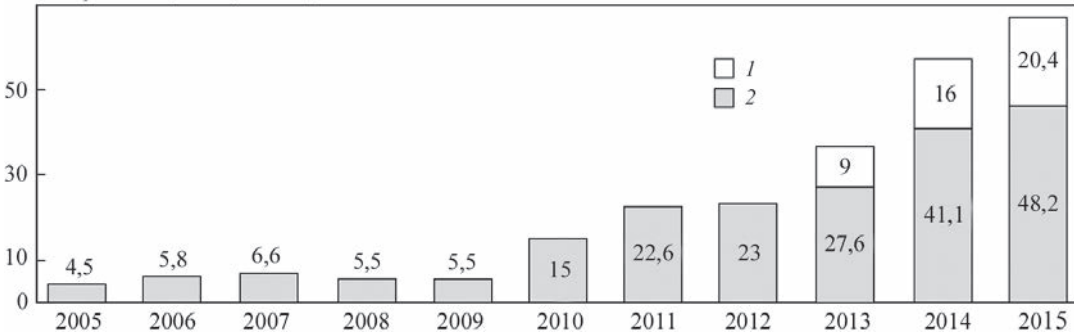


Рис. 3. Динамика реализации ПР в Китае национальных (1) и зарубежных (2) производителей

Таблица 2. Количество ежегодных продаж ПР и общий парк ПР всех типов и назначений в регионах мира в 2010–2016 гг., ед.

Регион	Ежегодные продажи ПР				Парк ПР			
	2010	2014	2015	2016 (оценка)	2010	2014	2015	2016 (оценка)
Всего в мире, в том числе:	120585	220571	253748	290000	1059162	1467900	1664000	1824000
Америка	17114	32616	38134	40200	179785	249500	272000	281000
Азия (вкл. Австралию)	69833	134444	160558	190200	520831	777100	1417000	908500
Европа	30741	45559	50073	54200	352142	411500	519000	431700
Африка	259	428	348	400	2232	4200	4500	4900



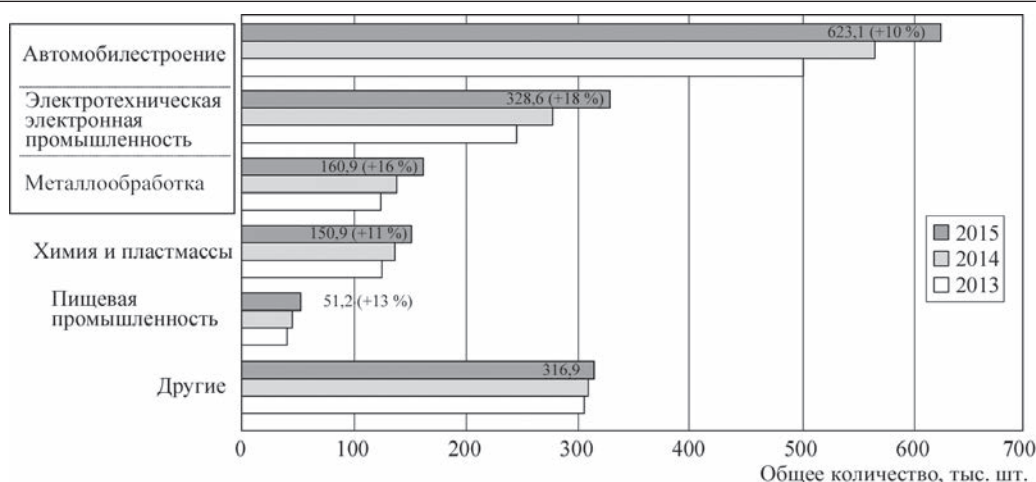


Рис. 4. Количество ежегодно устанавливаемых ПР в отраслях — основных потребителей ПР, ед.

ед.), Италия (6,7 тыс. ед.) и Испания (3,8 тыс. ед.). Важным региональным рынком ПР является и Северная Америка. Объемы продаж в США выросли на 3 % и составили 27,5 тыс. ед., а в Мексике увеличились в два раза и составили 5,5 тыс. ед.

Суммарно более 70 % всех продаж ПР приходится на отрасли автомобилестроения, электротехническую и металлообрабатывающую промышленность. Основной потребитель ПР и главная движущая сила развития современной робототехники — автомобилестроение, доля которого составляет более 40 % всех продаж ПР в мире. В 2015 г. в отрасли было установлено 97,5 тыс. роботов, что является новым рекордом за последние пять лет.

Значительно возросло потребление ПР также в электротехнической/электронной промышленности при производстве компьютеров, медицинских, прецизионных и оптических инструментов, телекоммуникационного оборудования и другой продукции. В 2015 г. объемы реализации ПР в этой отрасли увеличились на 41 % и достигли нового пика — 64,6 тыс. ед. В металлообрабатывающих отраслях промышленности в 2015 г. также был отмечен значительный рост продаж ПР (+39 %).

С каждым годом непрерывно растет число тех профессий, которые роботы успешно осваивают. Согласно данным IFR уже в начале 2013 г. в автомобилестроении роботы задействованы в техно-

логическом цикле уже больше чем на 80 % всех операций, а в начале XXI века этот показатель составлял 45 % [7].

На рис. 4 [9] приведены данные о ежегодно устанавливаемых ПР в течение 2013–2015 гг. в основных отраслях потребителей ПР в мире. На рис. 5 [10] показано как изменялась динамика доли продаж ПР в автомобилестроении в 2005–2015 гг. .

Несмотря на значительный рост рынка ПР средний уровень автоматизации промышленного производства в мире остается достаточно низким. В 2015 г. среднемировой показатель плотности роботов (количество ПР на 10 тыс. занятых в промышленном производстве) составил 55 ед. По показателю плотности ПР Республика Корея, Япония и Германия относятся к числу стран, промышленное производство которых в наибольшей степени автоматизировано. Этот показатель в 2015 г. составил: Республика Корея — 478 ед., Япония — 314 ед., Германия — 292 ед. на 10 тыс. занятых в промышленности.

Наблюдается значительное отставание в уровне роботизации отраслей общего машиностроения по сравнению с автомобилестроением. В промышленно развитых странах уровень роботизации отраслей общего машиностроения в 7–8 раз меньше чем в автомобилестроении, а странах БРИК — в 19 раз. Это является стимулом и потенциалом развития рынка робототехники как в промышленно развитых странах, так и в странах с развивающейся экономикой. На рис. 6 [9] приведены данные показателя об уровне роботизации в автомобилестроении и отраслях общего машиностроения Японии, Германии, США и ряда других стран мира [7, 9].

Автомобилестроение по сравнению с другими отраслями промышленности является наиболее автоматизированной отраслью. В наибольшей степени предприятия автомобилестроения роботизированы в Японии, Республике Корея, Герма-



Рис. 5. Динамика изменения структуры ПР в автомобилестроении (1) и других отраслях машиностроения (2), %

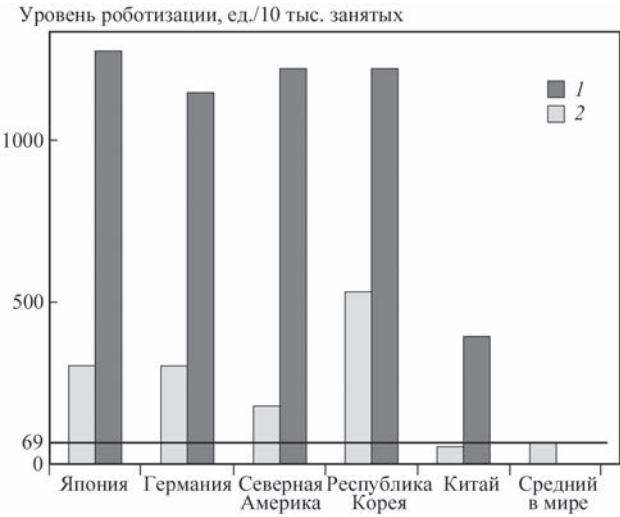


Рис. 6. Плотность ПР в автомобилестроении (1) и отраслях общего машиностроения (2) в 2015 г.

нии и США. Высокий уровень роботизации электронной промышленности наблюдается в Японии и Республике Корея.

Эксперты компании KUKA, используя данные IFR, оценили уровень роботизации отраслей общего машиностроения в десяти странах/регионах мира, в которых сосредоточено 80 % мирового рынка отраслей общего машиностроения, по объему продаж ПР в 2013 г. Результаты проведенного анализа [11, 12] приведены на рис. 7 [11].

Как показывают данные (см. рис. 7) в промышленно развитых и развивающихся странах в большинстве отраслей общего машиностроения имеется значительный потенциал для роста рынка ПР.

Наибольшим спросом на мировом рынке ПР пользуются роботы для обработки материалов: их парк составляет 38 % всего мирового парка ПР и включает роботы для процессов литья, термической обработки, штамповки/ковки.

Роботы для осуществления процесса сборки составляют около 10 %, нанесения покрытий — 4 %, специальных процессов (лазерная и плазменная резка, гидроабразивная резка и др.) — 2 % мирового парка ПР (рис. 8 [7]).

В рамках глобального исследования рынка робототехники компания BSG прогнозирует, что до 2025 г. среднегодовые темпы его роста в 10,4 %. В том числе порядка 10,1 % годового роста продаж роботов в производстве — для сварочных, сборочных, покрасочных, погрузочно-разгрузочных и других видов работ. Объем продаж вырастет с 5,8 млрд дол. США (в 2010 г.) до 24,4 млрд дол. США (в 2025 г.). Таким образом, данный сегмент робототехники, несмотря на меньшие темпы роста, сохранит за собой большую долю рынка робототехники. Порядка 8,1 % годового роста продаж приходится на роботов, используемых для военных целей — в первую очередь беспилотных летательных аппаратов, военных экзоскелетов,

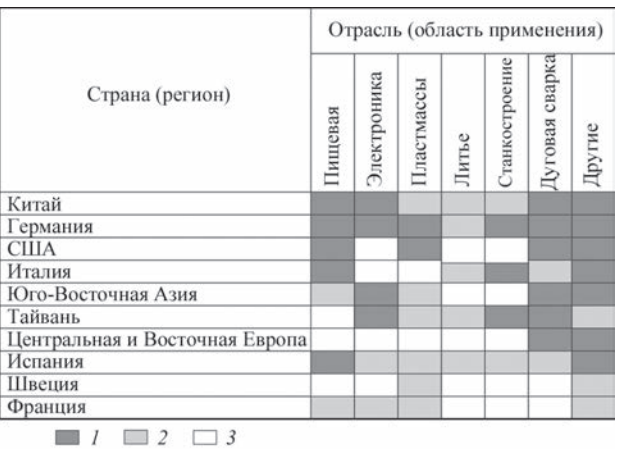


Рис. 7. Оценка уровня роботизации отраслей общего машиностроения в региональном разрезе по количественному объему годовых продаж ПР: 1 — высокий (более 300 ед.); 2 — средний (150...300 ед.); 3 — низкий (менее 150 ед.)

подводных аппаратов и наземных транспортных средств. Объем их продаж к 2025 г. увеличится до 16,5 млрд дол. США. Например, в России доля военных роботов составляет около 50 % всего парка ПР [3].

По оценке IFR и ряда аналитических компаний сварочные роботы составляют 25...30 % мирового парка ПР или около 500 тыс. ед. Они включают преимущественно роботы для дуговой и точечной сварки. Как в количественном, так и в стоимостном выражении в структуре мирового рынка сварочных роботов доля роботов для дуговой и точечной сварки составляет около 50 %.

По регионам структура рынка сварочных роботов заметно отличается. На европейском и американском рынке доминируют роботы для точечной сварки (около 70 %), а на рынках стран Азии — роботы для дуговой сварки (60...70 %).

В течение 2008–2015 гг. объем продаж на мировом рынке сварочных роботов увеличился почти на 50 % — с 33 до более 59 тыс. ед. Основную долю рынка (более 70 %) занимают страны Северной Америки (23 %), Китай (21 %), Европа (18 %) и Япония (10,5 %) [13].



Рис. 8. Структура продаж ПР по видам технологических операций за 2015 г.



Таблица 3. Мировой рынок сварочных роботов в 2015 г.

Страна	Роботы для дуговой сварки		Роботы для точечной сварки		Всего	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%
Европа	3400	32,1	7200	67,9	10600	17,9
Россия и СНГ	330	60,0	220	40,0	550	0,9
Китай	7,600	61,8	4700	38,2	12300	20,7
Корея	3 000	61,9	1850	38,1	4850	8,2
Япония	3520	56,6	2700	43,4	6220	10,5
Тайвань	780	75,7	250	24,3	1030	1,7
Индия	810	40,3	1200	59,7	2 010	3,4
ASEAN	2550	54,3	2150	45,7	4700	7,9
Ближний Восток	260	47,3	290	52,7	550	0,9
Африка	270	54,0	230	46,0	500	0,8
Океания	320	49,2	330	50,8	650	1,1
Северная Америка	4800	34,8	9000	65,2	13800	23,3
Центральная и Южная Америка	770	50,7	750	49,3	1520	2,6
<b>Всего</b>	<b>28410</b>	<b>47,9</b>	<b>30870</b>	<b>52,1</b>	<b>59,280</b>	<b>100,0</b>

Source: The Japan Welding News for the World.

Мировой рынок сварочной техники в 2016 г. достиг 24,2 млрд дол. США. В ближайшие пять лет ожидается средний ежегодный рост рынка на 5,6 %. В структуре этого рынка сегмент роботизированного сварочного оборудования составляет около 12 % (2,8 млрд дол. США), при этом ожидается, что его средний ежегодный рост составит около 7 %.

В региональной структуре продаж мирового рынка сварочных роботов на страны азиатского региона приходится почти 60 % (на Китай — 21 %), Европы — 18 % и Северной Америки — 23 %. Доля сварочных роботов в структуре продаж на национальных рынках ПР колеблется от 20 % в Малайзии до 62 % в Индии. В Китае этот показатель в 2015 г. составил 36 %, Бразилии — 38 %, России — 24 %.

По данным издания The Japan Welding News в 2015 г. в мире было установлено более 59 тыс. сварочных роботов, из которых 52 % — роботы для контактной сварки и 48 % — роботы для дуговой сварки. В табл. 3 приведены данные рынка сварочных роботов в 2015 г. [13].

Мировой рынок сварочных роботов находится на подъеме и демонстрирует в последние годы постоянный рост, чему в значительной степени способствуют высокие темпы роста отрасли автомобилестроения в таких странах, как Индия и Китай. Наблюдается значительный спрос на сварочных роботов в отрасли общего машиностроения.

Сдвиг мирового промышленного производства в азиатский регион способствовал снижению цен на сварочные роботы в краткосрочной и среднесрочной перспективе. Это позволило также сократить время окупаемости роботизации процессов сварки и способствует увеличению применения сварочных роботов на предприятиях малого и среднего бизнеса.

Осуществлять постоянный мониторинг и контроль параметров сварки стало возможным при оснащении современных сварочных роботов системами слежения (машинного зрения). Широкое распространение получила интеграция в робототехнические системы для дуговой сварки 3D визуальных систем контроля.

В долгосрочной перспективе прогнозируется значительный рост доходов в секторе роботов для дуговой сварки, поскольку они находят все большее применение в отраслях общего машиностроения, где ручная и механизированная сварка все чаще заменяется роботизированной сваркой.

Поддержание рентабельности в условиях снижения стоимости сварочных роботов стала сегодня серьезной проблемой для производителей ПР во всем мире. Цена становится основным критерием для клиентов при выборе сварочных роботов, так как они стараются снизить капитальные затраты. Поставщикам робототехники приходится все теснее сотрудничать с разработчиками систем автоматизации производственных процессов и производства в целом и разрабатывать индивидуальные решения в соответствии с требованиями конечных пользователей.

Чтобы повысить совместимость различных компонентов, участвующих в технологическом процессе сварки, производители сварочных роботов стремятся наладить партнерские отношения с поставщиками источников питания и другой сварочной техники.

Сегодня на рынке ПР все большим спросом пользуются гибкие и адаптивные роботы, которые подходят для смешанных и многоцелевых производственных линий [13].

Постоянная работа по совершенствованию и разработке принципиально новых конструкций ПР позволила существенно улучшить технико-экономические показатели предлагаемых

**Таблица 4.** Сопоставление технико-экономических показателей ПР компании KUKA, % (показатели 1980 г. приняты за 100 %)

Показатель	2000 г.	2010 г. (серия Quantec)
Себестоимость изготовления	30	20
Масса	50	40
Количество деталей	30	20
Время сборки	20	15
Затраты на техническое обслуживание	30	30
Производительность	200	300

сегодня на рынке ПР. Примером этого может служить приведенное в табл. 4 сопоставление некоторых технико-экономических показателей ПР, разработанных компанией KUKA [11, 14].

В заключение следует отметить, что промышленные роботы сегодня являются ключевым элементом революционных преобразований производства. Функции, выполняемые ПР, уже давно вышли за пределы выполнения традиционных повторяющихся задач.

Новое поколение ПР отличает такие чисто «человеческие» черты и возможности как разум, ловкость, память, обучаемость и распознавание объектов. Уменьшение размеров, повышение быстродействия, снижение стоимости ПР с одной стороны и необходимость повышения качества, производительности и гибкости производства стали основными факторами роста спроса на робототехнику и расширение областей ее применения.

Робототехника дает возможность революционным образом изменить процесс промышленного производства, способствует комплексному решению задач улучшения качества и повышения производительности, экономии материальных, энергетических и человеческих ресурсов на новом технологическом уровне.

Зачастую применение роботов — это сегодня единственно верный способ выживания в условиях конкуренции не только крупносерийного, но уже среднего и малого производства. Применение промышленных роботов — это уже не прерогатива только крупных промышленных корпораций и крупносерийных концернов.

На сегодня адекватная цена и гибкость построения роботизированных технологических комплексов позволяют применять такое оборудование не только при организации производства промышлен-

ленно-поточным методом, но также на небольших и средних предприятиях.

## Список литературы

1. RBC Global Assist Management (2016) *Global megatrends: automation in emerging markets*. <http://www.rbcgam.us>
2. Industrial Automation Market – Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast 2016–2024. (2016). <http://www.prnewswire.com/>
3. The Boston Consulting Group Inc. (2015) *The Robotics Revolution/ the net great leap in manufacturing*. <http://www.bcg.com>
4. ARK Invest. *The Future Automation. White Paper* <http://www.ark-invest.com>
5. *Universal Robots and... the Cobots*. <http://www.universal-robots.com>
6. *Global Industrial Automation* (2012) Credit Suisse. Global Equity Research. (14 August 2012), 102.
7. International Federation of Robotics (2016) *World Robotics 2016 Industrial Robots*.
8. Roehricht K. (2016) *Study on emerging markets, with special focus on Asia*. <http://www.eu-robotics.net>
9. Heagele M. (2016) *An outlook for robots (in industry and service)* Fraunhofer Stuttgart, IPA.
10. Robots. <https://www.macquarieresearch.com/ideas/api/static/file/publications/7303318/Robots230916e254524.pdf>
11. Mohnen P. (2012) *KUKA AG German Corporate Conference Company Presentation*. KUKA AG, January 21.
12. KUKA (2015) *Hello Future*. Annual Report.
13. (2016). World demand for welding robots. *The Japan Welding News for the World*, 20, 77, 9.
14. Spitzauer A. (2012) *KUKA AG Company Presentation*. KUKA AG, September.

О. А. Мазур, О. К. Маковецька, С. В. Пустовойт

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.

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

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

## ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ АВТОМАТИЗАЦІЇ І РОБОТИЗАЦІЇ В ЗВАРЮВАЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ (Огляд)

Представлено систематизовану економіко-статистичну інформацію про розвиток автоматизації і роботизації в зварювальному виробництві. Головною особливістю світової економіки на сучасному етапі є використання передових автоматизованих (роботизованих) систем. Зменшення витрат на переоснащення підприємств внаслідок зниження вартості роботів, комп'ютерних числових контролерів, апаратних засобів автоматизації та програмного забезпечення сприяє інвестуванню в автоматизацію промислового виробництва. Бібліогр. 14, табл. 4, рис. 8.

**Ключові слова:** зварювання, автоматизація, роботизація, зварювальні роботи

Поступила в редакцію 14.04.2017

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ

А. Е. КОРОТЫНСКИЙ, М. И. СКОПЮК

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

Тенденцией современного этапа развития техники является ее интеллектуализация. В большей степени это относится к сварочному оборудованию, где одним из важных вопросов является интеллектуализация контроля основных параметров дуговых процессов. В предлагаемой работе рассмотрены вопросы построения многофункциональных датчиков, структуры которых унифицированы согласно стандарта IEEE 1451.4. Приведены системы измерительных уравнений, которые позволяют контролировать параметры сварки с минимальными методическими погрешностями в режиме реального времени. Библиогр. 12, табл. 1, рис. 4.

*Ключевые слова:* интеллектуальный датчик, многофункциональный датчик, измерительное уравнение, параметры сварки, погрешность

Общий подход в построении интеллектуальных датчиков (ИД) был предложен Дж. Бригнелем и А. Дори в 1983 г. [1]. Чувствительный элемент (ЧУ) такого типа датчика подключается к контролируемой цепи посредством коммутатора (К), который управляется встроенным микропроцессором (МП). Последний в соответствии с выбранными алгоритмами и разработанными программами управляет всеми измерительными процедурами, а также задает режимы внутреннего автоконтроля. Это может касаться контроля температуры окружающей среды, слежения за напряжением дрейфа нуля аналоговых систем и т. д. Различные архитектуры ИД подробно описаны в работе [2].

Всеобщая информатизация, которая рассматривается как один из элементов интеллектуализации общественной жизни, затронула развитие и сенсорных устройств. Если раньше результаты измерений обрабатывались почти вручную, то на современном этапе развития микропроцессорной техники вся обработка (масштабирование, калибровка, шумоподавление и т. д.) может осуществляться микропроцессорным блоком, который присоединен к чувствительному элементу (ЧЭ) сенсора. Такие устройства называют интеллектуальными сенсорами (Smart Sensors) [3, 4]. При этом к интеллектуальным сенсорам предъявляется ряд дополнительных требований. Современный сенсор, кроме ЧЭ, должен содержать средства обработки сигнала, коммутационные средства, автономное электропитание, интерфейс потребителя, средства защиты от влияния внешней среды, средства, которые позволяют идентифицировать как сам сенсор, так и его место установки (место снятия данных).

Современные тенденции построения измерительных систем направлены на создание интеллектуальных сенсоров, которые интегрированы в одно

кристалле. Такие сенсоры могут содержать целые интеллектуальные многопараметрические (многоканальные) измерительные системы (lab-on-chip) [5].

Инженеры-исследователи и проектировщики, с целью создания нужных потребителю сенсорных устройств, работают над уменьшением их стоимости, размеров и уровней потребления; улучшением метрологических параметров (чувствительность, точность, линейность и т. д.); стандартизацией процесса связи через шины интерфейсов или системы беспроводной связи; унификацией изготовления и эксплуатации посредством стандартизации.

Реальным первым шагом в направлении глобальной «интеллектуализации» датчиков можно считать международный стандарт IEEE 1451.4, который устанавливает основные требования к первичным измерительным преобразователям.

Институт электротехники и радиоэлектроники (The Institute of Electrical and Electronics Engineers — IEEE) разработал стандарт IEEE 1451.4 [6] как один из элементов комплексного протокола IEEE 1451. Одной из целей стандарта IEEE 1451 является упрощение подключения сенсоров к измерительным устройствам, средствам обработки сигналов и компьютерным сетям. Стандарт определяет набор интерфейсов и структуру программного обеспечения, а также определяет основные процедуры информационного обмена.

Блок стандартов IEEE 1451.4 регламентирует использование в составе компьютеризированных измерительных анализаторов уже существующие аналоговые измерительные преобразователи физических величин. Согласно стандарта каждый используемый измерительный преобразователь должен иметь электронный паспорт датчика (Transducer Electronic Data Sheet TEDS).



Стандарт IEEE 1451.4 для электронного паспорта определяет процедуры табличных описаний сенсора (TEDS — Transducer Electronic Data Sheets), которые, кроме базовых сведений (тип сенсора, серийный номер, место установки и т. д.) может содержать таблицы калибровки и линеаризации. Блок-схема использования TEDS в интеллектуальных сенсорах и сенсорных системах показана на рис. 1.

Интерфейс датчика содержит традиционный аналоговый канал и недорогой последовательный цифровой канал, по которому осуществляется доступ к структуре TEDS. В IEEE1451.4 описывается механизм поддержки аналоговыми датчиками режима работы с самоописанием и протокол обмена по последовательному каналу. Наличие аналогового интерфейса диктуется необходимостью обеспечения совместимости ранее произведенных и установленных датчиков с технологией Plug&Play.

Основной отличительной особенностью предлагаемого подхода является использование технологии TEDS для практической реализации алгоритмов функционирования различных типов датчиков, предназначенных для контроля сварочных процессов. Дальнейшее развитие ИД с учетом требований описанного стандарта пошло по пути создания многофункциональных реконфигурируемых структур [7], а также было направлено на синтез алгоритмов их функционирования, которые бы учитывали специфику их работы в конкретной окружающей среде, например, в зоне сварочной дуги, которая создает большое количество дестабилизирующих факторов. Именно анализу алгоритмов измерения с помощью интеллектуальных многофункциональных датчиков посвящена данная работа.

Как известно, традиционно датчик рассматривался ранее как измерительное устройство, селективно обрабатывающее определенный параметр  $x_1(t)$ , действующий на так называемом негэнтропийном входе [8]. Остальные входы (их обычно называют энтропийными)  $x_2(t)$ ,  $x_3(t)$ , ...  $x_n(t)$  определяются дестабилизирующими факторами, действующими в зоне контроля. К ним относятся электромагнитные помехи, создаваемые сварочным и технологическим оборудованием, собственные электрические и магнитные шумы, тепловые поля, ионизирующие излучения и т. д. Развитие и совершенствование датчиковой аппаратуры происходило в направлении создания таких решений,

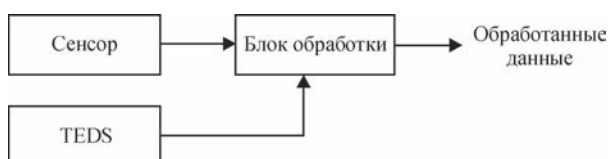


Рис. 1. Схема использования TEDS в интеллектуальных сенсорах и сенсорных системах

в которых исключалось, либо существенно уменьшалось влияние указанных факторов на конечный результат измерения.

Но в конце 1980-х годов появились результаты первых исследований, связанных с созданием многофункциональных датчиков (МФД) [9, 10], в которых часть энтропийных входов превращалась в негэнтропийные. Это существенно повысило объем и достоверность получаемой информации относительно нескольких параметров исследуемого процесса.

Аналитически задача анализа и синтеза МФД формулируется следующим образом. Пусть в основном уравнении, функционально описывающем некоторый измеряемый параметр  $x_1(t)$ , известен вид других контролируемых функций  $x_2(t)$ , ...  $x_k(t)$ , неучет которых ранее приводил к дополнительной погрешности измерения. Следовательно, мы приходим к системе  $k$ -уравнений, решение которой дает искомый результат по каждому  $j$ -параметру.

Метрологические возможности МФД, связанные с извлечением информации о нескольких входных параметрах, действующих в некотором сосредоточенном пространстве, делают их весьма перспективным инструментом для научных и технологических исследований. Развитие компьютерных методов измерений [11] в сочетании с МФД позволит существенно улучшить их метрологические и динамические характеристики путем реализации алгоритмов взаимной коррекции обрабатываемых параметров.

Схематическое изображение МФД приведено на рис. 2, а. Его ЧЭ способен воспринимать некоторое множество входных параметров  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\} = X_j$ . Причем они могут быть различной физической природы — например, для тензорезистора входными воздействиями могут быть деформации, температуры, вибрации. Множеству входов  $X_j$  ставится в соответствие множество выходных параметров  $\{y_1, y_2, \dots, y_n\} = Y_j$ . Функциональная связь между ними описывается множеством коэффициентов передачи  $\{k_1, k_2, \dots, k_n\} = K_j$ . На рис. 2, б представлено изображение «классического» датчика, чувствительного к изменению одного параметра  $x_1$ , остальные входы  $x_2, \dots, x_n$  (обозначены ломаной линией) являются для него энтропийными и характеризуют действие возмущений. Сумматор ( $\Sigma$ ), используемый в датчике, на входах которого действуют все выходные сигналы ЧЭ, реализует алгоритм селекции контролируемого параметра  $x_1$ .

Как известно [8], квазилинейный оператор преобразования для такого однопараметрического датчика описывается выражением:

$$Z(t) = k_1 x_1 f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + b_1 \phi_1\{x_2, x_3, \dots, x_n\} + \psi_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

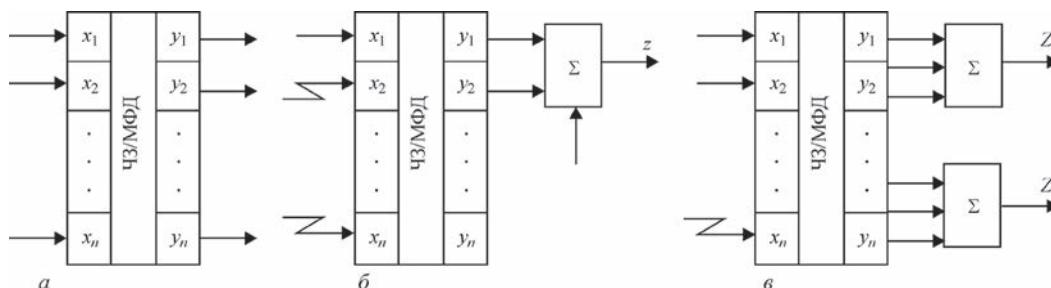


Рис. 2. Схематическое представление МФД (а), вариант классического датчика с одним ЧЭ (б), вариант двухпараметрического датчика (в)

где  $Z(t)$  — функция отклика (выходной измерительный сигнал);  $k_1$  — коэффициент передачи по контролируемому параметру;  $f_1$  — функция влияния, учитывающая действие параметра  $x_1$  и возмущений;  $\varphi_1$  — функция, учитывающая влияние возмущений на начальный уровень сигнала;  $b_1$  — аддитивная составляющая выходного сигнала;  $\psi_1$  — функция дестабилизирующих факторов, учитывающая нелинейность выходной характеристики датчика.

Следовательно, для двухпараметрического МФД, схема которого приведена на рис. 2, в, система квазилинейных операторов может быть записана в виде уравнений:

$$\begin{aligned} Z_1(t) &= k_1 x_1 f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + \\ &+ b_1 \varphi_1(x_2, x_3, \dots, x_n) + \psi_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ Z_2(t) &= k_2 x_2 f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) + \\ &+ b_2 \varphi_2(x_2, x_3, \dots, x_n) + \psi_2(x_1, x_2, \dots, x_n). \end{aligned} \quad (2)$$

Совместное решение этих уравнений позволяет найти значения искоемых параметров  $x_1$  и  $x_2$ , информация относительно которых задается одним ЧЭ. И, соответственно, трехпараметрический МФД определяется системой уравнений:

$$\begin{aligned} Z_1(t) &= k_1 x_1 f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + \\ &+ b_1 \varphi_1(x_2, x_3, \dots, x_n) + \psi_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ Z_2(t) &= k_2 x_2 f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) + \\ &+ b_2 \varphi_2(x_2, x_3, \dots, x_n) + \psi_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ Z_3(t) &= k_3 x_3 f_3(x_1, x_2, \dots, x_n) + \\ &+ b_3 \varphi_3(x_2, x_3, \dots, x_n) + \psi_3(x_1, x_2, \dots, x_n). \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, как это следует из выше изложенного, выражение для общего члена системы  $n$ -уравнений, описывающей  $n$ -параметрический МФД, должно иметь вид:

$$\begin{aligned} Z_n(t) &= k_n x_n f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) + \\ &+ b_n \varphi_n(x_2, x_3, \dots, x_n) + \psi_n(x_1, x_2, \dots, x_n). \end{aligned} \quad (4)$$

Нетрудно видеть, что выражение (4) является аналитическим представлением принципа многомерной селективности МФД. Как следует из приведенных выражений (1)–(4), взаимный учет совместного влияния всех действующих факторов требует знания такого большого количества исходных данных, что решение задачи проектирования МФД в общем виде лишается практической целесообразности. Поэтому дальнейшее изложе-

ние будет относиться только к конкретным типам датчиков, особенностям их построения селекции измеряемых параметров.

Технология TEDS предусматривает формирование электронного паспорта датчика (ЭПЭ), который размещается непосредственно в чипе самого устройства. С его помощью датчик передает свои параметры системе сбора информации, к которой он подключен.

Таким образом, квазилинейный оператор любого используемого датчика, представленный в виде многочленов (1)–(4), заносится в перепрограммируемую память (ПП) для последующего использования во всех измерительных процедурах. Такой подход, в значительной мере, способствует повышению метрологических параметров МФД.

В качестве примера рассмотрим задачу разработки МФД, способного одновременно контролировать два информационных параметра (деформации и интенсивности акустической эмиссии) при испытаниях узлов трубопроводов. В настоящее время для этого используются методики контроля, основанные на измерении акусто-эмиссионного излучения в изделии, подверженного деформационному воздействию. Однако результаты идентификации этих измерений не всегда однозначны. Как показано в работе [12], более эффективные оценки параметров вибраций дает деформационный подход.

Разработанный МФД, структурная схема которого приведена на рис. 3, объединяет указанные методики виброизмерений. В качестве ЧЭ в датчике используется пьезокерамика ЦТС-21, воспринимающая механические колебания в контролируемом изделии в широком спектре частот. Для разделения деформационных сигналов  $\varepsilon(t)$  и сигналов интенсивности акустической эмиссии  $N_{АЭ}$



Рис. 3. Структурная схема МФД

применена частотная селекция информационных параметров. В структуре МФД можно выделить два канала — высокочастотный, используемый для регистрации  $N_{\text{АЭ}}$  и низкочастотный — для измерения  $\varepsilon(t)$ . Функциональные блоки идентичны, а именно: полосовые фильтры (ПФ), линейные амплитудные детекторы (ЛАД) и соответствующие преобразователи напряжения (ПН). Отличительная особенность — рабочие полосы частот. В первом случае  $\Delta f = 450 \dots 900$  кГц, во втором  $\Delta f = 560 \dots 8500$  Гц. Канал  $\varepsilon(t)$  дополнительно оснащен преобразователем логарифмического декремента затухания (ПлДЗ), вход которого подключен к выходу ЛАД2. Такое разнесение рабочих частот обеспечивает высокую степень развязки каналов измерения указанных параметров.

Поскольку процессы обработки сигналов в тракте  $N_{\text{АЭ}}$  не требуют особых пояснений (предварительное усиление в блоке ПУ, фильтрация, амплитудное детектирование и регистрация в ПН1), то остановимся более подробно на описании работы тракта измерения деформаций. В его основу положен принцип измерения статических усилий, вызванных деформацией контролируемого изделия. При этом с помощью генератора возбуждения (ГВ), синхронизируемого блоком управления (БУ), на обкладку ЧЭ подается синусоидальное напряжение, частота которого соответствует резонансной частоте пьезоэлемента. Функция преобразования выходного сигнала ПУ существенно упростится:

$$U(t) = U_m \exp(-ht) \sin \omega t, \quad (5)$$

где  $h$  — параметр, определяющий степень деформации ЧЭ;  $\omega$  — частота затухающих колебаний.

Синхронное интегрирование полученного сигнала с помощью ПН2 позволяет сформировать выходное напряжение как функцию деформации:  $U(\varepsilon) = f(h)$ . Обратная зависимость вида  $h =$

$= F[U(\varepsilon)]$  может быть использована для калибровки датчика.

Описанная схема МФД, как это следует из рис. 4, позволяет определять такую важную характеристику колебательных систем как логарифмический декремент затухания (ЛДЗ):

$$d = \ln[U(t_1)/U(t_2)] = h(t_2 - t_1). \quad (6)$$

где  $U(t_1)$ ,  $U(t_2)$  — мгновенные значения напряжений, зафиксированные преобразователем ЛДЗ в соответствующие моменты времени  $t_1$ ,  $t_2$ .

Необходимо отметить, что данный МФД имеет апертурное время, в течение которого он не воспринимает измерительную информацию. Это время определяется периодом колебаний ГВ и составляет  $\leq 0,5$  мс, а их частота  $F_{\text{ГВ}} \geq 1$  Гц. В паузах сигналы могут быть восстановлены с необходимой точностью, соответствующей аппроксимирующей функцией.

МФД удобно представлять классификационной формулой, учитывающей их структурное построение. Она имеет вид:

$$\text{МФД: } \{p_i/q_j/N(A_n/D_m)\},$$

где  $p_i$  — количество контролируемых параметров,  $q_j$  — число используемых ЧЭ,  $N$  — количество аналоговых ( $A_n$ ) и дискретных ( $D_m$ ) выходных сигналов.

Следовательно, двухпараметрический датчик с одним ЧЭ и двумя выходными аналоговыми сигналами, изображенный на рис. 1, в, может быть задан формулой:  $\{p_2/q_1/N(A_2)\}$ .

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАНУ применительно к конкретным задачам технологического контроля разработан ряд МФД, краткая характеристика которых приведена в таблице. В таблице также приведены следующие обозначения: тип ЧЭ-ПК — пьезокерамика типа ЦТС-21; ПТП — полупроводниковый термоэлектрический преобразователь Фонон-3; ФЭП — фотоэлектрический преобразователь, R — резисторный преобразователь, ТМП — тензометрический преобразователь.

Процедура первичного измерительного преобразования в приведенных МФД осуществляется следующими устройствами: ИП — интегрирующим преобразователем; ПЕН — преобразователем емкость—напряжение; ПФ — полосовым фильтром; КМП — калориметрическим преобразователем; ПД — преобразователем давления; ВИП — время-импульсным преобразователем; МП — масштабирующим преобразователем; МПТ — мостом переменного тока и термошумометрическим преобразователем (ТШП). Выходные сигналы всех указанных преобразователей нормированы таким образом, чтобы соответствовать

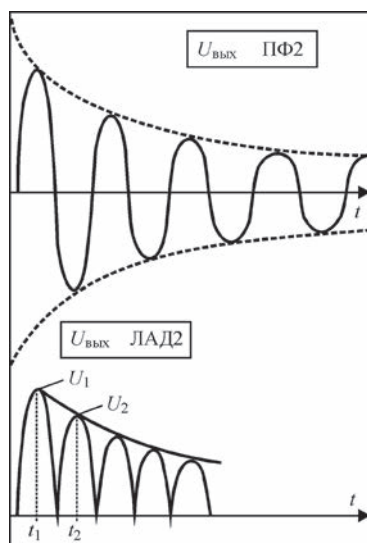


Рис. 4. Диаграммы работы измерителя ЛДЗ



## Характеристики МДФ

Наименование	Назначение	Классификационная формула	Технические характеристики датчиков		
			тип ЧЭ	измерительный преобразователь	форма выходного сигнала
МФД сварочного тока и температуры реактора*	Оснащение сварочного оборудования	$p_2/q_1/N(A_2)$	ПК (ЦТС-21)	ИП/ПЕН	НАН/НАН
МФД температуры и интенсивности АЭ*	Исследование образцов	$p_2/q_1/N(A_1D_1)$	ПК (ЦТС-21)	ПЕН/ПФ	НАН/ЧИП
МФД температуры и объемного расхода защитных газов	Оснащение сварочного оборудования	$p_2/q_1/N(A_2)$	ПТП (Фонон-3)	КМП	НАН
МФД величины прогиба и интенсивности АЭ*	Технологические испытания	$p_2/q_1/N(A_1D_1)$	ПК (ЦТС-21)	ПД/ПФ	НАН/ЧИП
МФД скорости перемещения и положения сварочной горелки*	Оснащение сварочного оборудования	$p_2/q_2/N(A_1D_1)$	ФЭП/R	ВИП/МП	ЧИП/НАН
МФД сварочных деформаций, температуры и интенсивности АЭ	Технологические испытания	$p_4/q_1/N(D_3)$	ТМП	МПТ/ТШП/ПФ	ЧИП/НАН
МФД температуры, проводимости и диэлектрической постоянной флюса	Исследование флюсов	$p_3/q_1/N(A_1D_2)$	ЕП	ТШП/МПТ	НАН/ЧИП
* Результаты по разработке МФД были впервые представлены авторами на международном семинаре Польского института сварки (Гливице) в 1997 г.					

требованиям входных каналов аппаратных интерфейсов компьютеров.

В заключение следует отметить, что применение интеллектуальных МФД в сварочном оборудовании позволит значительно расширить объемы получаемой информации относительно технологических процессов, реализуемых с их помощью. Особенно важно здесь отметить возможность взаимной коррекции получаемых измерительных сигналов при одновременном контроле нескольких параметров исследуемого процесса. Это позволит в конечном счете существенно повысить точность измерений, а следовательно, и качество получаемых сварных соединений.

## Список литературы

1. Brignell J. E., Dorey A. P (1983) Sensor for microprocessor – based application. *J. Phys.*, 952–958.
2. Джекон Р. Г. (2008). *Новейшие датчики*. Москва: Техносфера, 398.
3. Randy F. (2002) *Understanding Smart Sensors*, Second Ed. Artech House Publishers, 412.
4. Войтович І. Д., Корсунський В. М. (2007) *Інтелектуальні сенсори*. Київ, Ін-т кібернетики ім. В. М. Глушкова НАНУ, 514.
5. Gerard C. M. Meijer. (2008) *Smart Sensors Systems*, John Wiley&Sons, Ltd, 404.
6. IEEE Standards Association (2004) IEEE Std 1451.4-2004. *Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators-Mixed-Mode Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats*, Piscataway, NJ.
7. Марченко І. О. (2015) *Система проектування багатофункціональних реконфігуруємих інтелектуальних датчиків*: дис. ... канд. техн. наук, Новосибірськ.
8. Осадчий Е. П. (ред.) (1979) *Проектирование датчиков для измерения механических величин*. Москва, Машиностроение.

9. Васильев В. А., Чернов П. С. (2012). Интеллектуальные датчики, их сети и информационные системы. *Материалы Международной научно-технической конференции 3–7 декабря*, сс. 119–122.
10. Дрожжин А. И., Щетинин А. А., Седых Н. К. и др. (1977) Малогабаритные датчики температуры и деформации. *Приборы и техника эксперимента*, 5, 216–218.
11. Алейников А. Ф. (1988) *Измерительные системы с многофункциональными датчиками*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 16.
12. Овчинников И. Н. (1986) Методика испытаний при сложном вибрационном нагружении. Заводская лаборатория, 2, 69–73.

О. Є. Коротинський, М. І. Скопюк

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

## ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Тенденцією сучасного етапу розвитку техніки є її інтелектуалізація. Більшою мірою це відноситься до зварювального обладнання, де одним з важливих питань є інтелектуалізація контролю основних параметрів дугових процесів. У пропонуваній роботі розглянуті питання побудови багатофункціональних датчиків, структури яких уніфіковано згідно стандарту IEEE 1451.4. Приведено системи вимірювальних рівнянь, які дозволяють контролювати параметри зварювання з мінімальними методичними похибками в режимі реального часу. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 4.

**Ключові слова:** інтелектуальний датчик, багатофункціональний датчик, вимірювальне рівняння, параметри зварювання, похибка

Поступила в редакцію 19.04.2017

## НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ РОБОТИЗАЦИИ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В СРЕДЕ ЗАЩИТНОГО ГАЗА

Г. А. ЦЫБУЛЬКИН

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

При роботизации дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа возникает ряд проблем, вызванных необходимостью оснащать сварочные роботы специальными сенсорными устройствами, которые поставляли бы системе управления информацию о реальном протекании процесса дуговой сварки в сильно осложненных для наблюдения условиях. В данной работе рассмотрены возможности практического использования дуговых сенсоров, которые, в отличие от других сенсорных устройств, не нуждаются в специальной защите от световых и тепловых потоков, от разбрызгивания расплавленного металла и интенсивного выделения аэрозолей в самой зоне измерения. Приведены аналитические соотношения для числовой оценки отклонения сварочного инструмента от линии стыка по результатам текущих измерений, поступающих от дугового сенсора. Эти соотношения могут быть использованы для построения алгоритмов автоматической коррекции движения сварочного инструмента непосредственно в процессе дуговой сварки. Библиогр. 29, рис. 3.

*Ключевые слова:* роботизация дуговой сварки, плавящийся электрод, электродуговые адаптивные системы

Применение роботов для контактной точечной сварки началось еще в 70-х годах прошлого столетия фирмой «General Motors» при изготовлении автомобильных кузовов [1] и получило впоследствии широкое распространение во всех высокоразвитых странах. Это стало возможным благодаря тому, что сама операция контактной точечной сварки достаточно легко поддается роботизации.

Иное положение сложилось в дуговой сварке. Для ее выполнения с помощью робота с жестким программным управлением необходимо, чтобы свариваемые детали были изготовлены и собраны под сварку с достаточно высокой точностью, при которой сохранялось бы постоянство формы, площади разделки, зазора между свариваемыми деталями и их пространственное положение. Однако в реальных условиях сварочного производства не всегда удается выполнить эти жесткие требования. Поэтому неизбежны отклонения сварочного инструмента, перемещаемого роботом по заранее заданной программе, от реальных свариваемых соединений. При выходе указанных отклонений за пределы допусков качество сварного соединения может стать недопустимо низким. Могут быть и другие причины несовпадения необходимой и программно заданной траектории движения сварочного инструмента, например, температурные деформации тонких деталей в процессе сварки, так называемое магнитное дутье и т. п.

Для обеспечения требуемого качества сварных соединений в условиях не полностью определенной и частично меняющейся «технологической среды» используют адаптивное управление, под которым понимается управление сварочным

роботом в функции от контролируемых параметров этой среды. Адаптивные сварочные роботы способны «приспосабливаться» к изменяющимся условиям дуговой сварки и, в частности, к изменению пространственного положения свариваемых соединений. Но для реализации адаптивного управления нужно, чтобы сварочный робот был оснащен специальными сенсорными устройствами (датчиками), которые доставляли бы системе управления информацию о реальном текущем положении конца электрода относительно линии свариваемого соединения.

Проблема сенсорного оснащения сварочного робота до сих пор остается актуальной. Дело в том, что дуговая сварка плавящимся электродом в среде защитного газа сопровождается мощным световым, электромагнитным и тепловым излучением, разбрызгиванием расплавленного металла, интенсивным выделением аэрозолей и пыли непосредственно в самой зоне измерения. Надежность функционирования оптических, индукционных или акустических сенсорных устройств в таких условиях невысока. В этой связи, судя по многочисленным публикациям [2–20], особое внимание обращено на электродуговые сенсоры, то есть сенсоры, в качестве источника информации которых выступает сама сварочная дуга. В литературе они получили название «дуговые сенсоры» (Arc Sensors). Повышенный интерес к ним обусловлен еще и тем, что определение положения конца электрода относительно линии свариваемого соединения осуществляется непосредственно в точке сварки при полном отсутствии вблизи нее каких-либо измерительных устройств. Однако дуговые сенсоры способны функционировать лишь при определенных условиях.

Цель данной работы — рассмотреть условия применимости дуговых сенсоров в системах адаптивного управления сварочными роботами и получить аналитические соотношения для оценки отклонений конца плавящегося электрода от линии соединения свариваемых деталей по результатам текущих измерений, поступающих от дугового сенсора.

#### Условия применимости дуговых сенсоров.

Одно из главных условий заключается в том, чтобы линия поперечного сечения свариваемых поверхностей  $F = F(y)$  имела экстремальный характер (рис. 1), а сам экстремум находился на осевой линии свариваемого соединения. Данному условию, согласно работ [21, 22], удовлетворяют большинство свариваемых соединений, к которым относятся угловые, тавровые и нахлесточные соединения, а также стыковые соединения с V-образной разделкой кромок.

Еще одним неизменным условием является допустимость (с точки зрения самой технологии сварки) колебаний электрода поперек линии свариваемого соединения непосредственно в процессе сварки. Согласно работе [22], использование поперечных колебаний в большинстве случаев вполне допустимо и даже приводит к положительному эффекту: возрастает ширина шва, снижается глубина проплавления, уменьшается перегрев металла шва и его химическая неоднородность. Поэтому дуговую сварку чаще всего ведут с поперечными колебаниями, исходя из чисто технологических соображений.

И наконец, важно, чтобы частота поперечных колебаний электрода не попадала в полосу частот, в которой возможны колебания сварочного тока,

вызванные иными причинами, например, флуктуациями напряжения на входе источника сварочного тока или крупнокапельным переносом металла. При выполнении этих условий сварочная дуга вполне может выступать в качестве источника информации о текущем положении конца электрода относительно линии свариваемого соединения и стать как бы чувствительным элементом некоего виртуального сенсорного устройства [23].

Итак, наличие экстремальной характеристики у объекта управления и использование поисковых колебаний как средства получения информации о фактическом положении системы относительно экстремума являются, как известно [24–27], основными признаками, указывающими на принадлежность систем с дуговыми сенсорами в цепи обратной связи к классу адаптивных систем экстремального типа. В теории экстремального управления разработан ряд достаточно эффективных методов поиска экстремума, полное представление о которых можно получить в специальной литературе, например, в работе [24]. Для решения задач слежения за линией свариваемого соединения в процессе дуговой сварки наиболее подходящими, согласно работе [20], являются два метода: разностный метод и метод модулирующего воздействия.

Здесь мы кратко остановимся лишь на разностном методе. Идея разностного (или, как его иногда называют, дифференциального) метода состоит в следующем. Траекторию движения сварочного инструмента в рабочем пространстве сварочного робота задают в виде «зигзагообразной» кривой  $y = y(x)$ , симметрично расположенной относительно осевой линии, которая в идеале должна совпадать с осевой линией свариваемого соединения. В процессе движения по кривой  $y = y(x)$  измеряют значения функции  $F = F(y)$  в ее левой и правой крайних точках и вычисляют разность  $\Delta F$  измеренных значений. Если осевая линия кривой  $y = y(x)$  совпадает с осевой линией свариваемого соединения, то разность  $\Delta F$  будет равна нулю. Отличие же этой разности от нуля непосредственно свидетельствует об отклонении осевой линии кривой  $y = y(x)$  от желаемой линии. Сигнал, соответствующий разности  $\Delta F$ , используется для коррекции текущего положения сварочного инструмента.

Для построения электродуговой адаптивной системы на основе разностного метода достаточно располагать лишь датчиком сварочного тока  $i$ . Измерение сварочного тока  $i$  или его отклонения  $\delta = i - i_n$  от номинального значения  $i_n$  производится в крайних точках поперечных колебаний горелки. Задача состоит в том, чтобы найти аналитические соотношения, позволяющие по результатам этих измерений получать текущие числовые оцен-

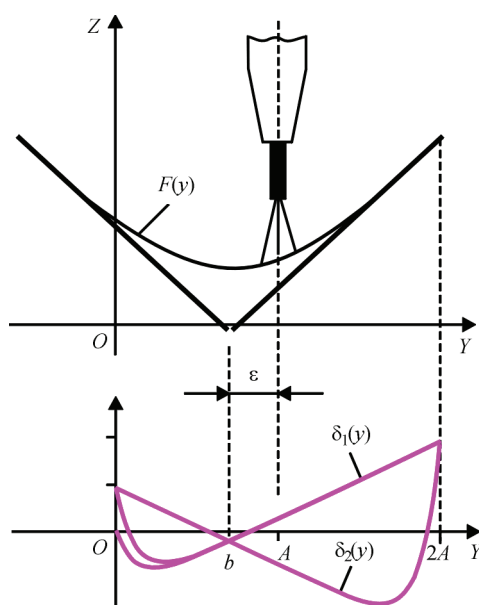


Рис. 1. Схема движения сварочного инструмента поперек линии соединения свариваемых деталей и графики функций  $\delta_1 = \delta_1(y)$  и  $\delta_2 = \delta_2(y)$



ки бокового отклонения  $\varepsilon(t)$  среднего положения колеблющегося электрода от линии свариваемого соединения.

**Числовые оценки отклонения  $\varepsilon(t)$ .** Пусть сварочный инструмент в процессе сварки перемещается поперек линии углового соединения (вдоль оси  $Y$  на рис. 1) от точки  $O$  до некоторой точки  $2A$  и обратно с постоянной скоростью  $v_y = \text{const}$ . При этом предполагается, что скорость движения горелки вдоль оси  $X$  (направлена вверх по нормали к плоскости чертежа) сохраняется постоянной, т. е.  $v_x = \text{const}$ .

Линию  $F = F(y)$ , следуя работе [7], аппроксимируем параболой

$$F(y) = a(y - b)^2 + c, \quad (1)$$

где  $a, b, c$  — положительные коэффициенты, характеризующие форму и положение кривой  $F(y)$  в системе координат  $OYZ$ .

Предполагается, что эти коэффициенты на малом интервале времени  $\theta = 2A/v_y$  заметно не изменяются. Расстояние между точкой  $b$  и точкой  $A$  (рис. 1), равное

$$\varepsilon = A - b, \quad (2)$$

характеризует искомое отклонение среднего положения горелки от линии соединения свариваемых элементов.

Связь между функциями  $\delta(y) = i(y) - i_n$  и  $F(y)$ , согласно работе [20], можно описать дифференциальным уравнением

$$\frac{d\delta}{dy} + \frac{1}{v_y T_w} \delta = \frac{1}{MT_w} \frac{dF}{dy}, \quad (3)$$

где

$$T_w = \frac{R_w}{EM}.$$

Здесь  $M$  — параметр, характеризующий электрические, теплофизические и геометрические свойства плавящегося электрода;  $E$  — напряженность электрического поля в столбе дуги;  $R_w$  — общее сопротивление сварочного контура, а  $dF/dy$  — крутизна кривой в текущей точке сварки.

Используя уравнение (3) и принимая во внимание (1) и (2), запишем отдельно два уравнения, соответствующие движению электрода от точки  $O$  до точки  $2A$  и обратно:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\delta_1}{dy} + \frac{1}{v_y T_w} \delta_1 &= \frac{2a}{MT_w} (y - b), \\ \frac{d\delta_2}{dy} + \frac{1}{v_y T_w} \delta_2 &= \frac{2a}{MT_w} (2A - y - b). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В этих уравнениях через  $\delta_1 = \delta_1(y)$  обозначено отклонение сварочного тока, возникающее при движении горелки от точки  $O$  до точки  $2A$ , а через

$\delta_2 = \delta_2(y)$  — отклонение сварочного тока при движении горелки в обратном направлении  $2A \rightarrow O$ .

Решения уравнений (4) имеют вид

$$\delta_1(y) = \frac{2av_y}{M} (y - b - v_y T_w) + C_1 \exp\left(-\frac{y}{v_y T_w}\right), \quad (5)$$

$$\delta_2(y) = -\frac{2av_y}{M} (2A - y - b + v_y T_w) + C_2 \exp\left(-\frac{2A - y}{v_y T_w}\right), \quad (6)$$

где  $C_1, C_2$  — некоторые константы. Поскольку нас интересуют отклонения сварочного тока лишь в крайних точках поперечного колебания электрода, то, полагая в уравнении (5)  $y = 2A$ , а в (6)  $y = 0$  и вводя обозначения  $\delta_R = \delta_1(2A)$ ,  $\delta_L = \delta_2(0)$ , получим с учетом (2) следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \delta_R &= \frac{2av_y}{M} (A - v_y T_w + \varepsilon), \\ \delta_L &= \frac{2av_y}{M} (A - v_y T_w - \varepsilon). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Отсюда

$$\delta_R - \delta_L = \frac{4av_y}{M} \varepsilon. \quad (8)$$

Из последнего выражения видно, что если бы в процессе измерения  $\delta_R$  и  $\delta_L$  наряду со значениями параметров  $v_y$  и  $M$  было также известно и значение коэффициента  $a$ , то по разности  $(\delta_R - \delta_L)$  можно было бы получить достаточно точную оценку

$$\varepsilon = (\delta_R - \delta_L) \frac{M}{4av_y} \quad (9)$$

интересующего нас бокового отклонения сварочной горелки от осевой линии свариваемого соединения. Такого вида оценка, а именно:  $\varepsilon = K_1(\delta_R - \delta_L)$ , где  $K_1$  — некоторая константа, использовалась в работах [3, 11, 12].

К сожалению, коэффициент  $a$ , входящий в формулу (9), лишь на небольшом интервале времени можно считать мало изменяющимся. В процессе дуговой сварки вследствие нестационарного движения свободной поверхности жидкой ванны  $a$  изменяется непредсказуемым образом и практически не поддается текущей идентификации. Следовательно, оценка  $\varepsilon$ , получаемая на основе разности  $(\delta_R - \delta_L)$ , отражает истинное отклонение, в лучшем случае, лишь с точностью до знака.

Возникает естественный вопрос, можно ли устранить влияние неконтролируемых изменений параметра  $a$  на оценку  $\varepsilon$ , получаемую по результатам измерения  $\delta_R$  и  $\delta_L$ . Оказывается, такая возможность действительно существует. В самом деле, если рассмотреть сумму  $(\delta_R + \delta_L)$ , которая согласно (7) равна

$$\delta_R + \delta_L = \frac{4av_y}{M}(A - v_y T_w), \quad (10)$$

то нельзя не заметить, что множитель  $4av_y/M$  в правой части этого выражения, содержащий неизвестный коэффициент  $a$ , точно такой же, как и в правой части выражения (8). На этот факт впервые нами было обращено внимание в работе [28].

Разделим соотношение (8) на (10) и запишем результат в виде

$$\varepsilon = \frac{\delta_R - \delta_L}{\delta_R + \delta_L}(A - v_y T_w). \quad (11)$$

Теперь в (11) вовсе не фигурирует коэффициент  $a$ . Это означает, что боковое отклонение  $\varepsilon$ , определяемое по этой формуле, совершенно не зависит от данного коэффициента. В выражение (11), в отличие от (9), входят только измеряемые величины  $\delta_R$ ,  $\delta_L$  и заранее известные значения параметров  $A$ ,  $v_y$  и  $T_w$ . Другими словами, оценка бокового отклонения, вычисляемая по формуле (11), обладает свойством робастности по отношению к текущему изменению формы свободной поверхности ванны.

На рис. 2 представлены результаты компьютерного моделирования процесса дуговой сварки плавящимся электродом с поперечными колебаниями горелки при постоянном боковом отклонении  $\varepsilon_0 = 1$  мм и при двух различных значениях параметра  $a$ , т. е. при  $a = 0,1$  мм<sup>-1</sup> и  $a = 0,25$  мм<sup>-1</sup>. Значения остальных параметров, используемых при моделировании, являются типовыми для роботизированной дуговой сварки:  $v_x = 5$  мм/с;  $v_y = 12$  мм/с;  $A = 3$  мм; напряжение источника сварочного тока  $u = 30$  В; скорость подачи электрода  $v_e = 45$  мм/с;  $i = 145$  А;  $E = 2$  В/мм;  $M = 0,31$  мм/(с·А);  $L = 0,4$  мГн;  $R_w = 0,04$  Ом.

Из рис. 2 хорошо видно, что  $\delta = \delta(t, a)$  существенно зависит от коэффициента  $a$ . Подставляя в формулу (11) результаты измерений  $\delta_R$  и  $\delta_L$ :

$$\delta_R = 19,96 \text{ А}, \delta_L = 5,94 \text{ А (при } a = 0,10 \text{ мм}^{-1}\text{),}$$

$$\delta_R = 55,07 \text{ А}, \delta_L = 17 \text{ А (при } a = 0,25 \text{ мм}^{-1}\text{),}$$

получаем

$$\varepsilon_1 = \frac{19,96 - 5,94}{19,96 + 5,94}(3 - 12 \cdot 0,1) = 0,97 \text{ мм}$$

$$\text{(при } a = 0,10 \text{ мм}^{-1}\text{),}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{55,17 - 16,80}{55,17 + 16,80}(3 - 12 \cdot 0,1) = 0,96 \text{ мм}$$

$$\text{(при } a = 0,25 \text{ мм}^{-1}\text{).}$$

Сравнение  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  между собой и с  $\varepsilon_0$  убедительно показывает, что коэффициент  $a$  не оказывает ощутимого влияния на результаты расчета  $\varepsilon$  по формуле (11) и расчетные значения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  фактически совпадают с реальным отклонением  $\varepsilon_0$ .

Это означает, что оценка бокового отклонения  $\varepsilon$ , выполненная по формуле (11), достаточно эффективна.

В данной статье мы не станем углубляться в вопросы, касающиеся помехоустойчивости дифференциального дугового сенсора. Заметим лишь, что в тех случаях, когда помехи на входе датчика сварочного тока значительны, т. е. когда отношение сигнал-помеха недостаточно для гарантированной оценки  $\varepsilon$ , можно воспользоваться одним из эффективных методов борьбы с помехами, так называемым методом накопления [29]. Для этого в процессе измерения  $\delta_R(t)$  и  $\delta_L(t)$  следует брать не один отсчет, а несколько и их усреднять. При этом будут усредняться как полезные сигналы, так и мгновенные значения помех, но отношение сигнал-помеха в результате операции усреднения, как показано в работе [29], будет в  $n$  раз ( $n$  — число отсчетов) выше, чем в однократном измерении. Таким образом, достоверность оценки при использовании метода накопления существенно увеличится.

Что касается времени накопления измерений  $\tau$ , то при его выборе следует руководствоваться теоремой Котельникова, согласно которой должно выполняться условие  $\tau = n/v$ , где  $v$  — половина ширины спектра измеряемого сигнала. Следует заметить, что если движение сварочной горелки поперек линии свариваемого соединения происходит без остановок в крайних точках, то начинать накопление измерений нужно несколько раньше прихода сварочной горелки в крайнюю точку, т. е. в момент времени  $t_m = 2A/v_y - \tau$ . При этом предполагается, что за начало отсчета времени каждый раз берется момент, когда сварочная горелка находится в предыдущей крайней точке.

Итак, при использовании метода накопления боковое отклонение  $\varepsilon$  можно рассчитывать по формуле

$$\varepsilon = \frac{\bar{\delta}_R - \bar{\delta}_L}{\bar{\delta}_R + \bar{\delta}_L}(A - v_y T_w), \quad (12)$$

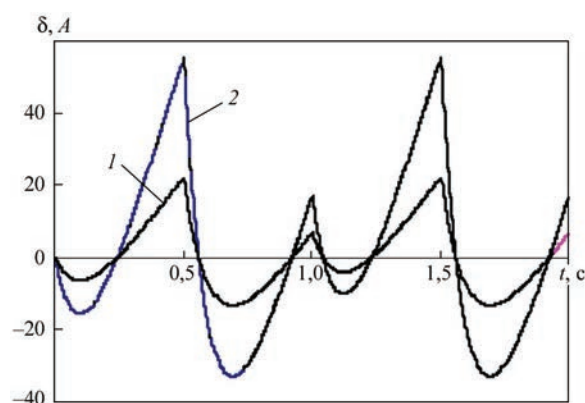


Рис. 2. Кривые переходных процессов  $\delta = \delta(t, a)$ : 1 — при  $a = 0,10$  мм<sup>-1</sup>; 2 — при  $a = 0,25$  мм<sup>-1</sup>

аналогичной формуле (11), но в которой вместо мгновенных значений  $\delta_R(t)$  и  $\delta_L(t)$  фигурируют средние значения  $\bar{\delta}_R$  и  $\bar{\delta}_L$ , полученные в результате накопления  $n$  отсчетов и их усреднения на интервале времени  $\tau$ .

В заключение следует подчеркнуть, что задача адаптации сварочного робота к изменяющимся условиям дуговой сварки может быть решена с помощью дуговых сенсоров лишь частично, поскольку эти сенсоры функционируют только в процессе дуговой сварки. При «холостом» движении сварочного инструмента от одного свариваемого соединения к другому, очевидно, требуются дополнительные средства адаптации. Выходом из затруднений может оказаться обсуждаемая в последнее время идея создания мультисенсорных систем.

В частности, для дуговой сварки плавящимся электродом угловых соединений и соединений с разделкой кромок можно использовать сварочный робот, оснащенный сенсорной системой, состоящей из двух устройств: дугового сенсора и видеокамеры. Видеокамера позволяет оперативно оценивать, насколько отличаются геометрические характеристики свариваемого соединения от характеристик, заданных в программе. На основе этой информации система управления сварочным роботом автоматически корректирует программу движения сварочного инструмента перед началом дуговой сварки и при переходе от одного свариваемого соединения к другому. В ходе же самой сварки видеокамера не используется, а текущая информация о положении сварочного инструмента относительно линии свариваемого соединения поступает от дугового сенсора. Эта информация используется для коррекции движения сварочного инструмента непосредственно в процессе дуговой сварки.

На рис. 3 показан один из возможных вариантов системы адаптивного управления сварочным роботом с двумя сенсорными устройствами в контуре обратной связи, где приняты следующие обозначения: УУ — управляющее устройство; ИУ — исполнительные устройства; ИГ — источник сварочного тока; ДС — дуговой сенсор; 1 — сварочный инструмент; 2 — датчик тока; 3 — свариваемое изделие; 4 — видеокамера. На вход ДС поступает сигнал  $u = K_2 i$ , где  $K_2 = \text{const}$ . На выходе ДС формируется сигнал  $u_* = u_*(u)$ , отвечающий требованиям интерфейса конкретного сварочного робота. Оценка отклонения  $\varepsilon$ , возникающего в процессе дуговой сварки, вычисляется в УУ по формуле (11) или (12) и используется для автоматической коррекции движения сварочного инструмента непосредственно в процессе дуговой сварки. Коррекция пространственного положения сварочного инстру-

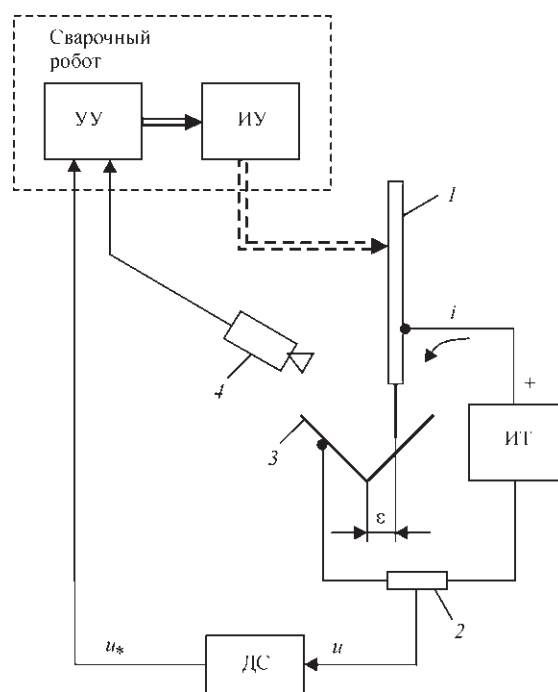


Рис. 3. Система адаптивного управления сварочным роботом с двумя сенсорными устройствами в контуре обратной связи (обозначения см. в тексте)

мента до и после операции дуговой сварки производится на основе информации, поступающей от видеокамеры 4.

## Выводы

1. При использовании роботов для дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа возникает ряд проблем, связанных с необходимостью оснащать эти роботы специальными сенсорными устройствами, которые обеспечивали бы систему управления текущей информацией о ходе сварочного процесса в сильно осложненных для наблюдения условиях.

2. Рассмотрена возможность частичного решения этой проблемы с помощью дуговых сенсорных устройств, на которые, в отличие от оптических, индукционных или акустических сенсоров, не оказывают влияние световое, электромагнитное и тепловое излучение, турбулентные потоки газа, разбрызгивание расплавленного металла, интенсивное выделение аэрозолей и пыли непосредственно в самой зоне измерения.

3. Приведены формулы для числовой оценки отклонения сварочного инструмента от линии стыка по результатам текущих измерений, поступающих от дугового сенсора. Эти формулы могут использоваться для построения алгоритмов автоматической коррекции движения сварочного инструмента непосредственно в процессе дуговой сварки.

4. Для расширения адаптационных возможностей сварочного робота представляется перспек-



тивним використанням дугового сенсора совместно с видеосенсорными системами.

### Список литературы

1. Геттерт В., Герден Г., Гюттнер Х. и др. (1988) *Сварочные работы*: пер. с нем. Г. Н. Клебанова, Д. Г. Тесменицкого. Москва, Машиностроение.
2. Ushio M. (1991) Sensors in Welding. *Transaction of JWRI*, 20, 2, 157–163.
3. Cook G. E. (1983) Robotic arc welding: research in sensory feedback control. *IEEE Trans. Ind. Electron*, IE-30, 3, 252–268.
4. Кисилевский Ф. Н., Долиненко В. В. (1986) Определение поперечного смещения горелки относительно стыка при сварке с колебаниями. *Информационные материалы СЭВ*, 1, 37–41.
5. Fujimura H., Joint H. (1987) Joint Tracking Control Sensor of GMAW. *Transactions of the Japan Welding Society*, 58, 1, 32–40.
6. Цыбулькин Г. А., Тимченко В. А., Власов О. В. (1990) *Устройство слежения за стыком при дуговой сварке*: А. с. 1586873 СССР.
7. Yongyi A., Li Y. (1991) Arc sensor used in MIG/MAG weld tracking. *Trans. China Welding Inst.*, 12, 3, 155–160.
8. Kim I. W., Na S. J. (1991) A Study on an Arc Sensor for Gas Metal Arc Welding of Horizontal Fillets. *Welding research supplement*, 8, 216–221.
9. Inoue K., Zhang J., Kang M. (1991) Analysis of detection sensitivity of arc sensor in welding process. *Transactions of JWRI*, 20, 2, 53–56.
10. Цыбулькин Г. А. (1992) *Устройство слежения за стыком*: А. с. 1706796 СССР.
11. Kim I. W., Na S. J. (1993) A Self-Organizing Fuzzy Control Approach to Arc Sensor for Weld Joint Tracking in Gas Metal Arc Welding of Butt Joints. *Welding research supplement*, 2, 60–65.
12. Dilthey U., Stein L., Oster M. (1996) Through-the-arc sensing – An universal and multipurpose sensor for arc welding automation. *Int. J. for the Joining of Materials*, 8(1), 6–12.
13. Sugitani Y. (2000) Making Best Use of the Arc Sensor. *J. Japan Weld. Soc.*, 69, 2, 46–50.
14. Карпов В. С., Панарин В. М., Помелов Д. С. (2000) Исследование гармонических составляющих сварочного тока при сварке различных стыков. *Сварочное производство*, 8, 3–7.
15. Kim C. H., Na S. J. (2001) Development of rotating GMA welding system and its application to arc sensor. *Proc. 11th International Conf. on Computer Tech. in Welding Columbus*, pp. 46–50.
16. Акулович Л. М., Буховец Е. К., Столович А. Ю. (2001) Система слежения за линией сварного шва по дуге. *2-й Международный симпозиум «Сварка и родственные технологии: мировой опыт и достижения»*, Минск, Беларусь, сс. 136–137.
17. Dilthey U., Gollnick J., Paul C. (2002) Erweiterung der Einsatzgebiete von Lichtbogensensoren. *Praktiker*, 5, 164–168.
18. Savu I. D. (2003) Building of the reference signal for the through-the-arc sensor systems function in two wires GMA welding. *Sudura*, XIII, 28–41.
19. Yoo W. S. et al. (2006) End Point Detection of Fillet Weld Using Mechanized Rotating Arc Sensor in GMAW. *Welding Journal*, 8, 180–187.
20. Цыбулькин Г. А. (2011) *Дуговые сенсорные системы для сварочных роботов*. Киев, Сталь.
21. Стеклов О. И. (1986) *Основы сварочного производства*. Москва, Высшая школа.
22. Патон Б. Е. (ред.). (1974) *Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением*. Москва, Машиностроение.
23. Цыбулькин Г. А. (2014) *Адаптивное управление в дуговой сварке*. Киев, Сталь.
24. Кунцевич В. М. (1961) *Системы экстремального управления*. Киев, «Госиздат технической литературы УССР».
25. Красовский А. А. (1963) *Динамика непрерывных самонастраивающихся систем*. Москва, Физматгиз.
26. Растринин Л. А. (1974) *Системы экстремального управления*. Москва, Наука.
27. Чакри Ф. (1975) *Современная теория управления. Нелинейные, оптимальные и адаптивные системы*. Москва, Мир.
28. Цыбулькин Г. А. (1999) К оценке текущего отклонения электрода от линии свариваемого соединения. *Автоматическая сварка*, 12, 53–54.
29. Харкевич А. А. (1965) *Борьба с помехами*. Москва, Наука.

Г. О. Цыбулькин

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

### ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ РОБОТИЗАЦІЇ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ В СЕРЕДОВИЩІ ЗАХИСНОГО ГАЗУ

При роботизації дугового зварювання плавким електродом в середовищі захисного газу виникає ряд проблем, викликаних необхідністю оснащувати зварювальні роботи спеціальними сенсорними пристроями, які поставляли б системі управління інформацію про реальний перебіг процесу дугового зварювання в сильно ускладнених для спостереження умовах. У даній роботі розглянуті можливості практичного використання дугових сенсорів, які, на відміну від інших сенсорних пристроїв, не потребують спеціального захисту від світлових і теплових потоків, від розбризкування розплавленого металу і інтенсивного виділення аерозолів в самій зоні вимірювання. Наведено аналітичні співвідношення для числової оцінки відхилення зварювального інструмента від лінії стику за результатами поточних вимірювань, що надходять від дугового сенсора. Ці співвідношення можуть бути використані для побудови алгоритмів автоматичної корекції руху зварювального інструменту безпосередньо в процесі дугового зварювання. Бібліогр. 29, рис. 3.

**Ключові слова:** роботизація дугового зварювання, плавкий електрод, електродугові адаптивні системи

Поступила в редакцію 18.04.2017

## КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОГО ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОЙ СВАРКИ

ЮЙХУЭЙ ЯО<sup>1</sup>, С. И. ПЕЛЕШЕНКО<sup>1</sup>, В. Н. КОРЖИК<sup>2</sup>, В. Ю. ХАСКИН<sup>2</sup>, В. В. КВАСНИЦКИЙ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Компания «Вэйхань наука и технология». 518071, Китай, Гуанчжоу, Шеньжен, авеню Хуан 1001, строение А4

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

<sup>3</sup>НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, пр-т Победы, 37.

Одним из эффективных путей решения проблемы нехватки высококвалифицированных сварщиков является использование виртуальных систем сварки для их обучения. Такие системы базируются на искусственном интеллекте, заложенном в основу компьютеризированного тренажера, снабженного адаптированным под задачи обучения интерфейсом. Уже сейчас такие системы расширяют возможности обучения за счет увеличения количества моделируемых сварочных технологий и методов сварки. Можно ожидать, что в будущем они помогут различным учреждениям значительно уменьшить себестоимость обучения специалистов. Целью работы являлось создание искусственного интеллекта для обучения сварщиков, позволяющего разработать виртуальную систему обучения сварке в реальном времени с функциями прогнозирования и моделирования морфологии, а также интеллектуальной оценкой качества сварного шва. В результате выполнения работы была создана система искусственного интеллекта для сети сварочных тренажеров V60, обладающая следующими достоинствами: возможностью моделирования реалистичного внешнего вида и качества сварного шва; возможностью моделирования напряженно-деформированного состояния сваренных деталей и температурных полей в режиме реального времени; базой данных для моделирования большего количества сварочных технологий и применяемых материалов; возможностью моделирования процессов 3D-печати; наличием системы виртуального тестирования и анализа качества сварных деталей; системой сертификации; развлекательным модулем; доступом к кафедре экспертов; высокой экономической целесообразностью. Установлено, что качество имитации сварочных процессов виртуальным тренажером зависит от скорости графической составляющей и тем выше, чем выше уровни учета теплового влияния сварочного источника на нагрев свариваемого образца и возникающего напряженно-деформированного состояния. Библиогр. 13, табл. 1, рис. 10.

*Ключевые слова:* сварочный тренажер, ручная дуговая сварка, сварка дугой с неплавящимся электродом, сварка дугой с плавящимся электродом, искусственный интеллект, виртуальная сварка

Как отмечают ведущие специалисты-сварщики различных стран мира, вопросам обучения и повышения квалификации рабочих-сварщиков следует уделять постоянное внимание [1]. Также важным моментом является правильная организация сварочных работ и соблюдение соответствующих норм охраны труда на промышленных предприятиях. В последнее время работы в этих направлениях велись в недостаточном объеме как в Украине, так и в некоторых других странах мира, в том числе в Китае. Это привело к снижению количества подготовленных рабочих-сварщиков, а также к падению заинтересованности таких рабочих в трудоустройстве по специальности. Так, вице-президент одной из компаний, расположенных в зоне дельты реки Янцзы, отмечает: «Мы столкнулись с очень большой проблемой. Мы не можем найти высококвалифицированных сварщиков, которые согласились бы работать за 280000 юаней (\$40000) в год». В городе Ухань (КНР) наблюдается катастрофическая нехватка высококвалифицированных сварщиков.

Проблему решения нехватки высококвалифицированных сварщиков в Китае пытаются решить различными путями. Так, для реализации проекта по строительству скоростных железных дорог китайское правительство отправило лучших китайских сварщиков на курсы повышения квалификации в Германию. Расходы на такое обучение достигли 1 млн евро. Обычной практикой для Китая является обучение сварщиков на курсах внутри страны. Но и в этом случае тратятся десятки миллионов. Однако данная проблема носит не только экономический характер. К социальному аспекту проблемы нехватки сварщиков относятся предрассудки, связанные с этой профессией. Сюда относятся убеждения о связанном с профессией низком социальном статусе, плохих условиях труда, не высокой заработной плате. Все это приводит к нежеланию молодых людей учиться сварочному делу. К техническим проблемам, снижающим популярность профессии, относятся: высокий уровень загрязнения рабочего места (пыль, брызги и др.) и профессиональные риски. Имеют-

ся и проблемы, непосредственно связанные с обучением персонала: сложности реализации учебного процесса и оценки обученных специалистов, потребление больших количеств расходных сварочных материалов и энергоносителей, выделение учебного времени и оборудования и др.

Одним из эффективных путей решения проблемы нехватки высококвалифицированных сварщиков является использование виртуальных систем сварки для их обучения. Такие системы базируются на искусственном интеллекте, заложенном в основу компьютеризированного тренажера, снабженного адаптированным под задачи обучения интерфейсом. Международный институт сварки уже начал применять такие системы для обучения сварщиков [2]. Уже сейчас такие системы расширяют возможности обучения за счет увеличения количества моделируемых сварочных технологий и методов сварки. Можно ожидать, что в будущем они помогут различным учреждениям значительно уменьшить себестоимость обучения специалистов.

Целью данной работы является создание искусственного интеллекта для обучения сварщиков, позволяющего разработать виртуальную систему обучения сварке в реальном времени с функциями прогнозирования и моделирования морфологии, а также интеллектуальной оценкой качества сварного шва. Для достижения данной цели решались следующие задачи:

1. Анализ существующих виртуальных сварочных тренажеров, определение их достоинств и недостатков.

2. Виртуальное моделирование в реальном времени различных процессов сварки соединений разных типов для определенного набора свариваемых материалов, включающее моделирование сварочной ванны, разбрызгивания металла из нее, возникающих тепловых полей, прогнозирования формирования шва, а также отображение рабочих параметров сварочных процессов и оценка качества сварных изделий.

3. Разработка пользовательского интерфейса для использования очков (шлема) виртуальной реальности, различных видов сварочного инструмента и рабочей платформы с закрепленными деталями.

4. Создание и испытание виртуального сварочного тренажера с системой искусственного интеллекта, сравнение с существующими аналогами.

Разработки в области виртуальных систем сварки ведутся с начала 1980-х годов. Так, разработанный в 1981 г. ИЭС им. Е. О. Патона совместно с ИПМЭ им. Г. Е. Пухова НАН Украины дисплейный тренажер ЭТС впервые позволил оценить на практике перспективность использова-

ния информационных технологий при подготовке сварщиков [3] и послужил прообразом целой гаммы тренажеров, разработанных впоследствии. В сотрудничестве с ИЭС им. Е.О. Патона развитие систем сварочного тренинга продолжил SLV Halle (Германия) и, как первый европейский институт, предложил полезный в обучении сварочный тренажер [4]. В начале 2000-х годов в развитии и усовершенствовании технических средств подготовки сварочного персонала (сварочных тренажеров) четко выделились две тенденции — создание глубоко виртуальных и полувиртуальных систем [5]. Последние в то время были признаны наиболее приближенными к реальным процессам сварки, позволяющими эффективно вырабатывать, совершенствовать и закреплять необходимые стойкие психомоторные навыки сварщиков. На сегодня более корректно разделять существующие сварочные тренажеры на следующие виды:

**Компьютеризированные.** Являются максимально приближенными к реальным сварочным процессам. В них применяется электрическая дуга малой мощности, реальный шов отсутствует, движения сварщика прослеживаются в виде линии плавления на металлической пластине, режимы и их изменение в зависимости от движений сварщика фиксируются при помощи компьютерной программы [6]. К тренажерам такого типа можно отнести ТСДС-06М1 (ИЭС им. Е.О.Патона, Украина) [7], GSI SLV Welding Trainer (GSI SLV, Германия) [5] и Real Weld Trainer (Real Weld Systems, Inc., США) [6].

**Полувиртуальные.** В них применяют виртуальные технологии для частичного моделирования сварочного оборудования и свариваемых деталей. При этом используются физические модели свариваемых деталей. Этот тип тренажеров также называют тренажерами с дополненной реальностью. К ним относятся Soldamatic Augmented Training (Seabery Soluciones, Испания) [8], Miller Augmented Arc (США).

**Виртуальные.** В них применяются виртуальные технологии моделирования окружающей среды, свариваемых деталей, сварочного оборудования и т. д. Наличие физических объектов сведено к минимуму. Примерами таких тренажеров являются The Lincoln Electric VRTEX 360 (США) [9], 123 Certification ARC®+ (Канада), Fronius Virtual Welding (Fronius, Австрия) [10], «Волжанка-1» (г. Нижний Новгород, РФ) [11], Weihai V60 (КНР).

Рассмотрим более подробно основные из перечисленных моделей, относящихся к этим трем видам сварочных тренажеров.

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработан тренажер ТСДС-06М1, относящийся к компьютеризированным тренажерам [5]. Его ос-



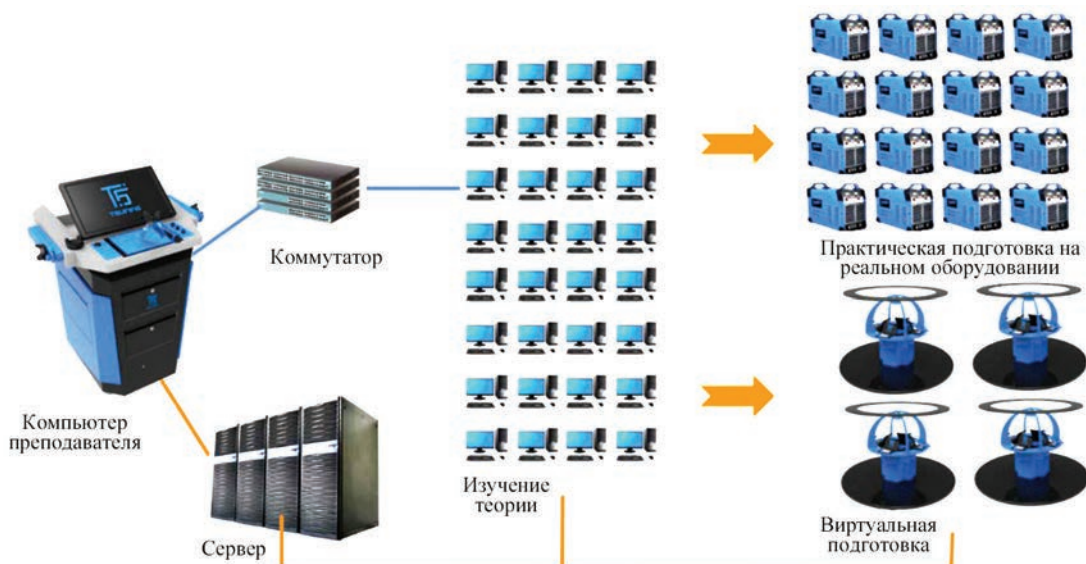


Рис. 1. Концепция комплекса для обучения сварке, включающая реальные и виртуальные тренажеры

новным преимуществом является максимальная приближенность к реальным условиям сварки за счет использования малоамперной дуги. Однако этот тренажер ориентирован только на ручную дуговую сварку покрытыми электродами (ММА) и ручную сварку неплавящимся (вольфрамовым) электродом в среде инертных газов (ТИГ) с подачей присадочной проволоки и без нее, а также на сварку плавящимся электродом в среде инертных/активных газов (MIG/MAG). В нем имеется оперативная автоматическая обратная связь с обучающей системой в виде речевых сигналов. В классе компьютеризированных сварочных тренажеров модель ТСДС-06М1 является одной из лучших. Близкой к нему разработкой является тренажер GSI SLV Welding Trainer (GSI SLV, Германия) [5]. В отличие от тренажера ТСДС-06М1 сварочный тренажер с дополненной реальностью Soldamatic позволяет при помощи виртуальной сварочной маски имитировать основные сварочные технологии: ММА, ТИГ и МИГ/МАГ (ручную сварку плавящимся электродом в среде инертных/активных газов) [8]. Для полной имитации сварочных процессов тут используются физические модели свариваемых деталей (или их пластиковая имитация) с нанесенным на поверхности QR-кодом. За счет наличия QR-кодов на моделях деталей и сварочных горелках на дисплее маски дополненной реальности имитируется процесс сварки. Данный тренажер является одним из наиболее популярных в мире. Его используют такие фирмы, как Abicor Binzel, Miller и др. Аналогичным образом устроен сварочный тренажер VRTEX 360 фирмы Lincoln Global, Inc (США) [9]. В отличие от тренажера Soldamatic тренажер VRTEX 360 снабжен виртуальным сварочным шлемом с индивидуальной настройкой фокуса каждого из окуляров. Тренажер Virtual Welding фирмы Fronius может в большей

степени считаться виртуальным [10]. На нем можно обучаться как с применением физических моделей, так и без таковых. При этом сварщик должен работать стоя. В чистом виде виртуальным является сварочный тренажер «Волжанка-1», разработанный в Сормовском механическом техникуме (г. Нижний Новгород, РФ) [11]. Он снабжен шлемом, полностью воссоздающим виртуальную реальность трех вышеуказанных сварочных процессов без необходимости применения физических моделей. Сварщик может работать как стоя, так и сидя.

В современных компьютерных тренажерах за счет использования сенсорных камер, компьютерных систем обратной связи и специального программного обеспечения происходит считывание и расчет различных сварочных параметров в процессе сварки на малоамперном сварочном токе. Это можно рассматривать как существенный недостаток системы обучения, так как сварочный процесс не воспроизводится в полной степени – возникает потребность в использовании расходных материалов и специально оборудованных учебных классов, отсутствует возможность полноценной регулировки силы тока, затрудняются регулировка в реальном времени расхода подачи газов, выбор этих газов и их смесей, выбор типа и состава присадочного материала и т. д. В виртуальных системах все это доступно в полной мере. Преимуществами компьютеризированных систем являются возможности работы со сварочной горелкой в условиях максимально приближенных к реальной сварке, ознакомление со сварочной дугой, тренировка ее поджига. В свою очередь виртуальные системы предоставляют следующие преимущества:

1. Мониторинг процесса обучения каждого учащегося с компьютера-тренажера преподавателем

ля (инструктора) либо непосредственное наблюдение за прогрессом учащегося на мониторе тренажера, за которым тот работает.

2. Возможность для преподавателя (инструктора) в режиме реального времени оказывать помощь и корректировать работу учащегося.

3. Доступна опциональная возможность контроля в режиме онлайн/офлайн и корректировка работы непосредственно специалистами компании-разработчика тренажера, либо ведущими специалистами по сварке международных учебных и исследовательских учреждений, с которыми сотрудничает компания-разработчик.

4. Доступ к форуму для обсуждения с инструкторами и специалистами интересующих учащихся вопросов.

5. Лекции ведущих специалистов по сварке в режиме онлайн/офлайн.

6. Учащийся получает визуальные и звуковые подсказки от самой системы в процессе сварки.

7. Устранение риска возникновения травм у учащихся в процессе обучения.

8. Возможность использования нескольких уровней сложности обучения. Например, трех уровней – новичок, продвинутый, профессионал. В зависимости от уровня сложности меняются сварочные параметры, материалы, поставленные задачи. Это помогает инструктору в разработке и внедрении собственных планов обучения.

9. Автоматическая оценка работы учащегося системой. По окончании каждого процесса/этапа сварки учащийся и инструктор получают расчеты в виде диаграмм и графиков, где указаны посекундные сварочные параметры, наличие дефектов и т.д., что облегчает работу преподавателя (инструктора).

Перечисленные преимущества, а также большее количество разработок моделей сварочных тренажеров (например, [8-11]), свидетельствует о преобладании заинтересованности ведущих мировых фирм, связанных со сваркой, в использовании виртуальных и полувиртуальных сварочных тренажеров по сравнению с компьютеризированными.

К основным достоинствам рассмотренных виртуальных и полувиртуальных сварочных тренажеров относятся:

- возможность значительно снизить стоимость обучения за счет экономии материалов образцов, электроэнергии, газов и сварочных материалов;

- возможность имитировать основные процессы сварки в различных пространственных положениях;

- наглядная оперативная демонстрация ошибок сварщика;

- регистрация всех параметров сварочного процесса с возможностью их повторного воспроизведения для лучшего понимания влияния действий сварщика на качество получаемого результата.

Особенностями исполнения того или иного сварочного тренажера являются уровень учета теплового влияния сварочного источника на нагрев свариваемого образца и уровень учета возникающего напряженно-деформированного состояния (НДС). Чем выше эти уровни, тем ближе к реальности результаты виртуальной имитации сварочных процессов. Качество имитации сварочных процессов в виртуальной среде на прямую зависит от движка, на котором создается графическая составляющая. К недостаткам рассмотренных тренажеров относятся:

- ограниченное количество моделируемых сварочных процессов (обычно ММА, ТИГ и МИГ/МАГ);

- ограниченное количество сварочных материалов и материалов свариваемых образцов;

- использование индивидуального подхода в обучении, отсутствие использования сетевых ресурсов и удаленного доступа;

- отсутствие возможности получения реального опыта проведения сварочных процессов;

- неполное использование возможностей виртуальной реальности.

Для устранения указанных недостатков и учета описанных особенностей целесообразно применить следующую концепцию создания комплекса для обучения сварке (рис. 1). Виртуальная подготовка сварщика должна перемежаться с реальной и быть основанной на глубоком изучении теории. Переход к сварочной практике возможен только после изучения теории и только в условиях непрерывного контроля преподавателя за процессом обучения. Такой контроль может осуществляться как непосредственно, так и в режиме удаленного доступа, что обеспечит один из вариантов обратной связи. Виртуальные сварочные тренажеры должны объединяться в единую сеть, дающую возможность ученикам с хорошей успеваемостью помогать отстающим учащимся, что обеспечит другой вариант обратной связи. Базы данных для моделирования сварочных процессов должны храниться на удаленных серверах и по возможности пополняться обновляющейся информацией об используемых материалах и процессах. Отдельные виртуальные сварочные тренажеры должны иметь структуру, показанную на рис. 2. Впервые нами предлагается помимо обучающих модулей добавить развлекательный. Как показывает практика, периодическое кратковременное переключение внимания учащихся с объекта обучения на развле-

кательный объект повышает эффективность усвоения знаний.

Для реализации предложенной концепции комплекса обучения сварке необходимо реализовать общий для всей его виртуальной части искусственный интеллект (рис. 3). Он должен состоять из базы данных для моделирования изучаемых сварочных процессов, системы работы с этими данными, системы диалогового режима для общения с обучающимся сварщиком и программной оболочки, объединяющей эти три части в единое целое.

Одной из задач работы искусственного интеллекта является реализация в процессе обучения обратной связи с компьютером преподавателя (инструктора). Инструктор должен иметь возможность в реальном времени удаленно давать задания, регулировать параметры сварки и наблюдать за процессом либо со своего компьютера, либо непосредственно на дисплеях тренажера. Обучающийся сварщик должен иметь возможность получения консультаций в режиме онлайн как от экспертов учебного учреждения, так и от специалистов компании-разработчика (в нашем случае – компании «Вэйхань наука и технология»), включая специалистов учреждений-партнеров, в число которых входят сварочные институты и ведущие мировые компании.

На основании описанных подходов компанией «Вэйхань наука и технология» (г. Шеньжен, КНР) с использованием опыта технологических разработок ИЭС им. Е. О. Патона и НТТУ «Киевский политехнический институт» разработан виртуальный сварочный тренажер Weihan V60 (рис. 4). Начало серийного выпуска компанией «Вэйхань наука и технология» модели Weihan V60, относящейся к линейке тренажеров Virtual Welding, запланировано в июне 2017 г.

При разработке концепции создания системы Virtual Welding V60 учитывались вышеуказанные особенности и по возможности устранялись характерные недостатки, присущие тренажерам для обучения сварке. Так, для максимального приближения виртуального тренажера к реальности в нем используются реальные сварочные горелки, на которые одеваются контроллеры Vive tracker, служащие маркером для моделирования горелки в виртуальной реальности (рис. 5). Такие контроллеры позволяют отслеживать положение и перемещение сварочных горелок в пространстве. Горелка MMA имеет специализированное исполнение. Ее конструкция и принцип работы схожи с горелкой MMA тренажера Augmented Arc welding

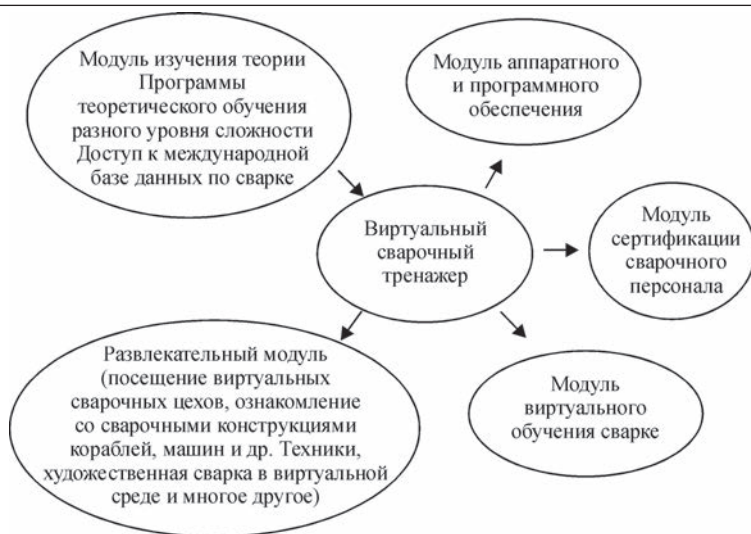


Рис. 2. Структура сварочного тренажера

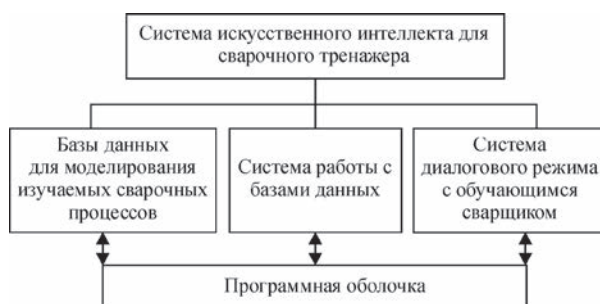


Рис. 3. Структура искусственного интеллекта для виртуального сварочного тренажера



Рис. 4. Виртуальный сварочный тренажер V60: 1 — мобильная платформа; 2 — сенсорный экран; 3 — виртуальная заготовка; 4 — кронштейн для имитации сварки в различных пространственных положениях; 5 — виртуальная сварочная горелка; 6 — ящик для хранения очков (шлема) виртуальной реальности; 7 — ящик для заготовок; 8 — ящик для горелок





Рис.5. Применение контроллера Vive tracker для моделирования виртуальных сварочных горелок на основе реальных и отслеживания их пространственных перемещений: *а* — контроллер Vive tracker; *б* — реальные сварочные горелки с надетыми на них контроллерами

simulator компании Miller (США) (рис.6). В этой горелке для максимального приближения к условиям работы с реальным электродом имитируется его плавление с уменьшением в процессе сварки. Применение очков или шлема виртуальной реальности HTC Vive фирмы HTC (Корея) позволяет выполнять виртуальную сварку в любом положении на виртуальном образце (рис. 7), а дополнительный кронштейн (позиция 4 на рис. 4) позволяет также использовать реальные физические образцы. Шлем виртуальной реальности HTC Vive на сегодняшний день считается одним из лучших [12]. Он позволяет моделировать характерные звуки сварочных процессов. Дополнительный аксессуар (контроллер Vive tracker) позволяет добавить любой новый предмет в виртуальную реальность. Отметим, что современные технологии сделали шлем виртуальной реальности сравнительно недорогим и доступным аксессуаром, применение которого способно улучшить учебный процесс в любом из трех видов сварочных тренажеров. Для достижения высокого качества имитации сварочных процессов в виртуальной среде в тренажере V60 использовано программное обеспечение Unity, который является одним из лучших на сегодняшний день [13].

В тренажере V60 применено моделирование сварного шва, сварочной ванны, разбрызгивания

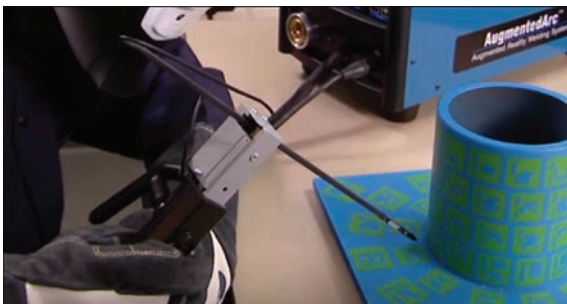


Рис.6. Виртуальная горелка MMA, имитирующая плавление электрода с его уменьшением в процессе сварки

из ванны, температурных полей (рис. 8). В реальном времени отображаются рабочие параметры процесса сварки, а также вся сцена сварки в целом. Все это дает возможность получить реалистичную картину шва, получаемого в процессе виртуальной сварки (рис. 9).

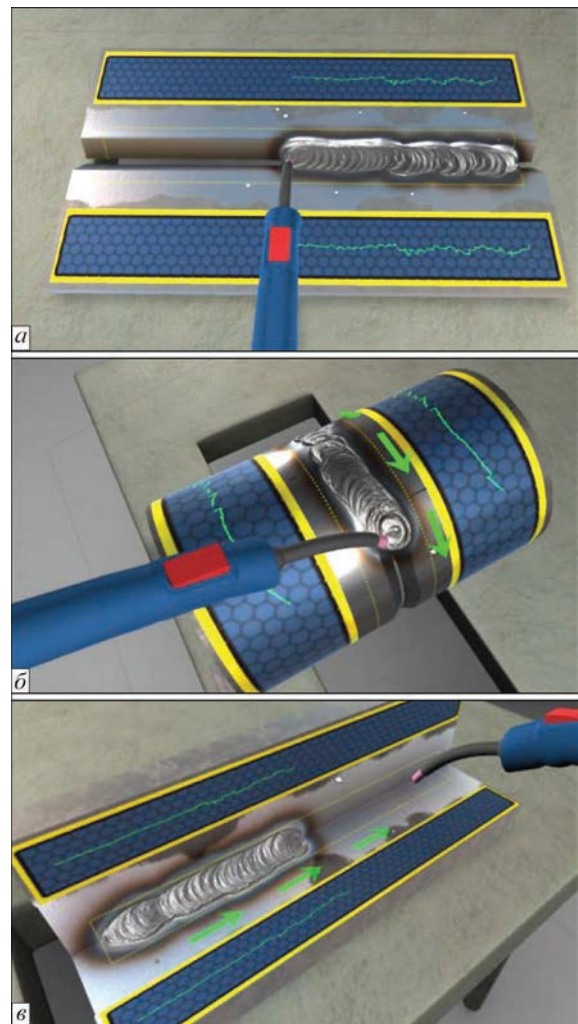


Рис.7. Виртуальная сварка МИГ/МАГ на тренажере V60: *а* — стык в нижнем положении; *б* — орбитальная сварка неповоротного стыка; *в* — угловой шов

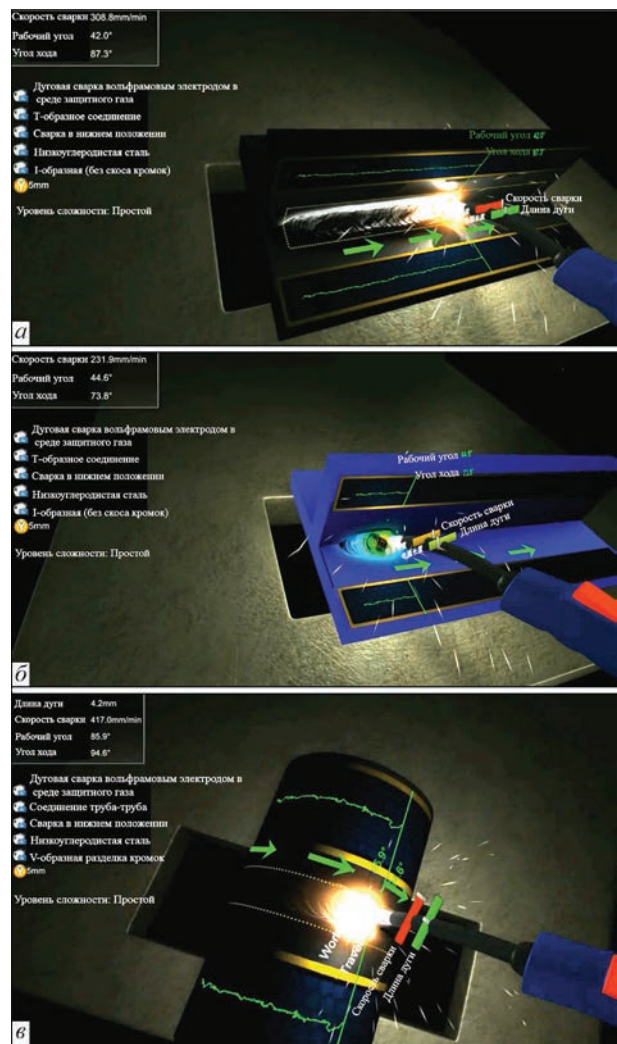


Рис. 8. Отображение параметров процесса сварки ТИГ в реальном времени с учетом динамики температурных полей и разбрызгивания из ванны на тренажере V60: а, б — тавровое соединение; в — орбитальная сварка неповоротного стыка

На сегодняшний день тренажер V60 работает с тремя основными сварочными процессами (ММА, ТИГ и МИГ/МАГ), но активно ведутся работы по моделированию процессов плазменной и лазерной сварки. В дальнейшем предполагается смоделировать такие гибридные сварочные процессы, как лазер-МИГ, плазма-МИГ и лазер-плазма.



Рис. 10. Дизайн станции виртуального обучения с четырьмя сварочными тренажерами V60

Виртуальные тренажеры V60 предлагается объединять по четыре в учебные станции (рис. 10). Станции, в свою очередь, объединяются в сеть учебного класса, позволяющую реализовывать связи «учащийся – учащийся», «учащийся ↔ преподаватель», «учащийся – специалист-консультант». По сравнению с существующими аналогами разработанная система искусственного интеллекта и обучающей сети сварочных тренажеров V60 позволяет достичь ряда дополнительных преимуществ (таблица). Среди основных преимуществ можно выделить следующие:

- моделирование реалистичного внешнего вида и качества сварного шва;
- моделирование напряженно-деформированного состояния сваренных деталей;
- моделирование температурных полей в режиме реального времени;
- моделирование большого количества сварочных технологий и применяемых материалов, а также процессов 3D-печати;
- виртуальное тестирование и анализ качества сварных деталей;
- система сертификации; развлекательный модуль; доступ к кафедре экспертов;
- высокая экономическая целесообразность.

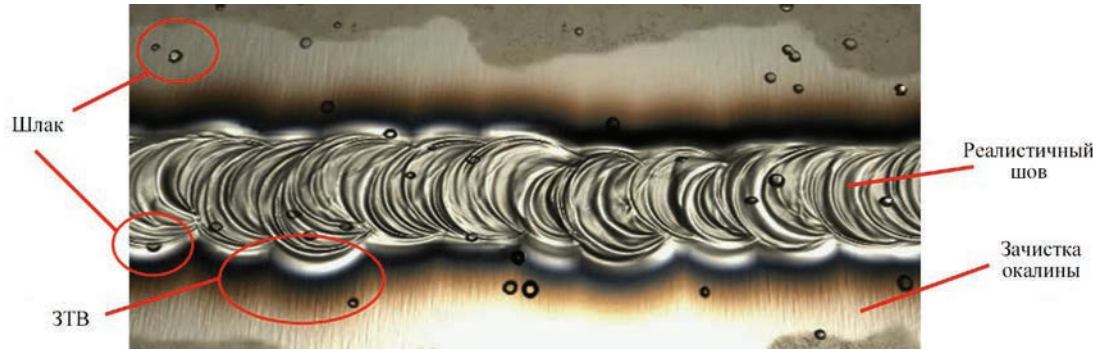


Рис. 9. Отображение реалистичной картины шва, получаемого в процессе виртуальной сварки на тренажере V60



Преимущества разработанной системы искусственного интеллекта и обучающей сети сварочных тренажеров V60 по сравнению с существующими аналогами (подчеркиванием выделено отличие от аналогов [3–11])

Система виртуального обучения сварщиков			
Модуль обучения	Модуль сертификации	Развлекательный модуль	Модуль аппаратного обеспечения
Изучение теории <u>Анимационная визуализация процессов</u> <u>Лекции ведущих специалистов по сварке</u> <u>Доступ к наиболее распространенным данным по сварке</u>	Система международной сертификации Национальная система сертификации Система сертификации ядерных сварщиков	<u>Виртуальный инжиниринг</u> <u>Художественная сварка</u> <u>Граффити при помощи сварки</u> <u>Посещение виртуальных сварочных цехов, автоматических сварочных линий</u>	Рабочая платформа тренажера Оптическое отслеживание перемещения Сварочный шлем Сварочные горелки Тач-панель Главный компьютер Проектор <u>Имитация дефектов</u>
Модуль виртуального обучения			
Положения детали при сварке	Сварочные материалы	Сварочные технологии	Типы соединений
Нижнее положение Потолочное положение Вертикальное положение Горизонтальное положение	<u>Титан и титановый сплав</u> <u>Магний и магниевый сплав</u> <u>Низкоуглеродистая сталь</u> <u>Алюминий и алюминиевый сплав</u> <u>Нержавеющая сталь</u> <u>Медь и медный сплав</u> <u>Оцинкованная сталь</u>	Ручная дуговая сварка Сварка плавящимся электродом ТИГ сварка <u>Лазерная сварка</u> <u>Плазменная сварка</u> <u>Приварка шпилек</u>	Горизонтальное стыковое Т-образное Соединение труба-труба Соединение труба-пластина Соединение пластин внахлест

Отдельно стоит отметить, что примененные в сварочном тренажере Virtual Welding V60 базы данных, концепция и виртуальный программный продукт могут быть положены в основу создания сварочной маски с дополненной реальностью. В такой маске на реальную картину процесса сварки накладывается виртуальная, позволяющая сварщику непосредственно в процессе работы корректировать положение горелки и скорость процесса так, чтобы получать наилучший результат. Создание маски с дополненной реальностью может быть следующим шагом в развитии различных сварочных технологий.

### Выводы

1. Создана система искусственного интеллекта для обучения сварщиков, позволяющая проводить виртуальное обучение сварке в реальном времени с функциями прогнозирования и моделирования морфологии, а также интеллектуальной оценкой качества сварного шва.

2. На основе анализа существующих виртуальных сварочных тренажеров было установлено, что их основными недостатками являются ограниченное количество моделируемых сварочных процессов (обычно ММА, ТИГ и МИГ/МАГ); ограниченное количество сварочных материалов и материалов свариваемых образцов; отсутствие использования сетевых ресурсов и удаленного доступа; отсутствие возможности получения реального опыта проведения сварочных процессов; неполное использование возможностей виртуальной реальности.

3. Установлено, что качество имитации сварочных процессов виртуальным тренажером зависит от движка графической составляющей и тем

выше, чем выше уровни учета теплового влияния сварочного источника на нагрев свариваемого образца и возникающего напряженно-деформированного состояния.

4. Разработанная система искусственного интеллекта для сети сварочных тренажеров V60 обладает следующими достоинствами: возможностью моделирования реалистичного внешнего вида и качества сварного шва; возможностью моделирования напряженно-деформированного состояния сваренных деталей и температурных полей в режиме реального времени; базой данных для моделирования большего количества сварочных технологий и применяемых материалов; возможностью моделирования процессов 3D-печати; наличием системы виртуального тестирования и анализа качества сварных деталей; системой сертификации; развлекательным модулем; доступом к кафедре экспертов; высокой экономической целесообразностью.

### Список литературы

1. Липодаев В. Н. (2014) Семинар «Проблемы организации сварочных работ в Украине. Новые технологии и оборудование для высококачественной сварки». *Автоматическая сварка*, **1**, 68–71.
2. Патон Б. Е., Коротынский А. Е., Богдановский В. А. и др. (2010) Информационные технологии при подготовке сварщиков и специалистов сварочного производства: современные тенденции. *Сварка и Диагностика*, **1**, 10–15.
3. Патон Б. Е., Богдановский В. А., Васильев В. В., Даниляк С. Н. (1988) Электронные тренажерные системы в сварке. *Автоматическая сварка*, **5**, 45–48.
4. <http://www.svarka.info.ru/rus/lib/blog/?year=2011-06&docId=1044>: *Использование сварочных тренажеров в обучении специалистов по сварке*.
5. Кайтель С., Арнс С., Молл Х. (2014) Использование компьютерных технологий в обучении сварщиков. *Автоматическая сварка*, **10**, 54–58.



6. (2014) IIW Commission XIV Workshop success: Showcasing latest international developments in welding training systems. *Australasian Welding Journal*, **59**, 18–22.
7. <http://stc-paton.com/rus/services/simulator06/>: *Обучение персонала сварочного производства и сертификация продукции сварочного и родственных производств. Тренажеры сварщика для электродуговой сварки. Тренажер ТДС-06М.*
8. [http://avtograph-oem.ru/press-center/news/prezentaciya\\_virtualnogo\\_trenazhera\\_svarwika\\_soldamatic/](http://avtograph-oem.ru/press-center/news/prezentaciya_virtualnogo_trenazhera_svarwika_soldamatic/): *Презентация виртуального тренажера сварщика Soldamatic.*
9. [http://www.lincolnelectric.com/ru-ru/equipment/training-equipment/Documents/VRTEX\\_360\\_brochure\\_rus.pdf](http://www.lincolnelectric.com/ru-ru/equipment/training-equipment/Documents/VRTEX_360_brochure_rus.pdf): *Виртуальный тренажер сварщика VRTEX 360.*
10. [http://tctena.ru/stati/virtual\\_welding](http://tctena.ru/stati/virtual_welding): *Сварные соединения в мире виртуальной подготовки.*
11. <http://www.ruspromsoft.ru/solutions/education/welding-trainer>: *Виртуальный тренажер сварки Волжанка-1.*
12. <https://www.vive.com/ru/product/>: *Система виртуальной реальности Vive.*
13. <http://fb.ru/article/178300/igrovoy-dvijok-unity-unity-d-porusski>: *Ильюшенко Н. Игровой движок Unity. Unity 3D по-русски.*

Юйхуей Яо<sup>1</sup>, С. І. Пелешенко<sup>1</sup>,  
В. М. Коржик<sup>2</sup>, В. Ю. Хаскін<sup>2</sup>, В. В. Квасницький<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Компанія «Вейхань наука і технологія», м. Шеньжен, КНР  
(Shenzhen Weihai Science and Technology Co., Ltd., PRC)

<sup>2</sup>ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua  
<sup>3</sup>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».  
03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37.

КОНЦЕПЦІЯ СТВОРЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ  
ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ І КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОГО  
ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ВІРТУАЛЬНОГО ЗВАРЮВАННЯ

Одним з ефективних шляхів вирішення проблеми нестачі висококваліфікованих зварників є використання віртуальних систем зварювання для їх навчання. Такі системи базуються на штучному інтелекті, закладеному в основу комп'ютеризованого тренажера, забезпеченого адаптованим під завдання навчання інтерфейсом. Вже зараз такі системи розширюють можливості навчання за рахунок збільшення кількості модельованих зварювальних технологій і методів зварювання. Можна очікувати, що в майбутньому вони допоможуть різним установам значно зменшити собівартість навчання фахівців. Метою роботи було створення штучного інтелекту для навчання зварників, що дозволяє розробити віртуальну систему навчання зварюванню в реальному часі з функціями прогнозування і моделювання морфології, а також інтелектуальної оцінки якості зварного шва. В результаті виконаної роботи була створена система штучного інтелекту для мережі зварювальних тренажерів V60, що має наступні переваги: можливість моделювання реалістичного зовнішнього вигляду і якості зварного шва; можливість моделювання напружено-деформованого стану зварених деталей і температурних полів в режимі реального часу; базою даних для моделювання більшої кількості зварювальних технологій та матеріалів; можливість моделювання процесів 3D-друку; наявність системи віртуального тестування і аналізу якості зварних деталей; системою сертифікації; розважальним модулем; доступом до кафедри експертів; високою економічною доцільністю. Встановлено, що якість імітації зварювальних процесів віртуальним тренажером залежить від швидкості графічної складової і тим вище, чим вище рівні обліку теплового впливу зварювального джерела на нагрів зварюваного зразка і напружено-деформованого стану, що виникає. Бібліогр. 13, табл. 1, рис. 10.

**Ключові слова:** зварювальний тренажер, ручне дугове зварювання, зварювання дугою з неплавким електродом, зварювання дугою з плавким електродом, штучний інтелект, віртуальне зварювання

Поступила в редакцію 19.04.2017

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

## РОБОТИЗИРОВАННАЯ СВАРКА ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ СПОСОБОМ ТОРТIG С СИСТЕМОЙ КОНТРОЛЯ РЕЖИМА СВАРКИ

Е. ТУРЫК<sup>1</sup>, Л. ШУБЕРТ<sup>1</sup>, С. ДУДЕК<sup>2</sup>, В. ГРОБОШ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт сварки. 44-100, Польша, г. Гливице, ул. Б. Чеслава, 16-18. E-mail: is@is.gliwice.pl

<sup>2</sup>Пратт и Утни. 35-078, Польша, г. Жешув, ул. Хетманска, 120

Разработан процесс роботизированной сварки ТОРТIG тонкостенных тавровых и стыковых соединений из никелевого сплава Инконель 718. Сварочная установка ТОРТIG 220 DC обеспечивает широкий диапазон регулирования параметров процесса сварки неплавящимся электродом в среде инертного газа с механизированной подачей присадочной проволоки и возможность роботизации сварки в местах с ограниченным доступом к зоне сварного шва. На основе результатов исследований роботизированной сварки ТОРТIG определены технологические особенности выполнения тавровых и стыковых соединений тонкостенных деталей из сплава Инконель 718. Измерительная система установки обеспечивает регистрацию технологических параметров процесса сварки, сигнализацию об отклонениях от заданных значений, формирование банка данных по технологиям сварки и возможность их просмотра. Проведенная аттестация показала, что разработанная технология сварки соответствует требованиям стандартов EN ISO 15614-1 и EN ISO 15613. Библиогр. 7, табл. 1, рис. 7.

*Ключевые слова:* роботизированная сварка, способ ТОРТIG, тонкостенные детали, жаропрочный никелевый сплав Инконель 718, мониторинг процесса сварки ТОРТIG

При ручной аргонодуговой сварке тонкостенных деталей качество сварного соединения во многом зависит от квалификации сварщиков. Для решения этой проблемы было предложено использовать способ роботизированной сварки ТОРТIG с механизированной подачей присадочной проволоки под углом 20° к оси вольфрамового электрода [1–3]. Система механизированной подачи присадочной проволоки в этом способе интегрирована с газовым соплом, что позволяет уменьшить размеры горелки и расширить возможности ее применения. В частности, новая горелка обеспечивает доступ к таким местам, в которых применение традиционной сварочной горелки TIG с механизированной подачей присадочной проволоки не представляется возможным (рис. 1).

Ниже, в качестве примера, описан опыт разработки технологии роботизированной сварки ТОРТIG тонкостенных деталей из никелевого сплава Инконель 718 с системой регистрации параметров процесса сварки.

**Разработка технологии сварки ТОРТIG тонкостенных деталей.** Технологические исследования проведены на сварочном посту, оснащем сварочным роботом CLOOS ROMAT 310 производства Carl Cloos Schweisstechnik GmbH и сварочной установкой ТОРТIG 220 DC производства Air Liquide Welding.

Выполнялись стыковые и тавровые сварные соединения образцов по стандарту EN ISO 15614-1 [4] и модельных деталей в соответствии со стандартом EN ISO 15613 [5]. Для сварки сплава Инконель 718 [6] использовали сварочную проволоку

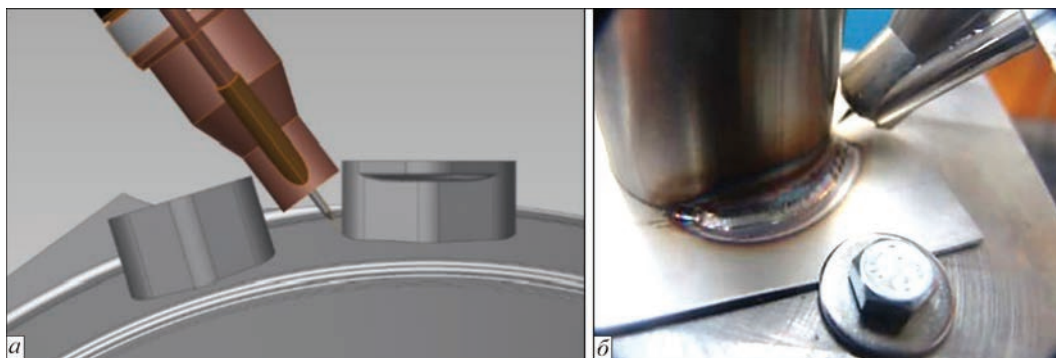


Рис. 1. Схема размещения сварочной горелки ТОРТIG между привариваемыми муфтами (а) и фрагмент сварного шва модельного элемента, выполненного горелкой ТОРТIG (б)

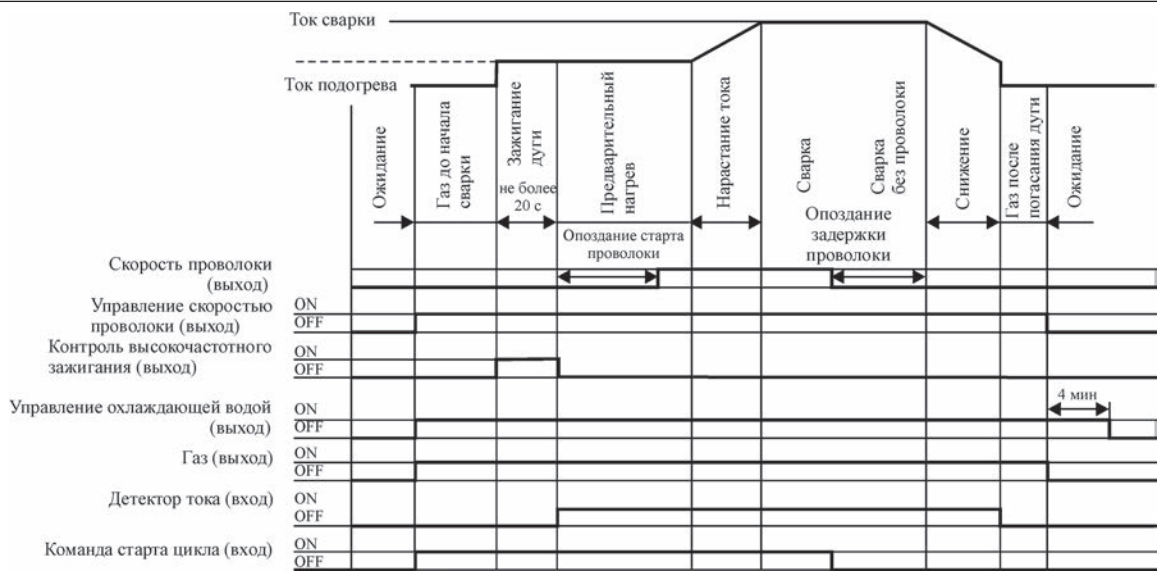


Рис. 2. Временная диаграмма цикла сварки TIG [7]

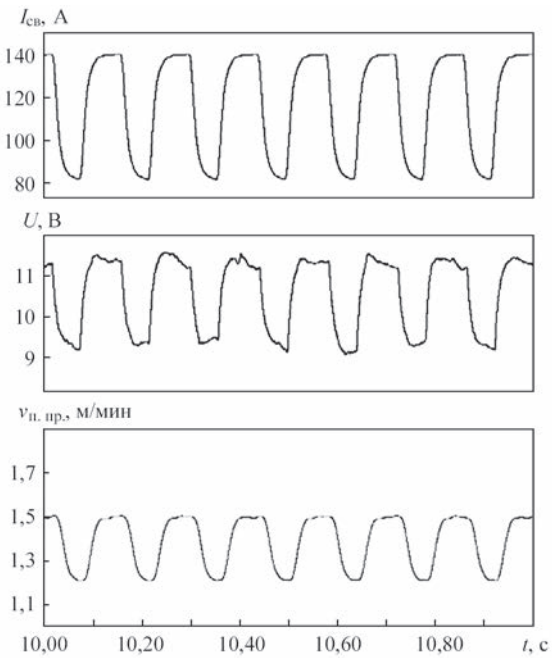


Рис. 3. Осциллограммы тока, напряжения дуги и скорости подачи проволоки во время сварки методом TIG

NiFe19Cr19Nb5Mo3 диаметром 1,0 мм. В качестве защитного газа применяли аргон высокой чистоты (ISO 14175-II) марки 4,8 (99,998 %), расход аргона составлял 15 л/мин. Временная диаграмма цикла сварки TIG представлена на рис. 2.

При выборе режима сварки необходимо учитывать специфику системы управления установки TIG 220 DC, обеспечивающей регулировку пульсации скорости подачи проволоки и возможность синхронизации подачи проволоки с импульсами тока. На рис. 3 показаны осциллограммы тока сварки, напряжения дуги и скорости подачи проволоки в процессе сварки TIG.

При проведении экспериментов в широком диапазоне изменяли параметры процесса сварки и оценивали их влияние на ход процесса и фор-

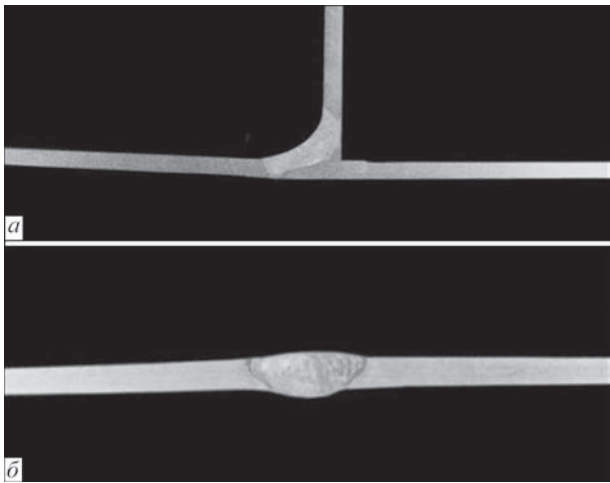


Рис. 4. Макроструктура таврового (а) и стыкового соединений (б) толщиной 1,5 мм, выполненных методом TIG с использованием параметров сварки по таблице

мирование сварных швов. В результате экспериментов подобраны режимы сварки тавровых и стыковых соединений в нижнем положении, обеспечивающие стабильный процесс и требуемое качество сварных швов (таблица). Макроструктура сварных соединений представлена на рис. 4.

Проведенный неразрушающий контроль и механические испытания показали, что разработанная технология полностью соответствует требованиям стандартов EN ISO 15614-1 и EN ISO 15613 по аттестации процесса сварки.

**Система измерения и контроля параметров роботизированного процесса сварки TIG.** Учитывая высокие требования, которые предъявляются к сварным соединениям из никелевого сплава Инконель 718, было решено оснастить серийный роботизированный комплекс для сварки TIG системой постоянного мониторинга процесса сварки (рис. 5).

На основании технической документации оборудования, входящего в состав роботизированно-



**Диапазон настройки параметров сварки на установке TOPTIG 220 DC и режимы сварки соединений деталей толщиной 1,5 мм**

Параметр	Диапазон регулировки	Тавровое соединение	Стыковое соединение
Время подачи газа до начала сварки, с	0...10	1,0	1,0
Ток предварительного подогрева, А	5...220	100	70
Время предварительного подогрева, с	0...10	1,4	1,4
Время нарастания тока до начала сварки, с	0...10	0,5	0,5
Ток импульса, А	5...220	140	130
Ток в паузе между импульсами, А	5...220	70	66
Скважность, %	20...80	60	60
Частота импульсов, Гц	0,1...200	7	7
Скорость сварки, см/мин		26	29
Время гашения дуги, с	0...10	1,0	1,0
Время прекращения подачи газа после обрыва дуги, с	0...20	19	19
Начальное замедление подачи проволоки, с	0...10	1,0	1,0
Скорость подачи проволоки при импульсе, м/мин	0...10	2,0	1,2
Скорость подачи проволоки в промежутке (паузе) между импульсами, м/мин	0...10	1,5	0,8
Задержка остановки подачи проволоки при гашении дуги, с	0...3	0,1	0,1

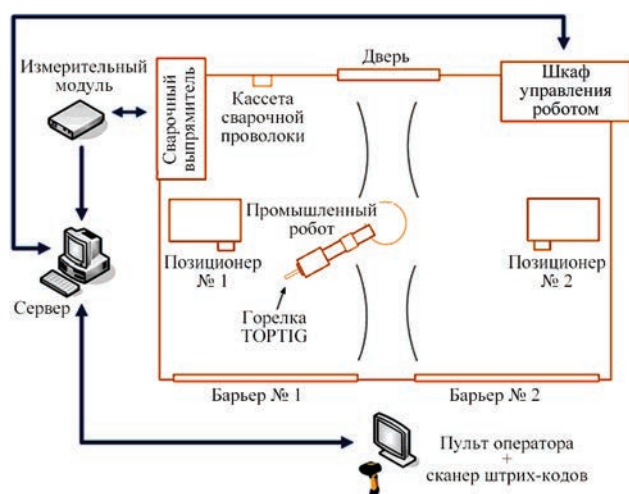


Рис. 5. Планировка поста роботизированной сварки TOPTIG с системой контроля параметров сварки

го сварочного поста, и результатов проведенных экспериментов выбраны параметры, которые необходимо контролировать, способ взаимодействия систем управления сварочной аппаратуры с системой управления роботом, и определены места монтажа датчиков системы мониторинга.

Система контроля полностью автоматизирована и ее работа синхронизирована с работой программы управления промышленным роботом, источником питания и сварочной головкой TOPTIG. При последовательном выполнении сварных швов (или их участков) данные о параметрах сварки регистрируются, обрабатываются, визуализируются и хранятся в базе данных.

Разработанная измерительная система для контроля технологических параметров процесса сварки TOPTIG на роботизированном посту обеспечивает регистрацию и запись в базе данных следующей информации:

- ток сварки;

- напряжение дуги;
- расход аргона подводимого в сварочную горелку и для защиты обратной стороны шва;
- чистота аргона (сигнал анализатора содержания кислорода в аргоне);
- скорость сварки (считывается из программы робота);
- скорость подачи проволоки;
- штриховые коды: идентификационного номера детали (свариваемого узла), номера заказа, номера серийного и контрольного, номера операции сварки (вводимые оператором поста с помощью сканера штрих-кодов);
- название программы сварки (считывается из программы робота);
- номер программы сварки (считывается из установки TOPTIG посредством системы управления роботом);
- дата и время сварки (считывается из программы робота);
- температура окружающей среды;
- относительная влажность;
- разбивка сварного шва на отдельные участки на основе сигналов от робота.

Компьютерная программа измерительной системы разделена на несколько независимых модулей так, чтобы обеспечить заранее определенную функциональность системы. На рис. 6 показано основное окно модуля «ОПЕРАТОР», предназначенного для оператора поста. Программа взаимодействует с модулем «РЕГИСТРАТОР», который в режиме онлайн пересылает зарегистрированные осциллограммы параметров сварки.

В окне программы можно выделить несколько панелей, в том числе панели диаграмм, информационную панель и панели сигнализации. Перед началом процесса сварки оператор вводит с по-

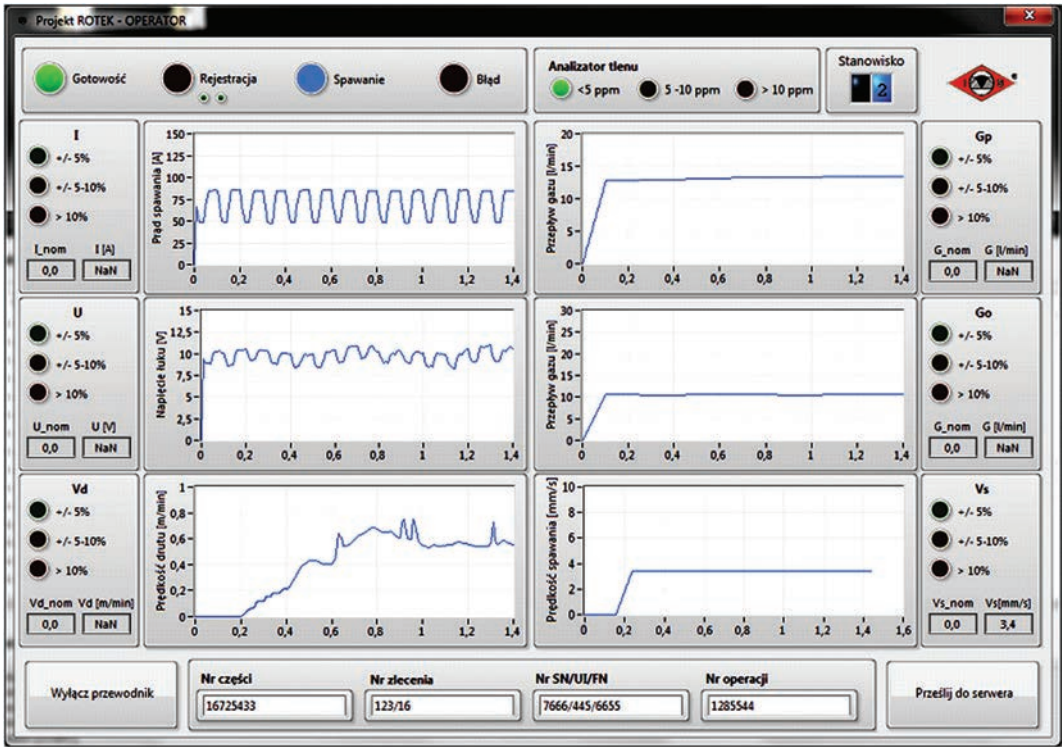


Рис. 6. Графический интерфейс пользователя программного модуля «ОПЕРАТОР»

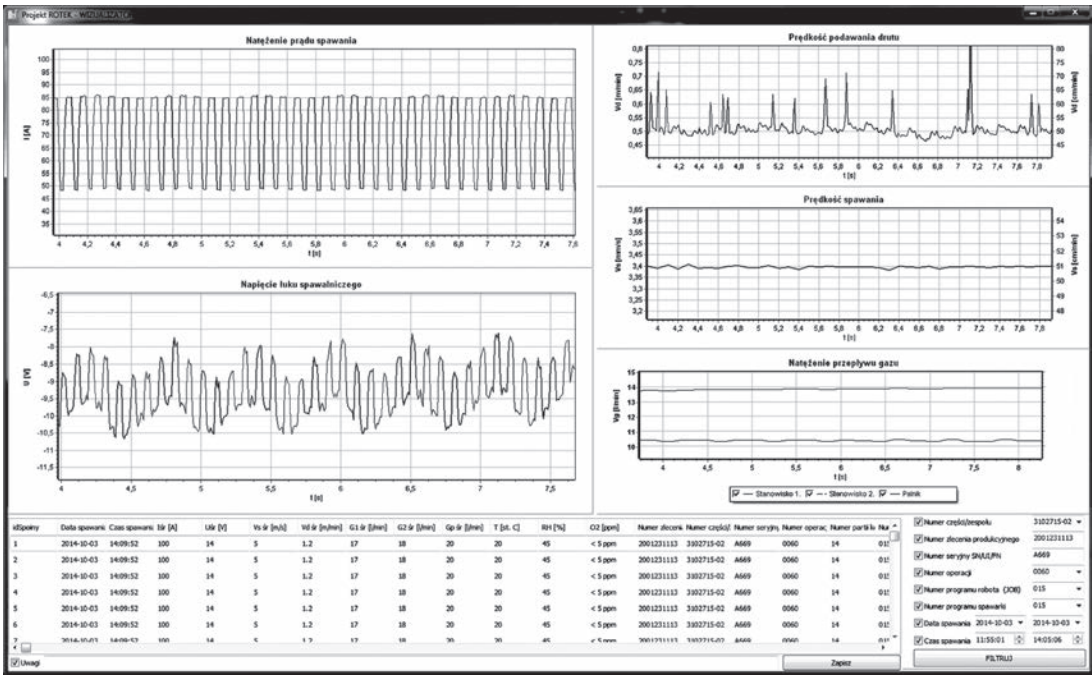


Рис. 7. Графический интерфейс пользователя программного модуля «ВИЗУАЛИЗАТОР»

мощью сенсорного экрана или сканера штрих-кодов данные в информационную панель (номер детали, номер заказа, контрольные номера, номер операции) из технологической карты свариваемой детали. Эти данные присоединяются к осциллограммам параметров сварки и сохраняются в базе данных. Обеспечена сигнализация нарушений заданного режима сварки.

На рис. 7 приведено главное окно модуля «ВИЗУАЛИЗАТОР». Основной задачей этого модуля является просмотр архивных данных, хранящихся

в базе. В этом окне можно выделить: панель диаграмм, которая показывает осциллограммы параметров сварки; таблицу записей данных, в строках которой хранятся значения параметров для очередных сварных швов; панель фильтра, с помощью которого можно выбрать подмножество данных на основе определенных параметров (например, номер детали, номер заказа, серийный номер, номер операции, номер программы робота, дата и время выполнения сварного шва). Программа обеспечивает возможность печатания со-

ответствующего отчета согласно потребностям пользователя.

### Заключение

Сварочная установка TOPTIG 220 DC обеспечивает широкий диапазон регулирования параметров процесса сварки неплавящимся электродом в среде инертного защитного газа с механизированной подачей присадочной проволоки и возможность роботизации сварки в местах с ограниченным доступом к зоне сварного шва. На основе результатов технологических исследований роботизированной сварки TOPTIG определены технологические параметры выполнения тавровых и стыковых сварных соединений тонкостенных деталей из сплава Инконель 718. Проведенная аттестация процесса сварки показала, что разработанная технология соответствует требованиям стандартов EN ISO 15614-1 и EN ISO 15613.

Замена ручной сварки TIG тонкостенных деталей роботизированной сваркой TOPTIG улучшила условия работы сварщиков и обеспечила высокое качество свариваемых деталей. Разработанная измерительная система обеспечивает регистрацию параметров процесса сварки, сигнализацию об отклонениях от заданных параметров сварки, формирование банка данных по технологиям сварки и возможность их просмотра.

### Список литературы

1. ООО «Эр Ликвид Велдинг Украина». (2010) TOPTIG: Инновационный процесс сварки неплавящимся электродом. *Сварщик*, 5, 15–17.
2. (2009) Технологии соединения для аэрокосмической промышленности. *Автоматическая сварка*, 8, 3–4.
3. Air Liquide Welding TOPTIG. (2017) A new robot welding process for industry. <https://www.oerlikon-welding.com> [Доступ 8.04.2017].
4. EN ISO 15614-1 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials: Welding procedure test.

Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys.

5. EN ISO 15613 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials: Qualification based on pre-production welding test.
6. High Performance Alloys, Inc. Inconel 718 Description. <http://www.hpalloy.com/Alloys/descriptions/INCONEL718.aspx> [Доступ 8.04.2017].
7. (2014) TOPTIG 220 DC Safety instructions for operation and maintenance. Cat n W000257751. *Air Liquide Welding*, 3, 73.

Є. Турик<sup>1</sup>, Л. Шуберт<sup>1</sup>, С. Дудек<sup>2</sup>, В. Гробош<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт зварювання.

44-100, Польща, м. Глівіце, вул. Б. Чеслава, 16-18.

E-mail: is@is.gliwice.pl

<sup>2</sup>Пратт і Утні.

35-078, Польща, м. Жешув, вул. Хетманська, 120

### РОБОТИЗОВАНЕ ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ СПОСОБОМ TOPTIG З СИСТЕМОЮ КОНТРОЛЮ РЕЖИМУ ЗВАРЮВАННЯ

Розроблено процес роботизованого зварювання TOPTIG тонкостінних таврових і стыкових з'єднань з нікелевого сплаву Інконель 718. Зварювальна установка TOPTIG 220 DC забезпечує широкий діапазон регулювання параметрів процесу зварювання неплавким електродом в середовищі інертного газу з механізованою подачею присадного дроту і можливість роботизації зварювання в місцях з обмеженим доступом до зони зварного шва. На основі результатів досліджень роботизованого зварювання TOPTIG визначені технологічні особливості виконання таврових і стыкових з'єднань тонкостінних деталей зі сплаву Інконель 718. Вимірвальна система установки забезпечує реєстрацію технологічних параметрів процесу зварювання, сигналізацію про відхилення від заданих значень параметрів, формування банку даних за технологіями зварювання і можливість їх перегляду. Проведена аттестация показала, що розроблена технологія зварювання відповідає вимогам стандартів EN ISO 15614-1 та EN ISO 15613. Бібліогр. 7, табл. 1, рис. 7.

**Ключові слова:** роботизоване зварювання, спосіб TOPTIG, тонкостінні деталі, жароміцний нікелевий сплав Інконель 718, моніторинг процесу зварювання TOPTIG

Поступила в редакцію 16.04.2017

## МИРОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО СТАЛИ

В январе 2017 г. производство стали в мире достигло 136,5 млн т, увеличившись по сравнению с январем 2016 г. на 7 %. Китай, Россия, Турция, Украина и Европейский Союз повысили выход стали.

По данным Worldsteel в ЕС произвели 13,824 млн т стали, что на 2,4 % выше в годовом исчислении. Германия — 3649 млн т, достигнув роста на 1,2 %. Италия увеличила производство на 5 тыс. т или на 0,3 % — до 1825 млн т. Россия произвела 6,183 млн т, увеличив выход стали на 11,6 %. Украина увеличила производство на 8,5 % до 2,103 млн т. В Беларуси произведено 200 тыс. т, что представляет собой увеличение до 31,6 %. Турция с производством 2,93 млн т зафиксировала рост на 12,8 %. В США производство увеличилось на 6,5 %, поднявшись до 6,874 млн т. Бразилия с производством 2,9 млн т зафиксировала рост на 14,4 %. В Азии было отмечено увеличение производства на 7,1 %. Производство в общей сложности в регионе составило 93,413 млн т, из которых 67,2 млн т произвел Китай (рост на 7,4 %). 9 млн т произведено в Японии, увеличение на 2,7 %. Индия выплавляла 8,4 млн т, в свою очередь обеспечив 12 % роста. В Южной Корее произведено 5,86 млн т, выход увеличился на 3,2 %.



## СТАБИЛИЗАЦИЯ СВАРОЧНОГО ТОКА КОНТАКТНЫХ ТОЧЕЧНЫХ МАШИН ПРИ КОЛЕБАНИЯХ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

Ю. Н. ЛАНКИН, В. Ф. СЕМИКИН, Е. Н. БАЙШТРУК

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

Рассмотрены подходы к созданию разомкнутых систем стабилизации сварочного тока контактных точечных машин при колебаниях напряжения питающей сети. Описан микроконтроллерный регулятор контактной сварки, обеспечивающий автоматическое определение начального угла между полнофазным током и напряжением машины, а также стабилизацию сварочного тока при колебаниях напряжения сети. Система определения угла и стабилизации тока выполнена в виде конечного автомата с цифровой моделью объекта управления, представленной в табличной форме. Это позволило использовать для регулятора простой восьмибитовый микроконтроллер широкого применения. Библиогр. 7, рис. 1.

*Ключевые слова:* стабилизация, сварочный ток, напряжение сети, контактная сварка

В производственных условиях на процесс контактной точечной сварки действуют многочисленные возмущения, приводящие к появлению дефектных соединений. Основными возмущающими воздействиями являются:

- колебания напряжения питающей сети;
- увеличение контактной поверхности электродов при их износе в процессе эксплуатации;
- увеличение полного сопротивления сварочного контура машины вследствие внесения в него значительных ферромагнитных масс при сварке деталей больших габаритов;
- шунтирование сварочного тока и приложенного к электродам усилия через ранее сваренные точки, расположенные в непосредственной близости от места сварки.

Более или менее значительные колебания напряжения питающей сети реально всегда имеют место при выполнении контактной сварки и поэтому в первую очередь требуется устранение их влияния на качество сварного соединения. Регулируемой переменной при контактной сварке обычно является действующее значение сварочного тока и гораздо реже напряжение между электродами или мощность, выделяющаяся в свариваемой точке.

Для исключения влияния внешних возмущающих воздействий используются разомкнутые системы автоматического управления (САУ) с регулированием по возмущению, либо с замкнутой отрицательной обратной связью по регулируемой переменной, либо комбинированные. Для контактной сварки исторически первыми стали разрабатываться разомкнутые САУ с управлением по возмущению, стабилизирующие сварочный ток только при колебаниях напряжения сети, а затем САУ с отрицательной обратной связью, ста-

лизирующие сварочный ток независимо от вида возмущений.

Разомкнутые САУ проще и надежнее замкнутых. Поэтому они нашли преимущественное распространение. Уже ранние, еще игнитронные, прерыватели сварочного тока типа ПИТ и ПИШ (з-д Электрик, г. Ленинград) со схемами управления на электронных лампах обеспечивали автоматическую стабилизацию напряжения сварочного трансформатора при колебаниях напряжения сети. Схема стабилизации была довольно сложна и требовалась тщательная наладка при изменениях  $\cos \phi$  контактной машины. Наличие фильтра в цепи управляющего напряжения приводило к некоторой инерционности стабилизатора, вследствие чего при жестких режимах сварки кратковременные колебания сети не могли быть скомпенсированы.

Первые транзисторные схемы управления током контактных машин, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР в 60-х годах, обеспечивали практически безынерционную стабилизацию тока при колебаниях напряжения сети [1], стабилизацию среднего значения напряжения на сварочном трансформаторе при колебаниях напряжения сети и  $\cos \phi$  машины [2]. Тогда же сотрудниками Института кибернетики АН УССР (В. Н. Никулин, В. И. Скурихин) совместно с ИЭС была разработана полностью цифровая система программного управления мощностью, выделяемой в зоне сварки, с регулированием по возмущениям — колебаниям напряжения сети, активного и реактивного сопротивления сварочного контура машины [3, 4]. Впервые были разработаны общие принципы построения таких устройств, решен ряд вопросов построения цифровых управляющих, измерительных и преобразующих устройств для аппаратуры управления контактными сварочными машинами.

Система была построена в виде автомата с конечным числом внутренних состояний. Все состояния представлены в виде таблиц, содержащих матрицу обратной модели объекта и измерительно-вычислительную матрицу, из которых считывается величина угла включения силовых вентилях контактора для каждого периода напряжения сети в зависимости от заданного значения мощности, напряжения сети и сопротивления нагрузки. Эта система на десятки лет опередила свое время. Только после появления микроконтроллеров были разработаны цифровые системы управления контактной сваркой, как правило, функционально уступающие ей.

Все современные микроконтроллерные регуляторы контактной сварки снабжены функцией «параметрической» стабилизации сварочного тока при колебаниях напряжения сети. Заявляется изменение действующего значения тока не более  $\pm 3\%$  при колебаниях напряжения сети от 0,9 до 1,05 номинального значения. Для обеспечения точности стабилизации в некоторых регуляторах, например, РКС-601, РКС-14, РКС-22, необходимо вручную ввести значение коэффициента мощности машины  $\cos \varphi$ . В большинстве же регуляторов, например, РКМ-511, РКМ-812, РКМ-1501, РКС-502, РКС-801(К155), РКС-807, РКС-901, осуществляется автоматическая настройка на коэффициент мощности. В наиболее совершенных регуляторах РКМ-802, РКМ-804, РКМ-805, РКМ-806, КСУ КС 02 реализуется комбинированный принцип регулирования. Они содержат одновременно замкнутый контур регулирования по отклонению сварочного тока от заданного значения и разомкнутый — по внешнему возмущению (напряжению питающей сети).

По-видимому, наиболее популярный алгоритм стабилизации тока при колебаниях напряжения сети для микропроцессорных регуляторов контактной сварки разработан специалистами ВНИИЭСО [5]. Согласно ему стабилизация тока производится в каждом полупериоде, начиная со второго, путем установления угла включения тиристоров  $\alpha$  в соответствии с выражением  $\alpha = IU/b_1 - b_0/b_1$ , где  $I$  — заданное значение тока, отнесенное к току однофазного включения при номинальном напряжении сети;  $U$  — измеренное напряжение сети, отнесенное к номинальному напряжению;  $b_0$ ,  $b_1$  — параметры регулировочной характеристики, представленные полиномами второй степени от коэффициента мощности однофазного включения сварочной цепи. Необходимое для расчета  $b_0$  и  $b_1$  значение  $\cos \varphi$  автоматически определяется в первом полупериоде по измеренному значению угла проводимости  $\lambda$  при некотором угле  $\alpha_0$ , заведомо меньшем  $\varphi$ , из выражения  $\cos \varphi = C_0(\alpha_0) + C_1(\alpha_0)\lambda$ , где  $C_0(\alpha_0)$  — полином второй степени  $\alpha_0$ ,  $C_1(\alpha_0)$  — полином третьей степени  $\alpha_0$  [6].

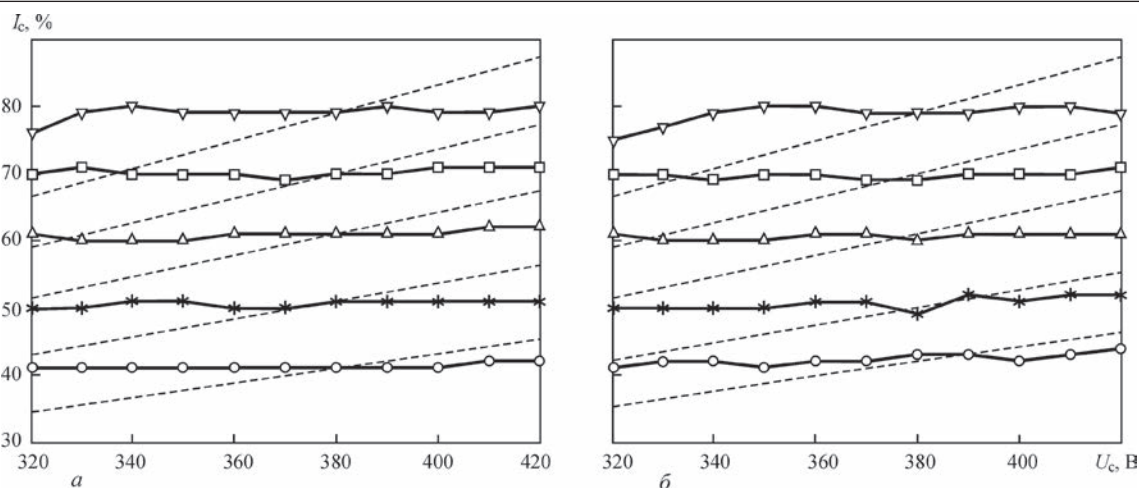
Автоматическое определение  $\cos \varphi$ , используемого для стабилизации тока при колебаниях напряжения сети, еще более необходимо для автоматического ограничения минимального угла включения тиристоров во всех без исключения регуляторах контактной сварки. Дело в том, что если установить угол включения тиристоров меньше угла  $\varphi$ , то сварочный контактор будет проводить ток полуволны только одной полярности и сварочный трансформатор перейдет в аварийный режим работы с подмагничиванием постоянным током. Для выполнения условия  $\alpha > \varphi$  удобнее измерять не  $\cos \varphi$ , а  $\varphi$  [7]. Там для  $\varphi$  используется выражение  $\varphi = a_0 + a_1\lambda + a_2\alpha + a_3\alpha^2$ , где  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  — постоянные коэффициенты.

В описанных выше и в большинстве других цифровых регуляторах тока при колебаниях напряжения сети используются довольно громоздкие аналитические модели объекта управления, требующие математических вычислений с плавающей запятой в реальном масштабе времени. Они предъявляют неоправданно высокие требования к мощности микроконтроллеров регуляторов. По нашему мнению, наиболее целесообразно использовать цифровые автоматы с конечным числом внутренних состояний, представленных в табличной форме. Такие автоматы не требуют математических вычислений по сложным формулам, что позволяет использовать для их реализации самые простые и дешевые микроконтроллеры.

Макет регулятора контактной сварки реализован на простом восьмиразрядном микроконтроллере PIC16F886. Регулятор обеспечивает регулирование длительности стандартного набора позиций сварочного цикла: сжатие, проковка, ток-импульс, пауза от 1 до 99 в периодах сети, а также задание тока сварки  $I_{\text{зад}}$  в диапазоне 25...90 % от однофазного тока.

Система стабилизации тока при изменении напряжения сети построена по схеме конечного автомата табличного типа. Угол  $\varphi$  сдвига однофазного тока относительно напряжения, приложенного к контактной машине, определяется при пропуске тока в первом периоде сварочного импульса. Для этого устанавливается фиксированный угол включения тиристоров  $\alpha_0 = 0,7\pi$ , достаточно большой, чтобы соответствующий ток был заведомо меньше заданного сварочного. По измеренным  $\lambda$  из таблицы  $\varphi$ - $\lambda$  для  $\alpha_0$  определяется значение  $\varphi$ .

В памяти микроконтроллера регулятора для различных значений  $\varphi$ , для которых  $\cos \varphi$  находится в диапазоне 0,2...0,8, заложено 7 таблиц зависимости  $I_{\text{ном}}$  от  $\alpha$ , при номинальном напряжении сети  $U_{\text{ном}}$ . Из этих таблиц можно выбирать  $\alpha$  для получения заданного значения сварочного тока. Однако при напряжении сети  $U_c \neq U_{\text{ном}}$  необхо-



Статические характеристики  $I_c = f(U_c)$  при изменении напряжения сети: а —  $\varphi = 0,2\pi$ ; б —  $\varphi = 0,35\pi$

можно использовать другую таблицу, рассчитываемую по выражению  $I_c(\alpha) = I_{\text{ном}}(\alpha)U_c/U_{\text{ном}}$ . С целью сокращения используемой памяти микроконтроллера рассчитывается лишь минимально необходимая часть этой таблицы для  $\alpha$ , изменяющихся через  $\Delta\alpha = \pi/200$  от  $\alpha_1$ , для которого  $I_{\text{ном}}(\alpha_1) = I_{\text{зад}}$ , до  $\alpha_2$ , для которого  $I_c(\alpha_2) = I_{\text{зад}}$ . Поскольку при этом используются быстрые операции программного умножения однобайтовых чисел и побитовых сдвигов вычисления даже на маломощных микроконтроллерах занимают достаточно мало времени. Таким образом, угол включения тиристорov, необходимый для получения заданного тока при номинальном напряжении сети, корректируется в соответствии с колебаниями напряжения сети, что обеспечивает стабилизацию тока.

На рисунке приведены экспериментальные статические характеристики регулятора при изменении напряжения сети для различных значений заданного тока и коэффициентов мощности нагрузки. Здесь же пунктиром показаны зависимости  $I_c = f(U_c)$  при отсутствии стабилизации. Из этого рисунка следует, что при колебаниях напряжения сети от 320 до 420 В действующее значение тока изменяется не более, чем на  $\pm 2\%$  от заданного. Лишь для тока, заданного на уровне 80 % от однофазного, стабилизация тока ограничена минимальным напряжением сети 325 В для  $\varphi = 0,2\pi$  и 334 В для  $\varphi = 0,35\pi$ . Это связано с тем, что для надежности минимальный угол  $\alpha$  был программно ограничен значением  $\varphi - \pi/18$ .

### Список литературы

1. Ланкин Ю. Н. (1961) Схема управления инвенторным прерывателем с автоматической стабилизацией тока. *Автоматическая сварка*, 4, 25–27.
2. Ланкин Ю. Н., Масалов Ю. А. (1972) *Схема управления вентиляльным прерывателем*. СССР, А. с. 349523, МПК В 23к 11/24. № 1421859.

3. Никулин В. Н. (1963) Системы программного управления с автокоррекцией, построенные на базе цифровой техники. *Автоматическая сварка*, 5, 28–33.
4. Никулин В. Н. (1967) *Разработка и исследование систем программного управления с автокоррекцией для автоматизации процесса точечной контактной электросварки*: автореф. дис. ... канд. техн. наук, Киев, ИЭС.
5. Аксельрод Ф. А., Ибрагимов У. У., Иоффе Ю. Е. и др. (1987) *Способ стабилизации сварочного тока при контактной сварке с тиристорным управлением*. СССР, А. с. 1355409, МПК В 23 К 11/24. № 4038170/24-27.
6. Аксельрод Ф. А., Ибрагимов У. У., Иоффе Ю. Е. и др. (1987) *Способ определения коэффициента мощности однофазного включения тока при контактной точечной сварке однофазным током*. СССР, А. с. 1281358, МПК В 23 К 11/24. № 3877475/25-27.
7. Подола Н. В., Руденко П. М., Гавриш В. С. и др. (1986) *Способ измерения коэффициента мощности однофазной контактной сварочной машины*. СССР, А. с. 1310149 МПК В 23 К 11/24. № 4006698/31-27.

Ю. М. Ланкин, В. Ф. Семикин, Є. М. Байштрук

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

### СТАБІЛІЗАЦІЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО СТРУМУ КОНТАКТНИХ ТОЧКОВИХ МАШИН ПРИ КОЛИВАННЯХ НАПРУГИ МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ

Розглянуто підходи до створення розімкнутих систем стабілізації зварювального струму контактних точкових машин при коливанні напруги мережі живлення. Описано мікроконтролерний регулятор контактної зварювання, що забезпечує автоматичне визначення початкового кута між однофазним струмом і напругою машини, а також стабілізацію зварювального струму при коливаннях напруги мережі. Система визначення кута і стабілізації струму виконана у вигляді кінцевого автомата з цифровою моделлю об'єкта управління, представлена в табличній формі. Це дозволило використовувати для регулятора простий восьмибітовий мікроконтролер широкого застосування. Бібліогр. 7, рис. 1.

**Ключові слова:** стабілізація, зварювальний струм, напруга мережі, контактне зварювання

Поступила в редакцію 26.04.2017



# КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ЭЛЕКТРОДНЫМИ ПРОВОЛОКАМИ

И. А. РЯБЦЕВ, В. Г. СОЛОВЬЕВ, Ю. Н. ЛАНКИН, А. А. БАБИНЕЦ

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

Разработана компьютерная система автоматического управления процессами дуговой наплавки электродными проволоками. Использование компьютерной системы на соответствующем наплавочном оборудовании дает возможность оператору выполнять выбор способа дуговой наплавки (под флюсом, открытой дугой или в защитных газах); выбор типа электродного материала, его марки и размеров; задавать, автоматически поддерживать, контролировать и запоминать заданные параметры режимов наплавки детали, обеспечивающие необходимые эксплуатационные свойства и геометрические размеры наплавляемых слоев. По мере накопления соответствующих баз данных по наплавке деталей различного назначения, размеров и конфигурации, использование разработанной компьютерной системы управления существенно повысит эффективность процессов дуговой наплавки. Библиогр. 9, рис. 4.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, автоматизация процессов наплавки, технология наплавки, компьютерные системы управления наплавкой, энергоемкость наплавки

Современный уровень автоматизации процессов наплавки предполагает создание соответствующих компьютерных систем задания и управления параметрами процесса в реальном времени, анализа, обработки и, при необходимости, автоматической коррекции значений этих параметров с учетом их влияния на глубину проплавления, долю основного металла (ДОМ) в наплавленном металле, а также на формирование наплавленных слоев, их размеры и качество.

Создание эффективных средств автоматизации процессов наплавки за счет разработки методов управления и контроля проплавлением основного металла и формированием наплавленных слоев позволит существенно повысить качество сварного соединения, эксплуатационные свойства наплавленного металла и производительность наплавочных работ, а также снизить энергоемкость процессов наплавки.

Для дуговой наплавки такие системы в зависимости от конструкции, степени износа и эксплуатационных требований к наплавляемым деталям должны обеспечивать:

- выбор способа дуговой наплавки (под флюсом, открытой дугой или в защитных газах);
- выбор типа электродного материала (сплошная или порошковая проволока; холоднокатаная или порошковая лента), его марки и размеров (диаметр, сечение);
- задание и автоматическое поддержание заданных электрических и механических (скорость наплавки, вылет электродной проволоки) параметров режимов наплавки, обеспечивающих необ-

ходимые геометрические размеры наплавляемых слоев;

- отметку случайных или преднамеренных отклонений от заданных режимов наплавки;

- накопление соответствующих баз данных, запоминание и последующее использование оптимальных режимов наплавки конкретных деталей.

Имеющийся опыт [1–3] показывает, что современный уровень развития компьютерной техники позволяет успешно решать эти проблемы.

Основной объем информации, который используется для оценки различных составляющих технологического процесса дуговой наплавки, получают в результате анализа сигналов тока  $I_n$  и напряжения  $U_d$ . Другие параметры процесса, как правило, имеют меньшее значение.

Для получения необходимой информации непосредственно от контролируемого объекта (наплавляемой детали), визуализации, регистрации выходных данных и обработки этой информации используются различные информационно-измерительные системы (ИИС) [4–9].

Авторами статьи с использованием компьютерной информационно-измерительной системы (КИИС) [3], разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона, были проведены систематические исследования влияния электрических параметров различных способов дуговой наплавки порошковой проволокой на стабильность процесса, проплавление основного металла и формирование наплавленных слоев [2]. КИИС обеспечивает контроль и регистрацию следующих параметров процесса наплавки:

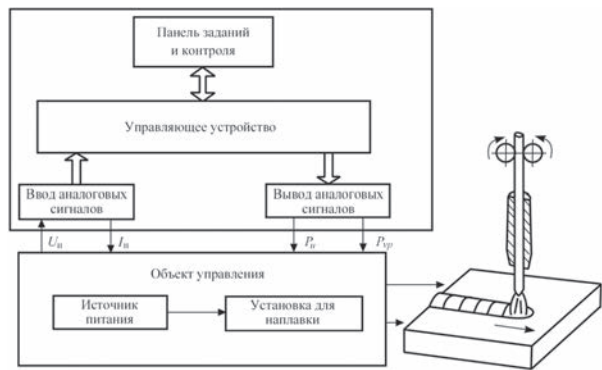


Рис. 1. Структурная схема компьютерной системы автоматического управления дуговой наплавкой ( $U_n, I_n$  — значения действующего напряжения и тока наплавки;  $P_n, P_{вр}$  — положения регулятора выходного напряжения источника тока и регулятора скорости подачи электродной проволоки на пульте управления)

- ввод заданий на напряжение дуги  $U_{дз}$  и тока дуги  $I_{дз}$ ;
- текущие значения напряжение дуги  $U_d(t)$ ;
- текущие значения тока дуги  $I_d(t)$ ;
- средние за время наплавки напряжение дуги  $\bar{U}_d$  и ток дуги  $\bar{I}_d$ ;
- индикацию рабочей зоны аппроксимирующих функций (в параметрах  $\bar{U}_d$  и  $\bar{I}_d$ ), обеспечивающей точность аппроксимации по напряжению  $\pm 1$  В и току  $\pm 10$  А.

В результате исследований был накоплен банк данных по различным способам и технологиям дуговой наплавки порошковыми проволоками и их влиянию на глубину проплавления и ДОМ в наплавленном, а также на размеры наплавляемых валиков. На базе КИИС и накопленного банка данных была разработана компьютерная система автоматического управления технологиями дуговой наплавки.

Структурная схема предложенной компьютерной системы управления представлена на рис. 1.

Как видно из этой схемы, панель заданий и контроля позволяет вводить и в процессе наплавки контролировать данные режимов выбранно-

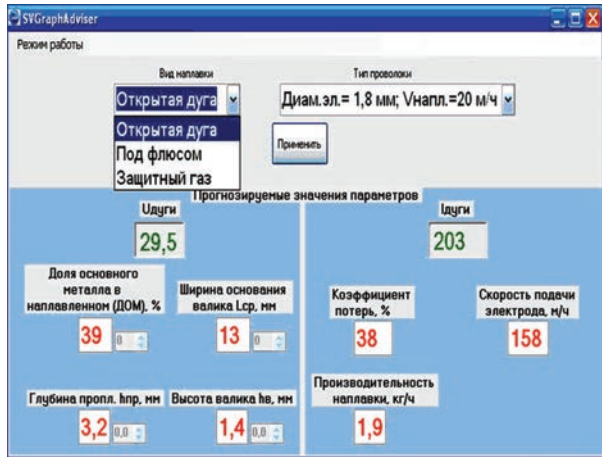


Рис. 2. Вид экрана компьютера при выборе способа наплавки

го способа дуговой наплавки конкретной детали. Эти данные затем автоматически переводятся в управляющее устройство наплавочной установкой. Из управляющего устройства аналоговый сигнал поступает непосредственно на наплавочную установку и источник питания. После включения процесса наплавки конкретной детали компьютерная система устанавливает для нее заданный режим по току и напряжению. В процессе наплавки от объекта управления (наплавочная установка и источник питания) в управляющее устройство поступает сигнал о текущих значениях тока и напряжения наплавки. В случае отклонения этих значений от заданных, система производит их соответствующую корректировку.

В зависимости от поставленной задачи, система позволяет оператору решать разные задачи при настройке режимов автоматической дуговой наплавки конкретной детали. Так, например, в том случае, если оператор вводит в компьютерную систему данные о способе дуговой наплавки, выбранном диаметре электродной проволоки и режимах наплавки, то он получает от системы данные о возможных размерах наплавляемого валика (ширине, высоте, глубине проплавления), ДОМ в наплавленном металле, производительности наплавки, коэффициенте потерь (рис. 2–4).

Или, наоборот, если оператор вводит в систему заданные по требованиям чертежа наплавляемой детали геометрические характеристики наплавляемого валика и ДОМ, то он получает от системы данные об электрических параметрах режима наплавки, которые обеспечат получение таких характеристик.

В компьютерной системе введен порядок приоритетов для задания параметров выплавляемого валика. В частности, в первом случае приоритетными при выборе приняты такие параметры как «Вид наплавки» и «Диаметр порошковой про-

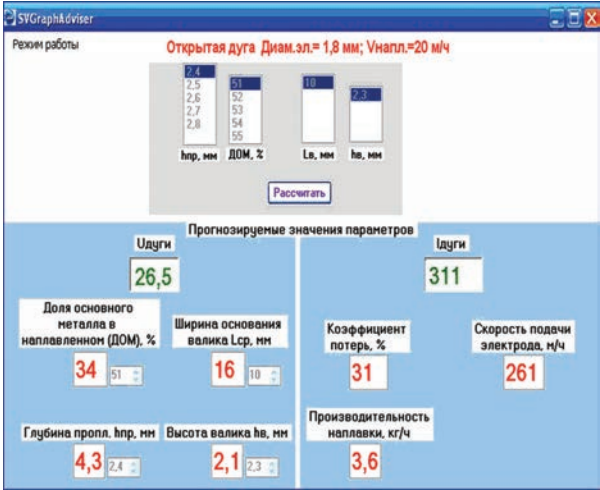


Рис. 3. Вид экрана компьютера при выборе диаметра электродной проволоки



Рис. 4. Вид экрана компьютера с заданными режимами наплавки открытой дугой порошковой проволокой диаметром 1,8 мм и прогнозируемыми характеристиками процесса наплавки и геометрическими размерами наплаваемых валиков локи» (см. рис. 2, 3). Затем выбираются режимы наплавки (см. рис. 4). Перечень значений выбираемых параметров ограничивается пределами «Допустимости режимов наплавки» от 0,85 до 1,0, которые выбраны по результатам экспериментальных исследований и занесены в банк данных. В случае производственной необходимости пределы «Допустимости режимов наплавки» могут быть расширены до минимального значения 0,25, но при этом не следует ожидать наплавленных валиков с хорошим формированием.

После расчета система выдает прогнозируемые характеристики процесса наплавки (коэффициент потерь и производительность наплавки) и геометрические размеры наплаваемых валиков.

Следует отметить, что опыт разработки компьютерной системы управления процессами дуговой наплавки показал, что при создании таких систем необходимо учитывать электрические характеристики конкретной наплавочной установки и источника питания. В комплекс этих характеристик должны входить характеристики сварочного источника, электрические характеристики соединительных кабелей и электрические параметры соединений на самой установке, включая сопротивление контакта изделия с установкой.

## Выводы

Разработана и в лабораторных условиях опробована компьютерная система автоматического управления процессами дуговой наплавки электродными проволоками. Использование компьютерной системы на соответствующем наплавочном оборудовании дает возможность оператору-напавщику выполнять выбор способа дуговой наплавки (под флюсом, открытой дугой или в защитных газах); выбор типа электродного материала, его марки и размеров; задавать, автоматически поддерживать, контролировать и запоминать заданные параме-

тры режимов наплавки конкретной детали, обеспечивающие необходимые геометрические размеры наплаваемых слоев.

## Список литературы

1. Демченко В. Ф., Козлитина С. С., Рябцев И. А. (1998) Компьютерная система проектирования технологий дуговой наплавки. *Автоматическая сварка*, **11**, 61–66.
2. Ланкин Ю. Н., Рябцев И. А., Сольвьев В. Г. и др. (2014) Влияние электрических параметров дуговой наплавки порошковой проволокой на стабильность процесса и проплавление основного металла. *Там же*, **9**, 27–32.
3. Рябцев И. А., Ланкин Ю. Н., Сольвьев В. Г. и др. (2015) Компьютерная информационно-измерительная система для исследования процессов дуговой наплавки. *Там же*, **9**, 34–38.
4. Adolfsson S., Babrami A., Bolmsjö G., Claesson I. (1999) On-Line Quality Monitoring in Short-Circuit Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*, **2**, 59–73.
5. Koveš A., Golob M. (2002) Fuzzy Logic Based Quality Monitoring in Short-Circuit Gas Metal Arc Welding. *IIW Doc. XII-1712-02*.
6. Wu C. S., Polte T., Rehffeldt D. A. (2001) Fuzzy Logic System for Process Monitoring and Quality Evaluation in GMAW. *Welding Journal*, **2**, 33–38.
7. Походня И. К., Миличенко С. С., Горпенюк В. Н. и др. (1987) Влияние строения и коэффициента массы электродного покрытия основного вида на стабильность горения дуги при сварке. *Автоматическая сварка*, **8**, 32–35.
8. Ye. Feng et al. On-Line Quality Monitoring in Robot Arc Welding Process. *IIW Doc.212-994-01*.
9. Походня И. К., Фарпенюк В. Н., Миличенко С. С.. (1990) *Металлургия дуговой сварки: Процессы в дуге и плавление электродов*. Походня И. К. (ред.), Киев, Наукова думка.

И. О. Рябцев, В. Г. Соловйов, Ю. М. Ланкин, А. А. Бабинец

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

## КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСІВ ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДНИМИ ДРОТАМИ

Розроблено комп'ютерну систему автоматичного управління процесів дугового наплавлення електродними дротами. Використання комп'ютерної системи на відповідному наплавальному обладнанні дає можливість оператору виконувати вибір способу дугового наплавлення (під флюсом, відкритою дугою або в захисних газах); вибір типу електродного матеріалу, його марки і розмірів; задавати, автоматично підтримувати, контролювати і запам'ятовувати задані параметри режимів наплавлення деталі, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості і геометричні розміри шарів, що наплаваються. У міру накопичення відповідних баз даних по наплавленню деталей різного призначення, розмірів та конфігурації, використання розробленої комп'ютерної системи управління істотно підвищить ефективність процесів дугового наплавлення. Бібліогр. 9, рис. 4.

**Ключові слова:** дугова наплавка, автоматизація процесів наплавлення, технологія наплавлення, комп'ютерні системи управління наплавленням, енергоємність наплавлення

Поступила в редакцию 03.04.2017



# TECHNOLOGICAL ASPECTS OF THE ROBOTIC TOPTIG SURFACING OF BOILER STEEL TUBES USING ALLOY INCONEL 625

T. PFEIFER<sup>1</sup>, M. RÓŻAŃSKI<sup>1</sup>, W. GROBOSZ<sup>1</sup>, J. RYKAŁA<sup>1</sup>, I.A. RIABCEW<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instytut Spawalnictwa w Gliwicach, Poland, 44–100. Gliwice, ul. Bl. Czesława 16–18. E-mail: is@is.gliwice.pl

<sup>2</sup>E. O. Paton Electric Welding Institute NASU. 11 Kazimir Malevich Str., 03680, Kyiv, Ukraine. E-mail: journal@paton.kiev.ua

The research aimed to develop technological parameters of the TOPTIG method-based surfacing (using alloy Inconel 625) of boiler tubes (Ø 45x5) made of steel 13CrMo4-5 ensuring the obtainment of the iron content on the overlay weld surface below 5 %. The research resulted in the development of sets of parameters enabling the obtainment of overlay welds characterised by very high quality and the minimum degree of the stirring of the overlay weld metal with the base material. The above named sets of parameters were utilised when making a number of overlay welds on tubes. The research involved macroscopic metallographic tests of overlay welds, the identification of the base material content in the overlay weld, the determination of the chemical composition of the overlay weld surface as well as the performance of microscopic metallographic tests and the microanalysis of the chemical composition. It was ascertained that the TOPTIG technology enabled the making of overlay welds characterised by very high quality and the minimum degree of the stirring of the overlay weld metal with the base material (only 3.28 %) and made it possible to obtain an iron content of 2.75 % on the overlay weld surface using forced cooling performed inside the tube. Surfacing without cooling led to a significantly higher base material content in the overlay weld (approximately 14%), where the content of iron on the overlay weld surface amounted to 8.47 %. References 13. Tabl. 3. Fig. 8.

*Key words*: robotic surfacing, TOPTIG method, alloy Inconel 625, boiler tubes, waste incineration boilers, Fe content on the overlay weld surface

## Introduction

Power plants fed with fossil fuels and waste incineration plants used for power generation must satisfy strict requirements as regards power boiler components including furnaces, collectors, superheaters and pipings. The above-named requirements result from extreme working conditions of components exposed to abrasion and erosion. The incineration of waste in boilers results in the formation of flue gas containing aggressive chlorides and fluorides, the detrimental effect of which requires the use of appropriately effective protections from erosion and corrosion of e.g. tubes of heat exchangers and combustion chambers. Presently, the service life of such elements is increased by the surfacing of layers of nickel alloys, particularly having the composition of alloy Inconel 625, providing appropriate creep resistance at high temperature and corrosion resistance in the aggressive environment of fluorides and chlorides. Presently used surfacing methods include gas-shielded metal arc surfacing (using pulsed current and the low-energy CMT method), plasma–powder surfacing, laser surfacing and non-consumable electrode inert gas surfacing (TIG) [1–13].

One of the primary criteria to be satisfied by a surfaced coating is low iron content (maximum 5 % in the external zone), a thickness not exceeding 2.0÷2.5 mm as well as the lack of the

microsegregation of alloying elements in the overlay weld. Iron content higher than that mentioned above reduces corrosion resistance, whereas an excessive thickness increases both the weight of structures and the costs of surfacing processes. In turn, the microsegregations of elements, particularly Nb and Mo, cause the formation of intermetallic phases decreasing the corrosion resistance of overlay welds [2, 3, 7, 8].

Technical reference publications contain information concerning the structure and properties of overlay welds made using gas-shielded metal arc surfacing, including the low-energy variant of CMT method [1–3]. The presented results indicate that, when welding using arc methods, the satisfaction of the above-presented requirements needs the making of a minimum of 2 layers, which extends the operating time and could lead to the formation of excessive stresses and strains of surfaced elements (length of surfaced tubes up to 12 m). The tests described in publication [1] revealed that it was not possible to entirely eliminate the microsegregation of alloy components reducing the service life of the layers. It was ascertained that as a result of microsegregation occurring during the solidification of overlay welds, the cores of dendrites were richer in Ni, Fe and Cr, whereas the interdendritic areas were richer in Mo and Nb. During the solidification, the strongest segregation was that of niobium,

less intense was that of molybdenum, whereas the segregation of chromium was the least intense. Individual research revealed that similar results were obtained using plasma-powder surfacing [10–13]. It appears that surfacing utilising the CMT and plasma-powder methods could be alternatively replaced by TIG surfacing: plasma surfacing with wire feeding and the surfacing utilising an innovative TIG method, i.e. TOPTIG (feeding the wire at an angle of approximately  $20^\circ$  in relation to the electrode), where the wire is fed either in a continuous or in a pulsed manner. This article presents the course and selected results of tests aimed at the determination of the effect of TOPTIG surfacing on the structure of overlay welds made of nickel alloy Inconel 625 applied on the base made of steel 13CrMo4-5.

#### Materials, Test Rig and Testing Methodology

The base material used in the tests had the form of seamless tubes ( $\varnothing$  45x5.0 mm) made of steel 13CrMo4-5 according to PN-EN 10216-2:2014-02 (15XM according to GOST4543-71). The technological tests involved the use of an OK Autrod NiCrMo-3 solid wire (Inconel 625) having a diameter of 1.0 mm (ESAB).

The technological tests of the surfacing process were performed using a station equipped with a ROMAT 310 robot (Cloos) and a TOPTIG 220DC machine (Air Liquide Welding).

The technological tests were initiated by the performance of a number of surfacing tests (simple overlay welds made on sheets) using various process parameters and aimed to identify the effect of basic current, impulse current and of a filler metal wire feeding rate on the quality, geometry and uniformity of overlay welds as well as on penetration depth. More than 60 various sets of parameters were tested. The further stage of research-related tests concerned with surfacing performed on tubes made of steel 13CrMo4-5 involved the use of parameters ensuring the obtainment of the highest quality and the lowest degree of the stirring of the overlay weld with the base. The most favourable parameters are presented in Table 1. The overlay welds were made on the tubes without cooling performed inside the tubes (items 1-6 Table 1). For comparative purposes, overlay welds

were also made with the forced cooling performed inside the tube, where the cooling medium was water (items 7 and 8, Table 1).

After the overlay welds were made on the tubes, the latter were subjected to macroscopic metallographic tests and measurements enabling the calculation of the base material content in the overlay welds. The macroscopic metallographic photographs were used to determine the cross-sectional areas of excess overlay weld metal and of the partially melted base material as well as to identify the overlay weld height ( $W$ ), penetration depth ( $G$ ) and the base material content in the overlay weld. The above-named parameter was determined as the proportion of the area of penetration in the material to the area of the entire overlay weld. The overlay weld geometry measurements were performed using the Autodesk Inventor Professional 2016 software programme. The measurement results are presented in Table 2.

The subsequent stage of research involved the analysis of chemical composition of the overlay weld surface aimed to determine the content of iron as well as to measure hardness in the surfaced layer and in the HAZ. The analysis of the chemical composition was performed using spark source optical emission spectrometry and Q4 TASMAN spectrometer (Bruker). The hardness measurements (Vickers hardness test) were performed on the cross-sections of the overlay welds using a KB50BYZ-FA hardness tester (KB Prüftechnik GmbH) and a load of  $HV$  10.

The next stage involved microscopic metallographic tests, the microanalysis of the cross-sectional chemical composition and the determination of the surface distribution of chemical elements. The metallographic specimens were prepared by grinding utilising SiC papers having a granularity of 280-1200 followed by polishing involving the use of diamond pastes (3 and  $1\mu\text{m}$ ) and etching (3g  $\text{FeCl}_3$ , 10ml  $\text{HCl}$ , 90 ml  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ). The determination of the overlay weld quality required the use of an Olympus SZX9 stereoscopic microscope (SM) in the dark field at magnification of up to 500x. The microstructure was observed using a Hitachi S-3400N scanning electron microscope (SEM) and the SE (SecondaryElectrons) as

**Table 1. Selected parameters and their designation**

No.	Impulse current, A	Basic current, A	Filler metal wire feeding rate, m/min	Number of surfaced layers	Overlay weld designation on the tube
1	140	100	1.0	1	16/1
2	140	100	1.0	2	16/2
3	140	120	1.2	1	37/1
4	140	120	1.2	2	37/2
5	130	120	1.5	1	41/1
6	130	120	1.5	2	41/2
7	130	120	1.5	1	41/W/1
8	130	120	1.5	2	41/W/2

well as the BSE observation techniques at magnification of up to 2000x.

The microanalysis of the chemical composition of the surfaced layers was performed using a Hitachi S-3400Nv scanning microscope provided with an energy dispersive spectrometer (EDS). The chemical composition tests were conducted using an accelerating voltage of 15keV. The analysis of the chemical composition of the overlay welds was supplemented with the analysis of changes in the chemical composition on the line perpendicular to the overlay weld and the surface distribution of chemical elements in the fusion area.

Test Results

The calculated content of the base material in the overlay welds and the height of the overlay welds are presented in Table 2.

The macroscopic metallographic tests revealed that the content of the base material in the overlay weld could be reduced by using two-layer surfacing or by performing forced cooling inside the tube.

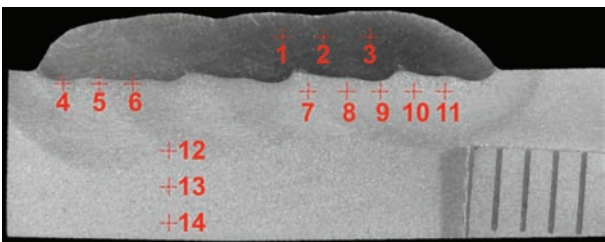


Fig. 1. Arrangement of hardness measurement points in the overlay weld and HAZ

The hardness tests were performed on the cross-section of the overlay welds in accordance with the scheme presented in Fig. 1. Selected results are presented in the graphic form in Fig. 2.

The chemical composition tests were performed on the overlay weld surface using spark source optical emission spectrometry. The tests aimed to determine the effect of surfacing conditions and parameters on the iron content of the overlay weld surface. The contents of selected chemical elements are presented in Table 3.

Table 2. Overlay weld height ( $H$ ), fusion area ( $F_w$ ), overlay weld area ( $F_n$ ) and the calculated content of the base material in the overlay weld ( $U_p$ )

Overlay weld geometry	Spec. 16/1	Spec. 16/2	Spec. 37/1	Spec. 37/2	Spec. 41/1	Spec. 41/2	Spec. 41/W/1	Spec. 41/W/2
$U_p$ , %	13.78	11.04	13.11	8.40	14.24	7.52	5.67	3.28
$F_w$ , mm <sup>2</sup>	160.6	182.9	120.6	154.3	165.5	150.1	143.3	132.7
$F_n$ , mm <sup>2</sup>	1004.7	1474.6	799.6	1681.7	995.1	1844.6	1735.5	1662.6
$H$ , mm	2.52	3.64	2.11	3.84	2.81	4.21	2.12	2.66

Table 3. Chemical composition of the overlay weld surface

Chemical composition, %	Specimen designation							
	16/1	16/2	37/1	37/2	41/1	41/2	41/W/1	41/W/2
C	0.035	0.026	0.041	0.024	0.030	0.020	0.019	0.019
Mn	0.167	0.073	0.236	0.056	0.143	0.033	0.088	0.08
Cr	19.74	20.92	18.74	20.62	20.13	20.51	21.70	21.09
Mo	8.020	8.401	7.399	8.181	7.975	7.988	6.871	8.248
Fe	10.20	4.542	14.77	3.98	8.470	4.290	3.467	2.755
Mg	0.0019	0.0017	0.0022	0.0020	0.0022	0.0023	0.0016	0.015
Nb	3.434	3.577	3.228	3.722	3.383	3.620	0.045	3.438
Ni	58.05	62.08	55.23	62.49	59.50	62.92	63.56	63.64

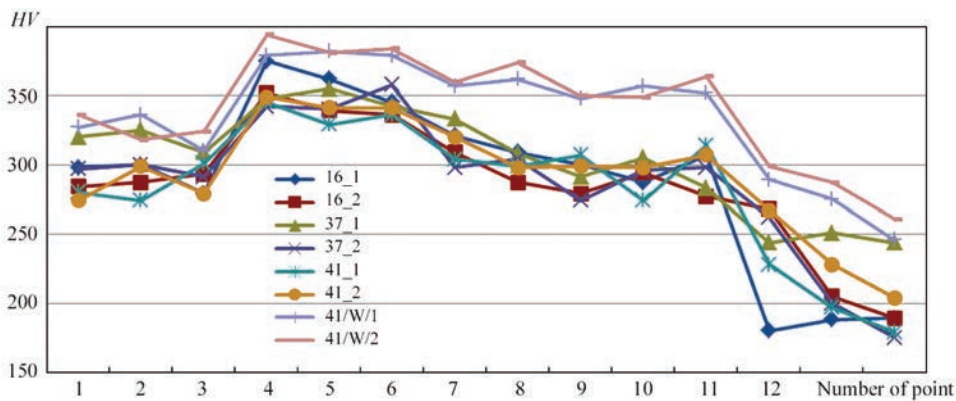


Fig. 2. Graphic representation of selected hardness measurement points on the cross-section of overlay welds



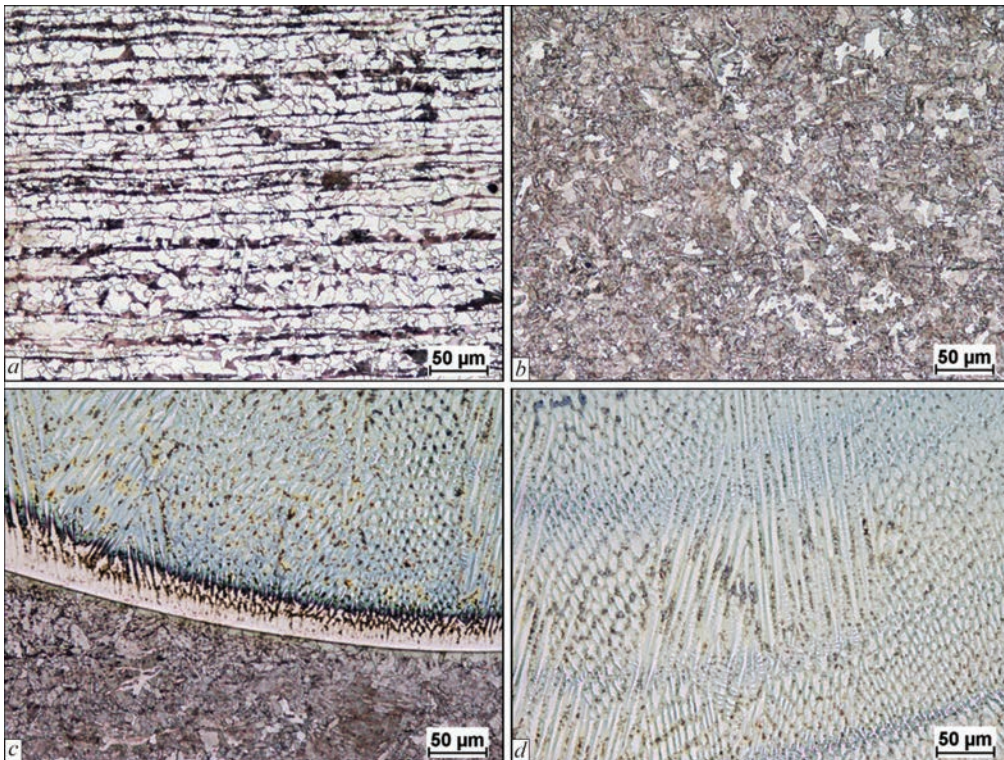


Fig. 3. Microstructure of the overlay weld (item 7 of Table 1) made of alloy Inconel 625 on the tube made of steel 13CrMo4-5; mag. 200 x

When analysing the chemical composition of the overlay weld metal it was ascertained that in terms of the two-layer overlay welds the content of iron on the overlay weld surface did not exceed 5% in each case. However, it should be noted that the necessity

of making another, i.e. the second, overlay weld significantly extends the production process. In cases of the one-layer overlay welds, made without the forced cooling of the tube, in each case the content of iron on the overlay weld surface exceeded 5 %, often

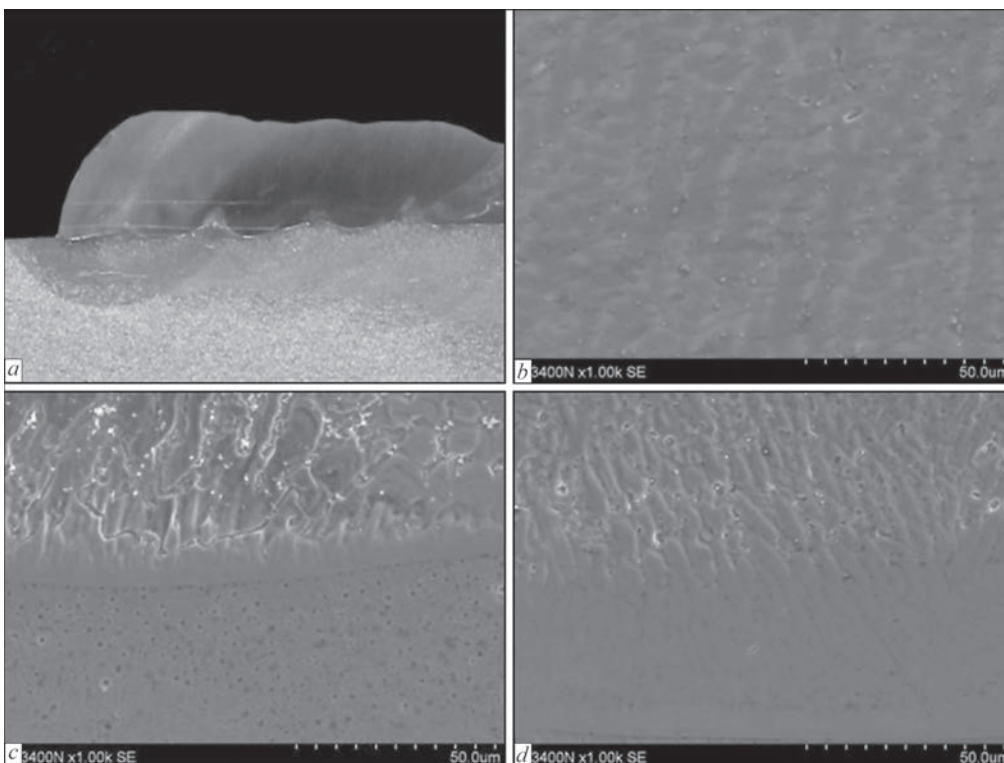


Fig. 4. Structure of the overlay weld made of alloy Inconel 625 on the tube made of steel 13CrMo4-5, specimen of item 7 of Table 1: a) overlay weld macrostructure (SM), b) overlay weld structure, SEM, SE; mag. 1000x; c) fusion line, SEM, SE; mag. 1000x, d) fusion line with the visible zone enriched in chromium SEM, SE; mag. 2000x

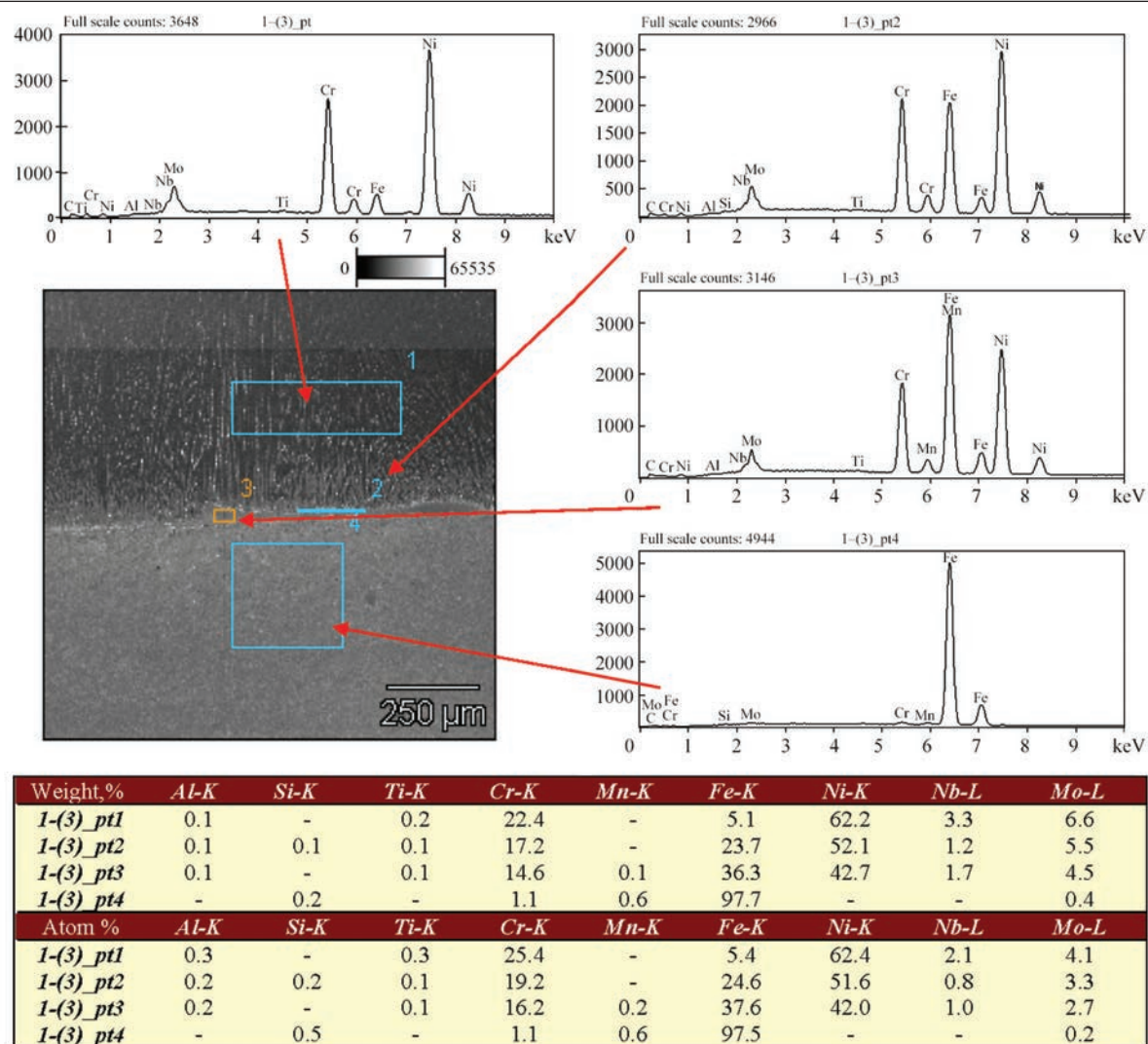


Fig. 5. Results of the chemical composition microanalysis (EDS) in the individual zones of the overlay weld; specimen of item 7 of Table 1

reaching 10 %. In cases of the one and two-layer overlay welds made on the tubes cooled inside using flowing water, the content of iron on the overlay weld surface amounted to 3.46 % and 2.75 %, where the content of the base material in the overlay weld amounted to 5.67 % and 3.24 %, respectively.

The microscopic metallographic tests were performed in the base material area, HAZ, fusion line and in the one-layer overlay weld made using parameters of item 7 in Table 1. The tests involved the use of light and scanning electron microscopy. Figure 3 presents photographs made using the light microscope, whereas Figure 4 presents the

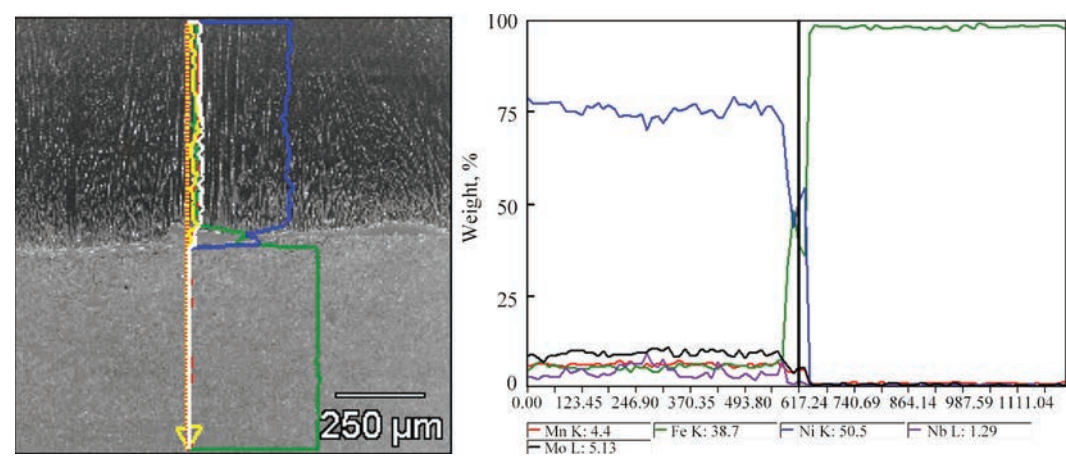


Fig. 6. Linear distribution of chemical elements in the overlay weld fusion line in specimen 41/W/1 (item 7, Table 1)



microstructural photographs made using the scanning electron microscope. Figure 5 presents the results of the chemical composition microanalysis (EDS) in the individual zones, Figure 6 presents the linear distribution of chemical elements, whereas Figure 7 presents the surface distribution of chemical elements in the overlay weld fusion zone.

### Analysis of Test Results

The tests aimed to determine the effect of TOPTIG surfacing conditions and parameters on the overlay weld geometry as well as on the content of the base material in the overlay weld and on the content of iron on the overlay weld surface. The tests also aimed at the identification of parameters, the use of which could ensure the obtainment of an iron content on the overlay weld surface not exceeding 5 %. The initial technological tests performed on sheets enabled the identification of parameters ensuring the obtainment of overlay welds characterised by very high quality and the base material content in the overlay weld not exceeding 15 %. The above-named parameters are presented in Table 1.

The macroscopic metallographic test results and the calculations identifying the base material content in the overlay weld revealed that in cases of one-layer overlay welds designated 16/1, 37/1 and 41/1 (items 1, 3 and 5 of Table 1), the content of the base material in the overlay weld amounted to 13.78, 13.11 and 14.42 % respectively, whereas the iron content on the surface of the overlay welds amounted to 10.2, 14.47 and 8.47 wt. %, respectively, and in each case exceeded the allowed limit value of 5 %. In cases of the two-layer overlay welds, the base material content in the overlay weld in specimens designated 16/2, 17/2 and 41/2 (items 2, 4 and 6 of Table 1) amounted to 11.04, 8.4 and 7.52 %, respectively,

whereas the iron content on the surface of the overlay welds amounted to 4.54, 3.98 and 4.29 wt. %, respectively. As can be seen above, in each case the condition limiting the allowed iron content in the overlay weld to 5 % was satisfied. However, it should be noted that the time required to make two-run overlay welds was unacceptable in terms of industrial applications. In addition, the reduction of the base material content in the overlay weld was obtained by increasing the volume of the filler metal, which, in turn, significantly increased the cost of surfacing. The foregoing inspired an attempted reduction of the degree of stirring of the overlay weld metal with the base material by using the forced cooling of the tube with water flowing during the process of surfacing. The subsequent tests involved the making of two overlay welds designated as 41/1 and 41/2 (items 7 and 8 of Table 1) subjected to macroscopic metallographic tests, measurements determining the base material content in the overlay weld and measurements of the chemical composition of the overlay weld surface. The base material content in the two overlay (one and two-layer) welds amounted to 5.67 and 3.28 %, respectively. It was possible to obtain a very shallow penetration depth (below 0.3 mm), which, in turn, enabled the obtainment of a very low stirring degree. The analysis of the chemical composition of the overlay weld revealed that the iron content amounted to 3.47 and 2.75 wt. %, i.e. considerably below the required criterion. The changes in the base material content in the overlay weld and the corresponding changes in the iron content on the overlay weld surface in relation to surfacing process conditions and parameters are presented below in Figure 8.

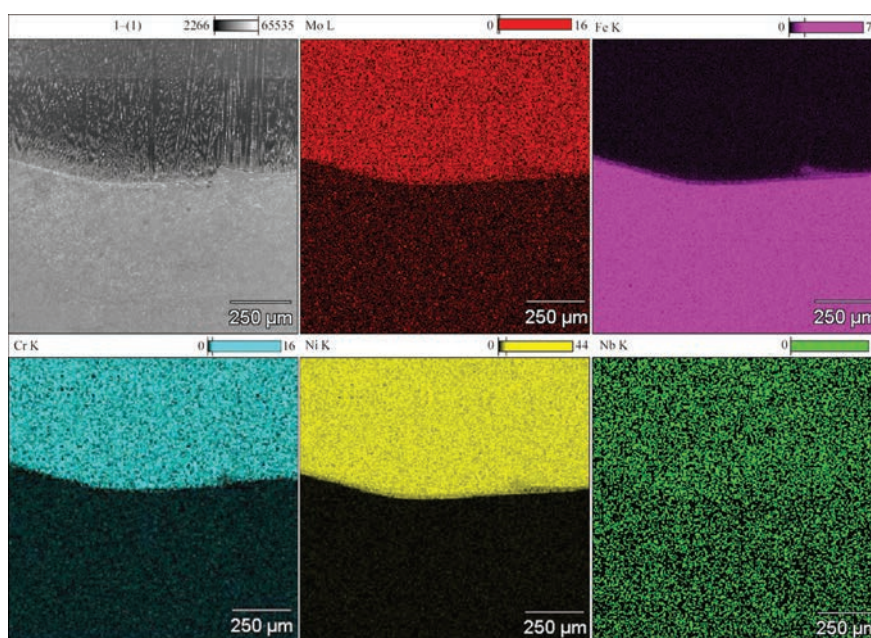


Fig. 7. Surface distribution of chemical elements in the overlay weld fusion zone, specimen no. 41/W/1 (item 7, Table 1)



The hardness tests revealed that the hardness in the overlay weld metal amounted to approximately 274...336 *HV*10, where the highest value was obtained in the overlay welds made using the forced cooling of the tube (310...336 *HV*10). Such a high value could be attributed to the fast cooling of the overlay weld metal as well as the related deformation of the tube resulting in its (strain) hardening. Depending on an overlay weld subjected to a test, the HAZ hardness amounted to approximately 329...394 *HV*10, where the highest value was obtained in the overlay welds made using the forced cooling of the tube and was restricted within the range of 379...394 *HV*10, i.e. on the boundary of the allowed hardness amounting to 380 *HV*10 according to the requirements of EN ISO 15614-7 specifying the conditions of welding procedure qualification. The above-named increased hardness in the HAZ can be ascribed to the accelerated cooling of the area.

The microscopic metallographic tests revealed that the base material of the tube made of steel 13CrMo4 was the ferritic-pearlitic structure, typical of the aforesaid steel grade. In turn, in the heat affected zone adjacent to the fusion line, the intense thermal cycle accompanying the process of surfacing delayed the martensitic transformation. The structure of the above-named area was composed of martensite and bainite, responsible for the significant increase in hardness. The overlay weld microstructure in the fusion line contained a layer of entirely different colour than that of the remaining overlay weld area. The composition of the above-named area was identified in further tests involving the use of electron microscopy. In turn, the overlay weld consisted of the dendritic austenitic structure, typical of alloy Inconel 625, building up orthogonally towards the surface of the material subjected to surfacing.

The tests performed using electron microscopy revealed that the differently coloured layer (i.e. differing from the colour of the overlay weld metal) observed in the fusion line using the metallographic tests contained 17 % Cr, 23 % Fe, 52 % Ni, 1.5 % Nb and 5.5 % Mo. The analysis of the chemical composition of the overlay weld surface revealed the following contents of chemical elements: 63.64 % Ni, 21.09 % Cr, 8.25 % Mo, 3.44 % Nb and 2.75 % Fe. As can be seen, the key criterion requiring that the iron content on the overlay weld surface be below 5% was satisfied again. The analysis of the chemical composition of the overlay weld at the half of its thickness revealed that the contents of the primary chemical elements amounted to 60.4 % Ni, 21.4 % Cr, 6.6 % Mo, 3.0 % Nb and 8.2 % Fe and changed towards the base material to reach 39.9 % Ni, 13.2 % Cr, 4.1 % Mo, 1.6 % Nb and approximately 40.9 % Fe in the fusion line.

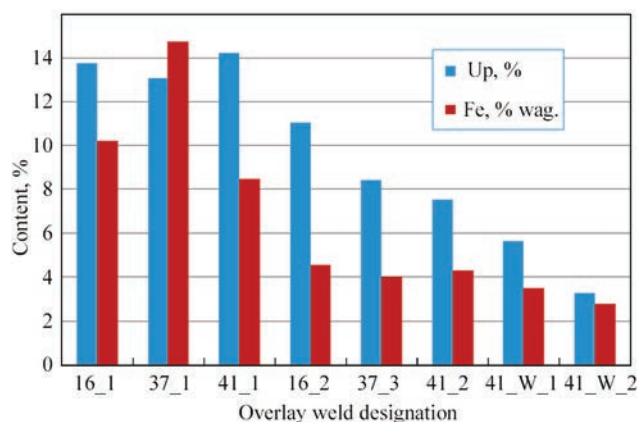


Fig. 8. Base material content in the overlay welds (Up) and the iron content (Fe) on the overlay weld surface

### Conclusions

1. The TOPTIG technology enables the making of overlay welds characterised by very high quality and the minimum dilution of the overlay metal with the base material (at least 3.28 %) as well as the obtainment of the iron content on the overlay weld surface amounting to 2.75 % (if the forced cooling of the base material is used). Surfacing without cooling leads to a significantly higher base material content in the overlay weld (approximately 14 %), where the metal content on the overlay weld surface amounts to 8.47 %.

2. Single-sided surfacing without forced cooling does not enable the making of an overlay weld using alloy Inconel 625, characterised by an iron content of below 5 % on the overlay weld surface.

3. Single-sided surfacing with forced cooling favours the formation of the martensitic structure in the HAZ area and the obtainment of high hardness (>380HV) values because of the cooling (inside the tube) involving the use of flowing water. However, the above-named technological aspect is necessary to satisfy the criterion of the maximum iron content on the overlay weld surface amounting to 5 %.

### References

1. Rozmus-Górnkowska M. (2014) Badania mikrostruktury i mikrosegregacji składu chemicznego warstw ze stopu Inconel 625 napawanych techniką CMT na podłożu ze stali 16Mo<sub>3</sub>. *Przegląd Spawalnictwa*, **12**, 4–8.
2. Rutzinger B. (2012) Kierunki rozwoju w przemyśle energetycznym. Zastosowanie napawania metodą CMT w elektrowniach węglowych. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, **5**, 63–66.
3. Rutzinger B. (2014) Wpływ procesu napawania na stopień wymieszania napoiny wykonanej spoiwem ERNiCrMo-3 (stop typu 625) na podłożu ze stali niestopowej. *Ibid.*, **5**, 72–74.
4. Adamiec P., Adamiec J. (2006) Aspekty napawania stopami Inconel 625 i 686 elementów w kotłach do spalania odpadów. *Przegląd Spawalnictwa*, **5-6**, 11–14.
5. Nowacki J., Wypych A. (2010) Mikrostruktura i odporność na wysokotemperaturowe utlenianie napoin nadstopu Inconel 625 na stali niskostopowej. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, **5**, 84–87.

6. Jarosiński J., Błaszczyk M., Tasak E. (2007) Napawanie stali stosowanych w energetyce stopami na osnowie niklu. *Przegląd Spawalnictwa*, 1, 30–33.
7. Jarosiński J., Błaszczyk M. (2006) Napawanie stali stosowanych w energetyce stopami na osnowie niklu. Problem praktycznego pomiaru zawartości żelaza. *Spajanie*, 2, 18–23.
8. Abioye T.E., McCartney D.G., Clare A.T. (2015) Laser cladding of Inconel 625 wire for corrosion protection. *Journal of Materials Processing Technology*, 217, 232–240.
9. Abioye T.E., Folkes J., Clare A.T. (2013) A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 2145–2151.
10. Pfeifer T., Winiowski A. (2014) Badania procesu napawania i spawania plazmowego oraz badanie procesów dyfuzyjnego lutowania i lutowania połączeń różnoimiennych metali lekkich. *Praca badawcza Instytutu Spawalnictwa* no. Cf-93 (ST-333).
11. Pfeifer T. (2015) Opracowanie technologii napawania plazmowego proszkiem o składzie stopu Inconel 625. *Praca badawcza Instytutu Spawalnictwa* no. Cf-94.
12. Гладкий П. В., Переpletчиков Е. Ф., Рябцев И. А. (2007) *Плазменная наплавка*. Киев: Екотехнологія.
13. Рябцев И. А., Сенченков И. К., Турык Э. В. (2015) *Наплавка. Материалы, технологии, математическое моделирование*. г. Гливице, Польша, Изд-во Силезского политехнического института.

Т. Пфайфер<sup>1</sup>, М. Ружански<sup>1</sup>, В. Гробош<sup>1</sup>,  
Я. Рыкала<sup>1</sup>, И. О. Рябцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт сварки, Польша, 44-100,  
м. Гливице, вул. Б. Чеслава, 16-18. E-mail: is@is.gliwice.pl  
<sup>2</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.  
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

#### ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОБОТИЗОВАНОГО ТОРТІГ НАПЛАВЛЕННЯ КОТЕЛЬНИХ СТАЛЕВИХ ТРУБ З ВИКОРИСТАННЯМ СПЛАВУ INCONEL 625

Метою дослідження є розробка технологічних параметрів процесу ТОРТІГ наплавлення (з використанням сплаву INCONEL 625) труб котлів (45x5), виготовлених зі сталі 13CrMo4-5, які гарантують вміст заліза в поверхневому шарі шва нижче 5 %. Було визначено, що технологія ТОРТІГ дозволяє виконувати наплавочні шви, які характеризуються

дуже високою якістю і мінімальним рівнем перемішування з основним металом (вміст заліза становить 2,75% в поверхневому шарі шва за допомогою примусового охолодження). Наплавлення без охолодження призводить до набагато більшого змісту основного металу в шві (приблизно 14%), а вміст заліза в поверхневому шарі шва досягає 8,47%.

**Ключові слова:** роботизована наплавка, метод ТОРТІГ, сплав Inconel 625, котельні труби, котли для спалювання відходів, вміст заліза на поверхні шва

Т. Пфайфер<sup>1</sup>, М. Ружански<sup>1</sup>, В. Гробош<sup>1</sup>,  
Я. Рыкала<sup>1</sup>, И. А. Рябцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт сварки, Польша, 44-100,  
м. Гливице, ул. Б. Чеслава, 16-18. E-mail: is@is.gliwice.pl  
<sup>2</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.  
03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

#### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ТОРТІГ НАПЛАВКИ КОТЕЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ ТРУБ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЛАВА INCONEL 625

Целью исследования является разработка технологических параметров процесса ТОРТІГ наплавки (с использованием сплава Inconel 625) труб котлов (45x5), изготовленных из стали 13CrMo4-5, которые гарантируют содержание железа в поверхностном слое шва ниже 5 %. Было определено, что технология ТОРТІГ позволяет выполнять наплавочные швы, которые характеризуются очень высоким качеством и минимальным уровнем перемешивания с основным металлом (содержание железа составляет 2,75 % в поверхностном слое шва с помощью принудительного охлаждения). Наплавка без охлаждения приводит к гораздо большему содержанию основного металла в шве (примерно 14 %), а содержание железа в поверхностном слое шва достигает 8,47 %.

**Ключевые слова:** роботизированная наплавка, метод ТОРТІГ, сплав Inconel 625, котельные трубы, котлы для сжигания отходов, содержание железа на поверхности шва

Поступила в редакцию 14.04.2017



### Международная выставка по сварке и резке SCHWEISSEN & SCHNEIDEN 2017

25.09.–29.09.2017

Германия, Дюссельдорф

#### Тематические разделы выставки:

- ♦ оборудование и технологии для всех видов сварки, наплавки и пайки;
- ♦ оборудование и технологии для термической обработки;
- ♦ материалы для сварки, резки, наплавки, напыления, пайки;
- ♦ средства защиты, технологии безопасности;
- ♦ контроль качества;
- ♦ инструменты;
- ♦ научные разработки в области сварки.

## ТЕХНОЛОГИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ТИГ-СВАРКИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

Л. М. ЛОБАНОВ, Е. В. ШАПОВАЛОВ, П. В. ГОНЧАРОВ, В. В. ДОЛИНЕНКО,  
А. Н. ТИМОШЕНКО, Т. Г. СКУБА

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

Предложен подход к созданию технологии сварки ТИГ элементов конструкций сложной геометрической формы из нержавеющей стали при помощи робототехнической адаптивной системы, которая позволяет адаптироваться к изменению формы поверхности свариваемых изделий в процессе сварки и минимизации вероятности появления дефектных сварных соединений и цветов побежалости на поверхности изделия. Разработана технология роботизированной сварки неплавящимся электродом углового соединения тонколистовых элементов конструкций из нержавеющей стали марки AISi 304, 210, 430 с толщиной соединяемых листов от 0,8 до 1,5 мм. Результаты сварочных экспериментов показали, что разработанные алгоритмы взаимодействия между техническими средствами адаптации могут быть использованы в системах автоматического управления процессом сварки ТИГ. Библиогр. 5, табл. 2, рис. 10.

*Ключевые слова:* сварка ТИГ, нержавеющая сталь, сложная геометрическая форма, робототехническая адаптивная система, угловые соединения, тонколистовая конструкция

В данной статье предложен подход к созданию технологии сварки ТИГ элементов конструкций сложной геометрической формы из нержавеющей стали при помощи робототехнической адаптивной системы, которая позволяет адаптироваться к изменению формы поверхности свариваемых изделий в процессе сварки и минимизации вероятности появления дефектных сварных соединений и цветов побежалости на поверхности изделия.

Известно, что для обеспечения качественного сварного соединения с требуемыми геометрическими характеристиками шва необходимо [1–3]:

- обеспечение постоянства высоты дуги;
- контроль за наклоном сварочной горелки относительно изделия (угол наклона) и положение сварочной горелки при прохождении углов и закруглений;
- постоянство сварочных параметров во время выполнения сварки или их изменение при возникновении таких требований.

Перспективным направлением для поддержания вышеизложенных технологических требований является использование адаптивной робототехнической системы. Такая система должна обеспечивать сканирование сварного стыка, его состояние сборки и иметь связь с источником сварочного тока, позволяя выполнять коррекцию режима сварки в определенных местах сварного стыка. Это может быть как регулировка сварочного тока, так и применение специальных режимов сварки (например импульсный ток), возможность подачи присадочной сварочной проволоки. Определенно адаптивная робототехническая система может как реализовать сложный алгоритм изме-

нения технологических параметров сварки, так и осуществлять контроль за траекторией движения и положения сварочной горелки.

Адаптивная робототехническая система должна включать две подсистемы: геометрическая адаптация и технологическая адаптация. Написание программы управления роботом для реализации задачи геометрической адаптации состоит из нескольких шагов:

- задание системы координат инструмента «tool frame»;
- задание пользовательской системы координат (рабочего стола) «user frame»;
- планирование траектории перемещения сварочной горелки вдоль стыка свариваемых деталей;
- задание параметров режима сварки для различных толщин свариваемых пластин из нержавеющей стали.

По умолчанию система координат инструмента привязана к центру фланца на последнем звене робота (рис. 1). Эта позиция называется «tool center point» (ТСП). Для выполнения процесса сварки необходимо изменить позицию ТСП в соответствии с конфигурацией реальной модели сварочной горелки. ТСП сварочной горелки для сварки МИГ — это кончик сварочной проволоки; для сварки ТИГ — кончик вольфрамового электрода.

Для задания системы координат инструмента используем метод по 6-ти точкам. Данный метод основывается на использовании дополнительного приспособления в виде иголочки, закрепленной, например, на рабочем столе. Оператор в процессе идентификации подводит горелку под разными



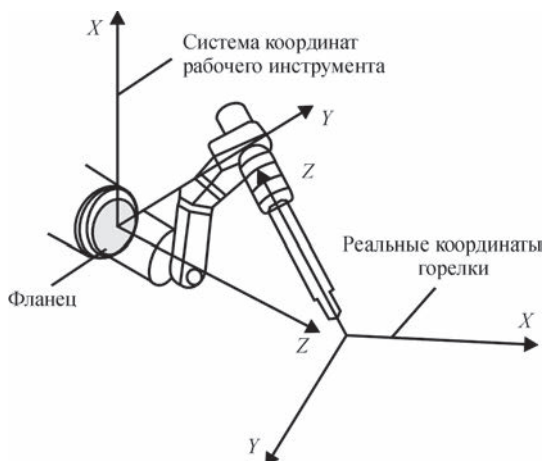


Рис. 1. Система координат рабочего инструмента (сварочной горелки)

углами (рис. 2) к кончику иглы и последовательно запоминает три конфигурации робота. Далее подводит робот к кончику иглы с такой ориентацией горелки, чтобы ее ось совпадала с осью иглы и запоминает 4-ю точку. Перемещает по координате «X» и «Z» или «Y» и «Z» и запоминает 5-ю и 6-ю точки. В результате последующих расчетов получаем положение конца электрода и его ориентацию в 3D пространстве.

Все измерения будем выполнять в пользовательской системе координат. Это означает, что координаты узловых точек траектории сварки будут отсчитываться относительно начальной точки рабочего стола, указанной при идентификации «user frame».

Планирование траектории выполняется либо в пакете 3D-моделирования, либо с помощью пульта оператора «Teach Pendant». Оператор последовательно подводит сварочную горелку к точке начала сварки, промежуточным точкам стыка свариваемых деталей, окончания сварки и сохраняет координаты этих точек в программном коде управления роботом. Кроме координат точек траектории сварки сохраняется дополнительная информация об ориентации горелки и конфигурации робота в каждой узловой точке траектории.

Спланированная траектория может без изменений использоваться для партии изделий одной мо-

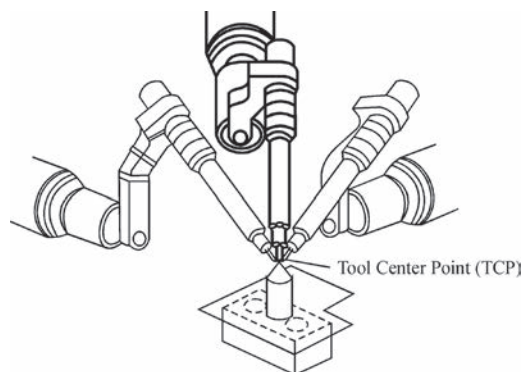


Рис. 2. Ориентация горелки в процессе идентификации системы координат инструмента

дификации. Однако по окончании процесса сварки, извлечения изделия из оснастки и установки нового изделия, положение его может измениться. Для компенсации пространственного положения изделия перед запуском цикла сварки необходимо выполнить процедуру автоматического обнаружения изделия. Такая процедура может быть выполнена с помощью датчика касания. Так, например, у Fanuc Corporation эта функция называется «ARC START HEIGHT ADJUST». Алгоритм работы данной функции представлен на рис. 3.

После создания программы управления роботом (планирования траектории) и задания параметров режима сварки можно запускать цикл сварки. Однако сварка неплавящимся электродом по жесткой траектории без каких-либо средств адаптации в процессе сварки не гарантирует требуемого качества сварного шва. Возмущающими факторами являются погрешности в изготовлении оснастки, которые приводят к изменениям положения стыка после выполнения операции смены изделия. Также положение стыка может изменяться в процессе сварки под действием тепловой деформации.

Для обеспечения требуемого качества сварки применяются дополнительные сенсоры, которые адаптируют траекторию перемещения робота к траектории стыка (сварного шва). Одним из таких сенсоров, который применялся в процессе проведения сварочных экспериментов, является дуговой сенсор и метод «Automatic Voltage Control»

(AVC) — автоматическое управление напряжением (рис. 4) для обеспечения постоянства энергетических параметров режима сварки.

AVC может быть подвержен воздействию возмущающих факторов:

- изменение типа электрода или его диаметра;
- изменение положения электрода по отношению к сварочной ванне в результате действия сварочных тепловых деформаций;

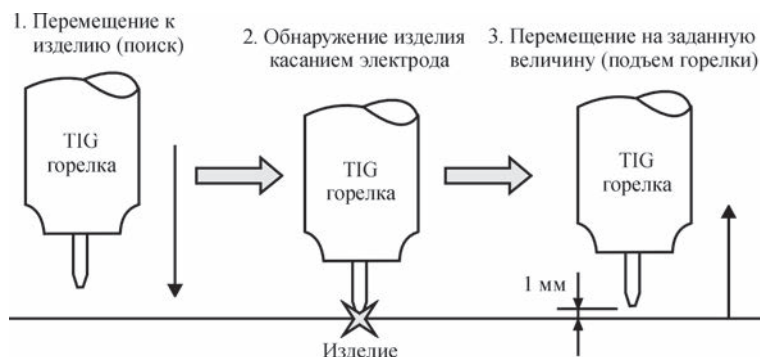


Рис. 3. Алгоритм работы функции подстройки горелки по высоте

- изменение состава защитного газа;
- изменение параметров колебаний (частота, время остановок в узлах);
- состояние поверхности свариваемых изделий.

AVC позволяет отслеживать сварной шов путем мониторинга напряжения. Типичное применение AVC — слежение по вертикали с целью стабилизации напряжения на дуге  $U_d$  за счет управления высотой перемещения горелки  $Z$  от поверхности сварочной ванны ( $U_d = f(Z)$ ). Информация, полученная при помощи AVC, позволяет корректировать траекторию робота в соответствии с положением реального сварного шва. Если сварной шов опускается ниже по отношению к соплу, то напряжение на дуге возрастает и необходимо опустить сварочную горелку. В противном случае, если сварной шов поднимается по отношению к соплу, то напряжение на дуге уменьшается и необходимо поднять сварочную горелку.

В результате поддерживается заданное значение длины дуги и таким образом обеспечивается постоянство ширины сварного шва.

AVC может использоваться при сварке с колебаниями поперек шва. В этом случае реализуется адаптация к положению стыка в горизонтальной плоскости. Если необходимо применение колебаний, то форма их должна быть синусоидальной (SINE). AVC может использоваться при перемещениях сварочной горелки как по линейной, так и круговой траектории.

Сварка изделий из листов нержавеющей стали малой толщины (до 1,2 мм) сопровождается несколькими факторами, оказывающими существенное влияние на качество сварного шва и его внешний вид. Такими факторами являются сварочные тепловые деформации и возникновение оксидной пленки на поверхности свариваемой конструкции. Первый фактор приводит к возникновению дефектов в виде прожогов или непроваров сварного шва. Второй фактор приводит к появлению радужных цветов побежалости на поверхности

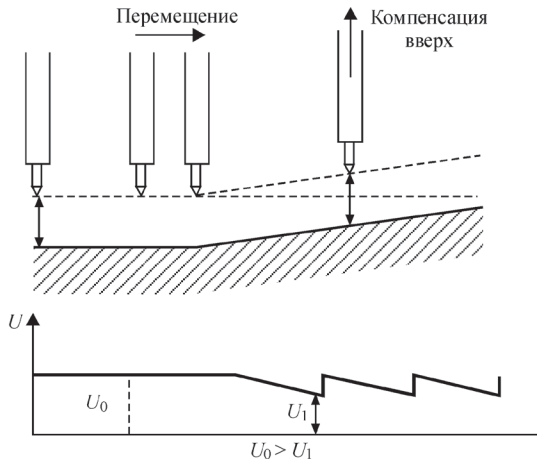


Рис. 4. Метод автоматического управления напряжением на дуге

металла. Оксидная пленка ухудшает внешний вид изделия и также считается браком.

В данной работе AVC применяется для роботизированного процесса сварки ТИГ элементов конструкций сложной геометрической формы. Конструкция изделия подразумевает выполнение углового соединения, толщина соединяемых элементов 0,8...1,5 мм из нержавеющей стали AiSi 304, 210, 430. Для выполнения данного типа соединения с получением требуемых характеристик сварного шва сварку ТИГ выполняли с использованием импульсного тока, устанавливался «+» на электроде (обратная полярность), без присадочной проволоки.

В качестве неплавящегося электрода применялись вольфрамовые электроды марки ЭВТ-15, ЭВЛ-20 (ГОСТ 23949) диаметром 2,4 и 3,2 мм. Для улучшения стабильности горения дуги электрод заточен на конус. Форма заточки представлена на рис. 5. Заточку вольфрамовых электродов рекомендуется выполнять специализированными станками.

В качестве защитного газа применяли аргон высшего сорта по ГОСТ 10157 или его смеси с водородом:  $Ar + 2,5\% H$ ,  $Ar + 5\% H$ .

Таблица 1. Сварное угловое соединение У4 по ГОСТ 14771–76

Конструктивные элементы		$s$	$b$		$n$	$e$		$g$	
подготовленных кромок свариваемых деталей	шва сварного соединения		Номинальное	Предельное отклонение		Номинальное	Предельное отклонение	Номинальное	Предельное отклонение
		0,8...1,4	0	+ 0,5	0...0,5s	3	± 1	0	+ 1,0
		1,5...2,0				5			

Примечание. Условное обозначение сварного соединения У4, способ сварки — ИН.

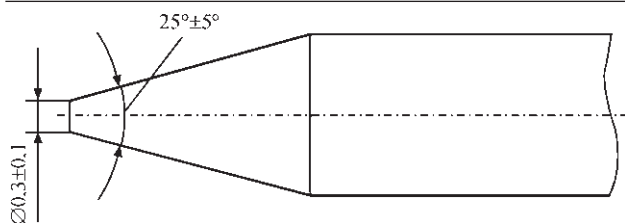


Рис. 5. Форма заточки вольфрамового электрода

Предварительный подогрев и послесварочная термообработка в основном не требуется.

По данной технологии производится сварка углового соединения отбойника торгового оборудования. Геометрические характеристики углового соединения У4 по ГОСТ 14771–76 приведены в табл. 1.

Для автоматической аргодуговой сварки неплавящимся электродом свариваемые кромки подготавливаются механическим способом, в том числе с использованием специализированных станков подготовки кромок. Угол разделки кромок равен  $90 \pm 1^\circ$ . При сварке разнотолщинных соединений разделка кромок для соединяемых элементов не изменяется, что связано с толщинами свариваемых заготовок (0,8...1,5 мм).

Перед сваркой производилась подготовка заготовок: устранялись задиры на кромках методом шлифовки. Механическая обработка выполнялась таким образом, чтобы не возникали впадины на кромке заготовки более 30 % ее толщины. Также выполнялось обезжиривание кромок перед сваркой поверхности металла на расстоянии не менее 40 мм от свариваемых кромок спиртом, ацетоном, авиационным бензином, уайт-спиритом или другими растворителями.

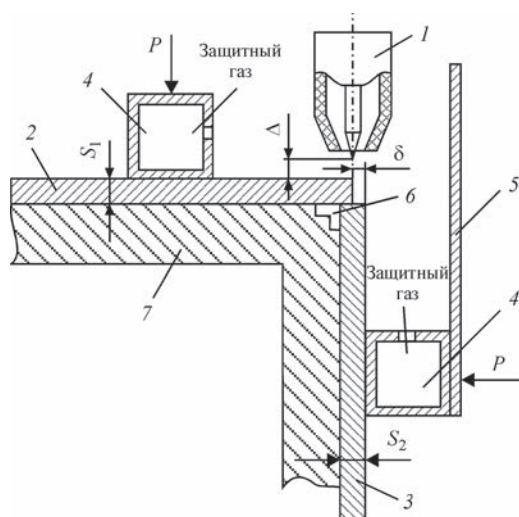


Рис. 6. Схема сборки элементов конструкции перед сваркой углового соединения: 1 — сварочная горелка; 2, 3 — свариваемые заготовки; 4 — газовый канал, для защиты внешней стороны изделия; 5 — защитный экран; 6 — газовый канал, для защиты обратной стороны шва изделия; 7 — силовая часть оснастки

Сборка элементов конструкции в сборочно-сварочной оснастке выполнялась в соответствии с рис. 6. Наложение верхнего листа 2 на нижний 3 выполняется с перекрытием половины толщины  $\delta$  второго. Выполнение этого условия необходимо для получения равномерного по наплыву сварного шва. Также необходимо обеспечить прижатие заготовок к сборочно-сварочной оснастке с усилием, обеспечивающим устранение зазоров между листами заготовок и сборочной оснасткой (значение усилия прижатия в пределах  $P = 300 \dots 500$  Н в зависимости от свариваемых толщин металла). Для обеспечения плотного прилегания заготовок к оснастке и обеспечения необходимого теплоотвода прижатие осуществляется равномерным распределением усилия по плоскости прижимных планок.

Сборку изделия при невозможности обеспечения точности установки заготовок согласно схеме выполнения углового соединения необходимо выполнить прихватками ручной аргодуговой сваркой с обратной стороны углового соединения без полного проплавления. Такая постановка прихваток позволит вести сварку в автоматическом режиме без возмущений процесса при прохождении через них сварочной дуги.

Траектория перемещения сварочной горелки должна быть такой, чтобы кончик вольфрамового электрода был на краю кромки верхнего листа, как показано на рис. 6. Величина дугового промежутка между электродом и изделием устанавливается и поддерживается в процессе сварки равной 1,5 мм с помощью технологии AVC для всех типов свариваемых материалов и толщин.

Для получения сварного соединения без цветов побежалости (рис. 7) обеспечивается защита зоны сварки и участка изделия, нагретого до температуры  $200^\circ\text{C}$ . Для этого выполняется зональная защита, защитный газ подается в область сварки и область, нагретую до  $200^\circ\text{C}$ . Также для защиты обратной стороны шва газ подается в канавку оснастки 6, показанную на рис. 7. Расход газа устанавливается на расходомере в количестве, обе-



Рис. 7. Сварной образец углового соединения без цветов побежалости после аргодуговой сварки в автоматическом режиме



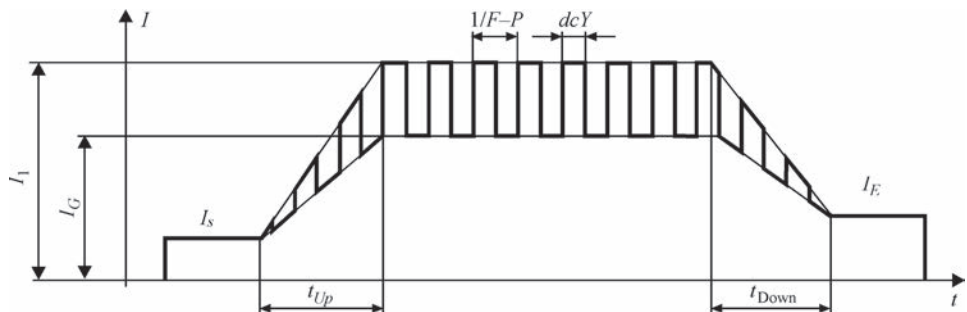


Рис. 8. Циклограмма импульсного сварочного тока при сварке ТИГ:  $I_s$  — стартовый ток;  $I_E$  — ток окончания сварки;  $t_{Up}$  — нарастание тока;  $t_{Down}$  — спад тока;  $F-P$  частота импульса ( $1/F-P$  — интервал времени между двумя импульсами);  $dcY$  — рабочий цикл;  $I_G$  — базовый ток;  $I_1$  — основной ток

спечивающем 6...8 л/мин для защиты обратной стороны шва, и 10...12 л/мин для внешней стороны сварного шва.

Использование импульсной дуги позволяет расширить возможности сварки неплавящимся электродом [1, 3–5]. Таким образом, скорость и количество вводимой в изделие теплоты определяются режимом пульсации дуги, который, в свою очередь, устанавливается по определенной программе в зависимости от свойств свариваемого материала, его толщины, пространственного положения шва и тому подобного. При сварке неплавящимся электродом импульсная дуга предназначена для регулирования процесса проплавления основного металла и формирования шва, при сварке плавящимся электродом — для регулирования процесса расплавления и переноса электродного металла [1, 3].

В данной работе сварка выполнялась импульсной дугой с частотой  $F = 1$  кГц, длительность импульса и паузы составляла по 50 % от общего периода. Базовый ток составлял 10 % от основного установочного тока. Длительность нарастания и спада сварочного тока  $t_{Up}, t_{Down} = 1,5$  с. Циклограмма импульсного сварочного тока приведена на рис. 8.

Начало и окончание автоматической аргонодуговой сварки углового соединения выполняется на входных и выводных планках для получения на основном изделии бездефектного сварного соединения. Размеры входных и выводных планок должны соответствовать длительности выхода на режим сварки. Длина входной и выводной планки составляет 30...40 мм.

Скорость сварки устанавливается в модуле управления роботизированным комплексом и должна составлять для свариваемых толщин металла 36 м/ч (1 мм/с). На рис. 9 приведена схема ведения автоматизированной сварки углового соединения. Сварочная горелка в процессе сварки не должна отклоняться от заданной траектории более чем на  $\pm 0,2$  мм.

Для повторяемости качества сварных соединений роботизированная аргонодуговая сварка непла-

Таблица 2. Режимы автоматической аргонодуговой сварки углового соединения из тонколистовой нержавеющей стали

Толщина соединяемых заготовок $S_1 + S_2$ , мм	Сварочный ток $I_{св}$ , А	Напряжение $U_d$ , В
0,8 + 0,8	100	9,0
0,8 + 1,0	105	9,2
0,8 + 1,2	115	9,5

вающимся электродом должна выполняться в помещении с контролируемой цеховой температурой. Приведенные сварочные режимы (табл. 2) получены при температуре в помещении 18...22 °С. Если происходит перепад температуры в помещении, где осуществляется сварка, более чем на  $\pm 15$  °С, необходимо провести корректировку параметров режима сварки.

С целью изучения влияния технологических режимов сварки на структуру металла шва был проведен макроанализ сварного соединения. Проведенный металлографический анализ углового сварного соединения нержавеющей стали АiSi 304, 210, 430, выполненного по разработанной

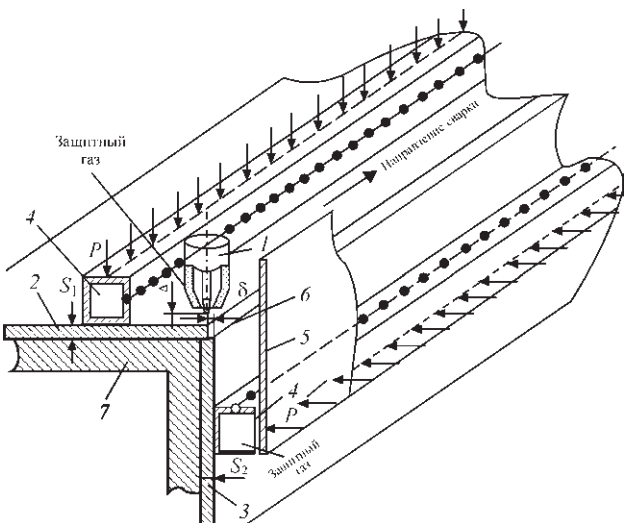


Рис. 9. Схема ведения сварочной горелки по стыку: 1 — сварочная горелка; 2, 3 — свариваемые заготовки; 4 — газовый канал для защиты внешней стороны изделия; 5 — защитный экран; 6 — газовый канал для защиты обратной стороны шва изделия; 7 — силовая часть оснастки

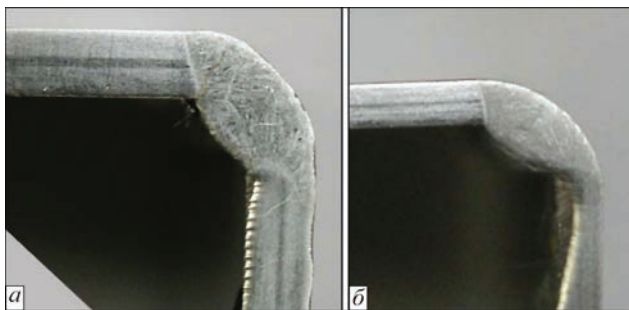


Рис. 10. Макроструктура углового сварного соединения из нержавеющей стали AISi 304 толщиной 1,2 мм (а) и AISi 201 толщиной 0,8 мм (б)

технологии импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом с полным проплавлением, выявил некоторые особенности. Как показано на рис. 10, сварной шов имеет цельную литую структуру с плавным переходом от горизонтальной пластины к вертикальной без наплывов, а также отсутствуют видимые дефекты такие, как поры, трещины, нарушения целостности шва. Такие результаты по геометрии сварного шва позволяют заключить, что разработанная технология роботизированной сварки ТИГ нержавеющей сталей толщиной 0,8...1,5 мм может быть использована при изготовлении изделий из нержавеющей стали с обеспечением качественного сварного шва с требуемыми прочностными характеристиками, внешним видом и цветом, аналогичным цвету основного металла.

Результаты сварочных экспериментов показали, что разработанные алгоритмы взаимодействия между техническими средствами адаптации могут быть использованы в системах автоматического управления процессом сварки ТИГ.

### Список литературы

1. Савинов А. В., Лапин И. Е., Лысак В. И. (2011) *Дуговая сварка неплавящимся электродом*. Москва, Машиностроение.

2. FANUC Robotics America Corporation. (2013) *FANUC Robotics SYSTEM R-30iB ArcTool Setup and Operations Manual*, Document ID: MAROBAR8203131E, REV A, Version 8.20 series.
3. Сливинский А. А., Жданов Л. А., Коротенко В. В. (2015) Теплофизические особенности импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом в защитных газах. *Автоматическая сварка*, **11**, 32–38.
4. Тимошенко А. Н., Гвоздецкий В. С., Лозовский В. П. (1978) Концентрация энергии на аноде дуги неплавящегося электрода. *Автоматическая сварка*, **5**, 68–70.
5. Дудко Д. А., Шнайдер Б. И., Погребницкий Д. М. (1977) Допустимые зазоры при импульсно-дуговой сварке торцевых соединений металлов малых толщин. *Сварочное производство*, **5**, 27–31.

Л. М. Лобанов, С. В. Шаповалов, П. В. Гончаров,  
В. В. Долиненко, О. М. Тимошенко, Т. Г. Скуба

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

### ТЕХНОЛОГІЯ РОБОТИЗОВАНОГО ТІГ-ЗВАРЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З НЕРЖАВІЮЧИХ СТАЛЕЙ

Запропоновано підхід до створення технології зварювання ТІГ елементів конструкцій складної геометричної форми з нержавіючої сталі за допомогою робототехнічної адаптивної системи, яка дозволяє адаптуватися до зміни форми поверхні виробів, що зварюються в процесі зварювання і мінімізації ймовірності появи дефектних зварних з'єднань і кольорів мінливості на поверхні виробу. Розроблено технологію роботизованого зварювання неплавким електродом, кутового з'єднання тонколистових елементів конструкцій з нержавіючої сталі марки AISi 304, 210, 430 з товщиною листів, що з'єднуються від 0,8 до 1,5 мм. Результати зварювальних експериментів показали, що розроблені алгоритми взаємодії між технічними засобами адаптації можуть бути використані в системах автоматичного управління процесом зварювання ТІГ. Бібліогр. 5, табл. 2, рис. 10.

**Ключові слова:** зварювання ТІГ, нержавіюча сталь, складна геометрична форма, робототехнічна адаптивна система, кутові з'єднання, тонколистова конструкція

Поступила в редакцію 24.04.2017

## Науково-практична конференція «СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА»

22-23 листопада 2017 р.

Міжнародний виставковий центр, Київ

Тематика конференції:

- ◆ розвиток прогресивних зварювальних процесів;
- ◆ нові зварювальні матеріали та обладнання;
- ◆ проблеми і тенденції автоматизації зварювальних та споріднених процесів;
- ◆ впровадження прогресивних технологій при виготовленні та ремонті металоконструкцій;
- ◆ стандартизація та сертифікація в зварювальному виробництві;
- ◆ підготовка кадрів та організація конкурсів професійної майстерності;
- ◆ проблеми екології;
- ◆ розвиток міжнародного співробітництва.

Свої пропозиції та тези доповідей просимо направляти до 1 серпня: [maksimov@paton.kiev.ua](mailto:maksimov@paton.kiev.ua)

## РОБОТИЗОВАНА СИСТЕМА НЕРУЙНІВНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ ВИРОБІВ ЗІ СКЛАДНОЮ ГЕОМЕТРІЄЮ

В. В. ДОЛИНЕНКО<sup>1</sup>, Є. В. ШАПОВАЛОВ<sup>1</sup>, Т. Г. СКУБА<sup>1</sup>, В. О. КОЛЯДА<sup>1</sup>, Ю. В. КУЦ<sup>2</sup>,  
Р. М. ГАЛАГАН<sup>2</sup>, В. В. КАРПІНСЬКИЙ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Виконано аналіз сучасного стану розробки автоматизованих та автоматичних систем вихрострумowego неруйнівного контролю виробів зі складною геометрією. Показано необхідність створення адаптивних роботизованих систем, в яких оператор безпосередньо не задіяний в процесі виконання контролю. Виконано обґрунтування необхідності впровадження нової ефективної методології оброблення сигналів вихрових струмів, в якій використовується теорія дискретного перетворення Гільберта у поєднанні із методами теорії статистичної обробки сигналів. Запропоновано структурну схему роботизованого комплексу автоматичного контролю, що складається з промислового робота-маніпулятора, координатного столу з декількома ступенями свободи та пристроєм фіксації об'єкту контролю, автоматизованої станції з набором вихрострумowych перетворювачів різних типів, блоку датчиків технічного зору, персонального комп'ютера та електронного блоку управління і оброблення вихрострумowych сигналів. Бібліогр. 12, рис. 7.

*Ключові слова:* автоматичний вихрострумовой неруйнівний контроль, адаптивний роботизований комплекс, датчик технічного зору, амплітудна та фазова характеристики вихрострумowego сигналу

**Актуальність проблеми.** В структурі високотехнологічних виробництв на їх різних етапах чинне місце належить операціям контролю якості виробів, які ґрунтуються на використанні методів неруйнівного контролю (НК) [1, 2]. Підвищення конкурентоспроможності та надійності продукції значною мірою залежить від темпів впровадження нових конструкційних матеріалів та компонентів, прогресивних технологічних процесів, останніх досягнень фундаментальних і прикладних наук. За таких умов розробники нової продукції повинні в своїй роботі спиратись на інноваційні методи і засоби контролю якості, орієнтовані на перспективні матеріали з покращеними характеристиками та параметрами. Такі засоби повинні акумулювати новітні досягнення з різних галузей знань — фізики, математики, техніки, електроніки, комп'ютерної інженерії тощо. Це повною мірою стосується і вихрострумowego контролю (ВСК), який є надзвичайно інформативним, і в той же час достатньо складний з огляду на отримання корисної інформації і виділення діагностичних ознак, особливо коли виріб має складну геометрію.

Незважаючи на впровадження сучасних схемотехнічних рішень, досягнень обчислювальної техніки та інформаційно-вимірювальних технологій, значна частина засобів контролю орієнтована на «ручний» спосіб сканування поверхні об'єктів контролю (ОК). Наявність людського чинника призводить до підвищення суб'єктивності контро-

лю, зниження ймовірності прийняття правильних діагностичних рішень. Тому на практиці, навіть за наявності досконалих методик контролю, ручний спосіб не гарантує високої якості контролю. Наявність у технологічному ланцюгу контролю людини-оператора значно підвищує вірогідність отримання помилкових рішень, що не дозволяє реалізувати у повному обсязі високі потенціальні можливості засобів НК.

Таким чином, необхідність підвищення продуктивності та достовірності результатів ВСК виробів зі складною геометрією потребує створення автоматичних систем контролю, в яких, цілком очевидно, будуть використані нові підходи, як до методики контролю, так і до математичного забезпечення дефектоскопа. Базовими передумовами при цьому є наявність таких особливостей ВСК, як: необхідність забезпечення відсутності механічного контакту між ОК та вихрострумowym датчиком (ВСД); використання таких конструкцій ВСД, що мають невеликі розміри; стабільність характеристик ВСД, як в діапазоні робочих температур, так і в часі. Одним з найбільш перспективних напрямків реалізації автоматичного ВСК є розроблення роботизованих систем неруйнівного контролю.

**Аналіз існуючих рішень і постановка завдання.** Одним з основних збурень, що може значно впливати на результати автоматичного ВСК, є зміна величини зазору між перетворюва-



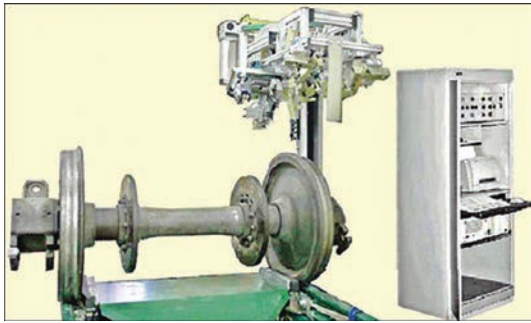


Рис. 1. Автоматизований модуль системи ВСК колісних пар залізничних вагонів «PELENG-AUTOMAT»

чем і ОК. У випадку роботизованого контролю такий зазор визначається:

- шорсткістю поверхні ОК;
- точністю переміщення вихрострумowego датчика ВСД по заданій траєкторії;
- точністю апроксимації комп'ютерної геометричної моделі ОК;
- точністю засобів технічного зору (лазерно-триангуляційного відеосенсора), що використовується на етапі адаптації до конкретного зразка ОК [3].

Попередні розрахунки показують, що неконтрольована зміна величини зазору в процесі роботизованого вихрострумowego контролю габаритних ОК може досягати  $\pm 0,5$  мм. Це збурення може бути суттєво зменшено при використанні ВСД зі спеціальним пружинним кріпленням, що забезпечує притискання ВСД до поверхні ОК, але при цьому збільшується час контролю. При використанні ВСД зі звичайним способом кріплення компенсацію збурення від зміни величини зазору повинно виконуватись спеціальним модулем математичного забезпечення роботизованої системи ВСК.

Розробленню автоматичних систем НК передували механізовані та напівавтоматичні систе-



Рис. 2. Механізована система ВСК труб

ми, що певний час задовольняли потреби промисловості. В такі системи застосовувались не дуже складні лінійні маніпулятори, які забезпечували достатню точність позиціонування [4]. Наприклад, для НК колісних пар вагонів застосовувався автоматизований комплекс «PELENG-AUTOMAT» (фірми «АЛТЕК», Росія), до складу якого входить модуль ВСК всієї поверхні колеса і гальмівного диска (рис. 1). Механізована система ВСК труб середнього діаметру (від 1,75 до 38") на основі ChainXY-сканера від фірми «Olympus» представлена на рис. 2. Застосування таких систем обмежується контролем деталей простої форми (пластин, труб тощо).

Більшу гнучкість та продуктивність мають системи контролю з антропоморфними роботами-маніпуляторами, що мають шість і більше ступенів свободи [5–7]. Такі системи використовуються там, де потрібно забезпечити високу продуктивність, або виконувати контроль виробів зі складною геометрією.

Роботизовані системи НК можна умовно поділити на два класи: адаптивні і неадаптивні. Неадаптивні системи використовують для НК деталей



Рис. 3. Система роботизованого ВСК деталей зі складною геометрією «EloScan-system»: а — процес контролю; б — процес налаштування датчика (І — станція обслуговування датчиків)

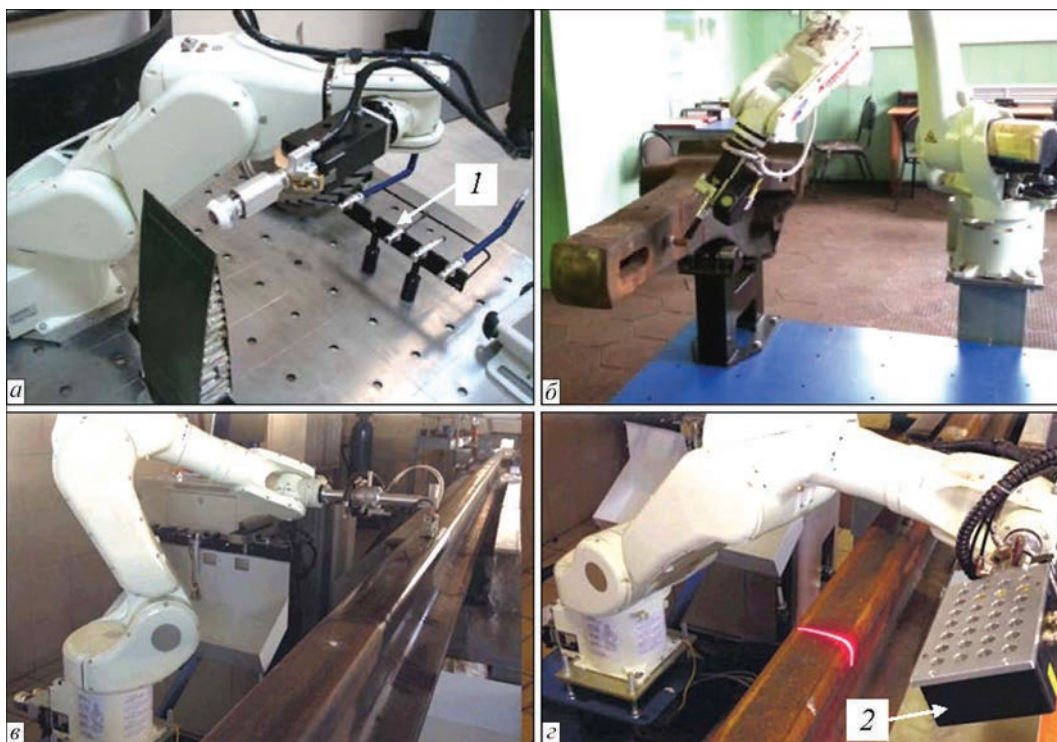


Рис. 4. Системи НК типу «Робоскоп BTM-3000» для ВСК: *а* — елементів крила літака; *б* — залізничного автозчепного пристрою; *в* — рейки залізничної колії; *з* — геометрії рейки (1 — станція обслуговування датчиків; 2 — лазерно-телевізійний відеосенсор)

та виробів з нескладною геометрією. Основним критерієм якості функціонування таких систем є їх продуктивність. Ці системи призначені в основному для контролю невеликих деталей з незначною шорсткістю поверхні. Як приклад такого типу систем на рис. 3, *а* представлено роботизовану систему неруйнівного ВСК «EloScan-system», яка призначена, головним чином, для перевірки симетричних обертаючих компонентів в літакобудуванні. Точність позиціонування ОК забезпечується як високою точністю виготовлення контрольованої деталі, так і використанням спеціального маніпулятора виробу типу «токарний патрон». Система має станцію обслуговування датчиків (рис. 3, *б*), що дозволяє в процесі ВСК швидко змінювати їх і оперативно переналагоджуватися для контролю виробів з різною геометрією в залежності від завдання та виду поверхні зони контролю.

Адаптивні роботизовані системи застосовуються у випадках, коли необхідно виконувати НК габаритних деталей та виробів зі складною геометрією. Основним критерієм якості функціонування таких систем є високий рівень вірогідності виявлення дефектів за заданого рівня продуктивності контролю. До складу систем може входити лазерно-телевізійний відеосенсор, ефективна робота якого забезпечується розсіяним відбиттям лазерного світла від контрольованих поверхонь. Представниками цього класу систем є роботизовані комплекси неруйнівного ВСК типу

«Робоскоп BTM-3000» (фірма «WorldNDT», Росія) [8], що показані на рис. 4.

До складу цих систем входять два антропоморфні роботи, лазерно-телевізійний відеосенсор і станція обслуговування вихрострумових датчиків. Лазерно-телевізійний відеосенсор може використовуватися як в комплексі з ВСК для первинного вимірювання розмірів ОК або адаптації до реальних розмірів конкретного ОК, так і самостійно — як інструмент визначення і контролю геометричних параметрів виробу (рис. 4, *з*).

Використання того чи іншого типу відеосенсора залежить як від необхідної точності вимірювань, так і від геометрії ОК. Для контролю габаритних виробів з плоскими поверхнями можна використовувати відеосенсор з більшим триангуляційним кутом. Відеосенсор з меншим триангуляційним кутом має значно менші габарити, тому його доцільно використовувати за наявності в геометрії ОК вузьких зон та значних заглибин.

Ефективне функціонування роботизованої системи ВСК пов'язано з правильним вибором вихрострумових перетворювачів (ВСП) з певного набору датчиків, необхідних для регламентного контролю виробу [9]. Для кожного типу ОК конструкції ВСП визначаються їх призначенням, умовами застосування, діапазоном частот струму збудження та іншими факторами. Розміри котушок ВСП обмежені знизу кількома міліметрами в діаметрі, а маса ВСП — десятками грамів (без ура-



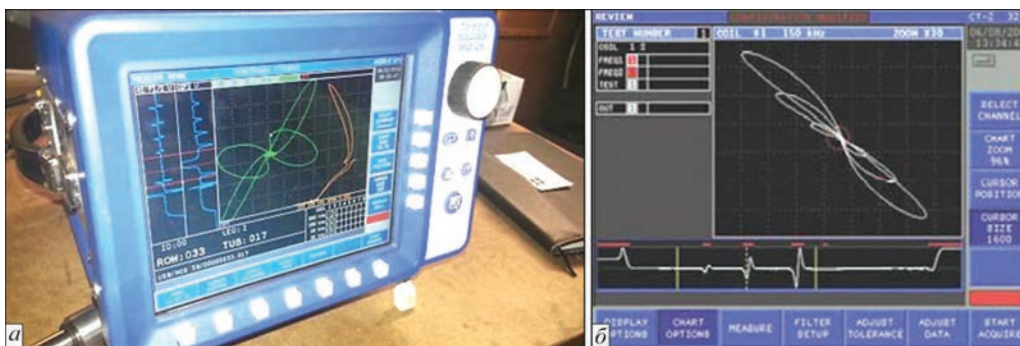


Рис. 5. Графічні зображення результатів неруйнівного ВСК в системах ручного сканування: *a* — переносна система; *б* — стаціонарна комп'ютерна система

хування вузлів закріплення і переміщення ВСП та елементів інтерфейсу).

Окремо слід зупинитись на засобах ВСК. На сьогодні ринок насичений приладами різного призначення, в тому числі вихрострумовими дефектоскопами, що мають високі технічні характеристики. За умов ручного сканування достовірність результатів ВСК значною мірою залежить від підготовки, досвіду і емоційного стану оператора-дефектоскопіста. Проте їх використання в роботизованих системах НК обмежено декількома факторами. По-перше, відомі вихрострумові дефектоскопи від самого початку орієнтовані на роботу з оператором, який приймає рішення за візуальним сигналом у виді годографа (рис. 5). Здебільшого такий годограф і передається до зовнішніх пристроїв, що створює певні незручності для використання таких сигналів в автоматизованих системах. Зрозуміло, що в роботизованій

системі ВСК використання годографів є дуже обмеженим.

По-друге, такі прилади для розробника роботизованих систем НК являють собою «чорні скриньки» — процес вибору режиму контролю, калібрування, алгоритми опрацювання експериментальних даних в цілому «прихований» від користувача, що ускладнює інтеграцію таких пристроїв в системи автоматизованого контролю.

По-третє, обробка сигналів ВСП ґрунтується на аналізі амплітудних характеристик сигналів. Використання фазових методів має допоміжний характер і може бути спрямовано, наприклад, на підвищення селективності контролю [9]. В той же час аналіз фазових характеристик сигналів ВСП, включаючи їх статистичне опрацювання та визначення кругових статистик [10], дозволяє виділити додаткові діагностичні ознаки, що створює передумови для розширення функціональних

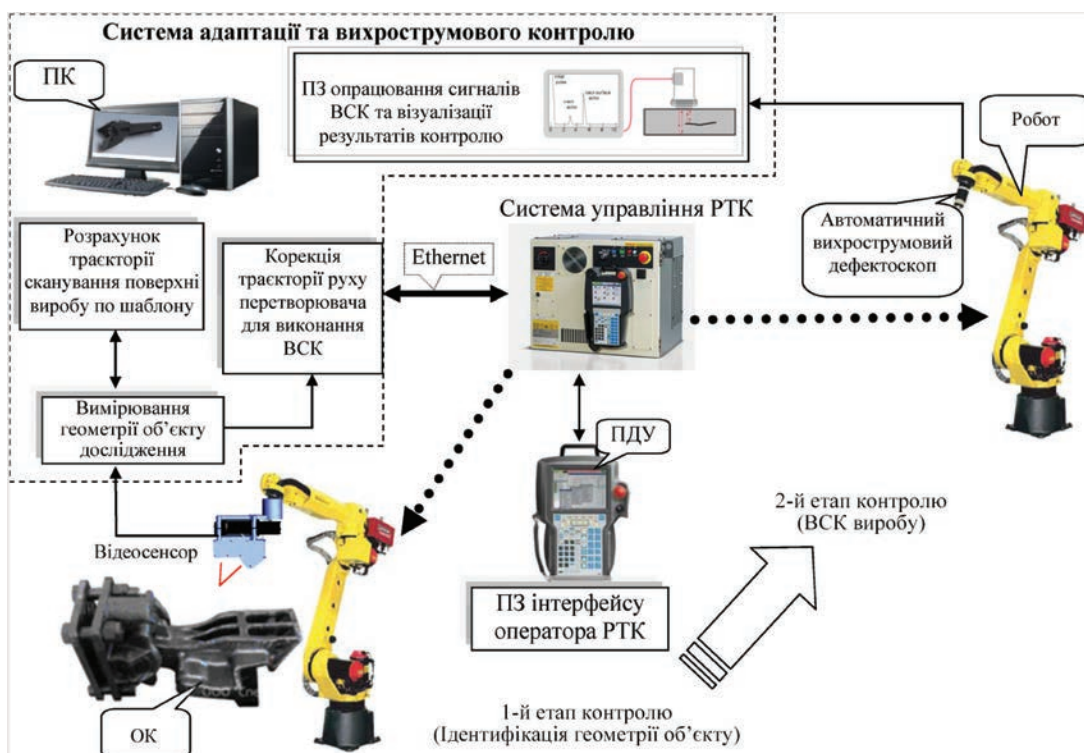


Рис. 6. Структурна схема роботизованої адаптивної системи неруйнівного ВСК: ПДУ — пульт дистанційного управління; ПЗ — програмне забезпечення; РТК — робототехнологічний комплекс



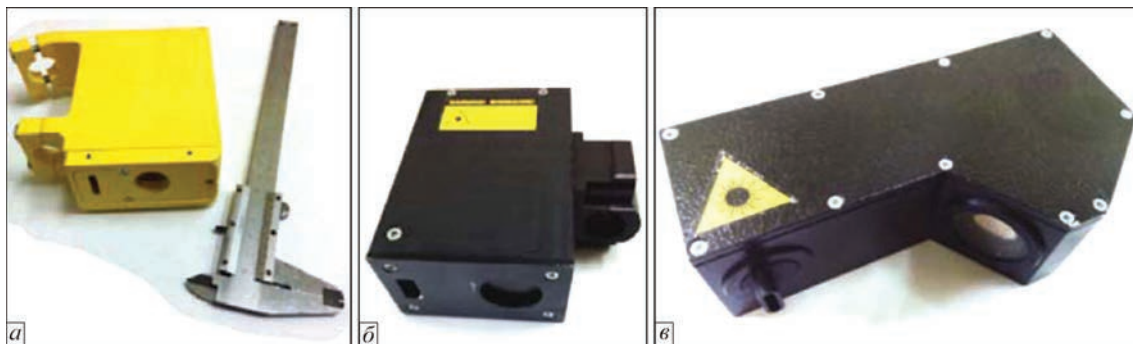


Рис. 7. Лазерно-телевізійні відеосенсори для роботизованих систем НК з триангуляційними кутами: а — 15; б — 20; в — 40°

можливостей ВСК, підвищення роздільної здатності вихрострумової дефектоскопії, введення в практику ВСК нових характеристик.

Таким чином, за результатами виконаного аналізу завдання даної роботи сформульовано наступним чином: необхідно обґрунтувати загальну структуру роботизованої системи ВСК виробів зі складною геометрією і запропонувати методологію опрацювання сигналів ВСП для такої системи з можливістю формування діагностичних ознак як з амплітудних, так і з фазових характеристик сигналів з широким залученням статистичних методів їх опрацювання.

**Запропоноване технічне рішення.** Виходячи із виконаного аналізу відомих технічних рішень можна стверджувати, що до складу типового роботизованого комплексу НК повинні включатись: робот-маніпулятор, координатний стіл з декількома ступенями свободи, автоматизована станція з набором перетворювачів різних типів, пристрій фіксації ОК, засоби технічного зору, персональний комп'ютер, електронний блок управління і оброблення сигналів.

На основі вище викладеного запропоновано наступну структуру роботизованої адаптивної системи ВСК, що зображена на рис. 6 (на схемі не показано станцію обслуговування ВСП та модуль позиціонування ОК).

Роботизована система неруйнівного ВСК передбачає двоетапний режим контролю. На першому етапі виконується ідентифікація геометричної моделі об'єкту контролю ОК за допомогою лазерно-телевізійного відеосенсора — датчика технічного зору. Такі відеосенсори є важливими елементами адаптації роботизованих систем неруйнівного ВСК до різних ОК. На даний час не існує універсальних датчиків технічного зору, тому такі засоби адаптації потребують розробки під конкретну задачу. В ІЕЗ ім. Є. О. Патона розроблено ряд моделей лазерно-телевізійних відеосенсорів, що можуть використовуватись для ідентифікації геометричної форми ОК в автоматичних системах НК. На рис. 7 показано ряд таких відеосенсорів, що відрізняються як габаритами, так і величиною триангуляційного кута.

Адаптивність системи реалізується за рахунок:

- алгоритму сканування поверхні ОК і фіксації результатів вимірювань, отриманих за допомогою лазерно-триангуляційного відеосенсора;
- алгоритму уточнення ключових параметрів геометричної моделі ОК;
- алгоритму розрахунку траєкторії сканування поверхні виробу ВСП по заданому шаблону;
- алгоритму розрахунку поправок для системи управління роботом для всієї траєкторії сканування.

Друга фаза контролю призначена, власне, для виконання ВСК виробу. Такий контроль виконується в автоматичному режимі. Операції калібрування, зміни типу ВСП та переналадження режиму роботи ВСП виконуються без участі оператора. В процесі управління траєкторією робота математичне забезпечення ПК формує поправки в систему управління робото-технологічним комплексом (РТК). Ці поправки надходять в реальному часі по каналу інтерфейсу Ethernet і призводять до корекції траєкторії сканування, що забезпечує максимальну чутливість ВСП та запобігає виникненню зіткнень його з поверхнею ОК. На цьому ж етапі включається в роботу математичний модуль оброблення сигналу ВСП та візуалізації результатів контролю. Рішення про ступінь дефектності контрольованої ділянки виробу формується за результатами аналізу визначених діагностичних ознак.

В роботизованій системі НК передбачається можливість виконання оператором певних дій, які пов'язані з операціями встановлення та знання ОК з маніпулятора виробу. Для цього передбачено пульт дистанційного управління (ПДУ) та спеціальне програмне забезпечення, що реалізує інтерактивну взаємодію в системі оператор — РТК.

Характерною особливістю математичного та програмного забезпечення роботизованої системи ВСК є реалізація парадигми адаптивності та універсальності технологічного процесу контролю. Це досягається не тільки за рахунок можливості зміни ВСП з метою адаптації до геометрії ОК та завдань контролю, але й за рахунок наступних спеціальних функціональних характеристик:

- визначення координат підготовленого до контролю ОК у тривимірній системі координат;
- виконання сканування поверхні ОК за заданою програмою;
- обчислення амплітудної характеристики сигналу ВСП;
- обчислення фазової та частотної характеристик сигналу ВСП;
- статистичного опрацювання характеристик сигналів ВСП та інших даних;
- обчислення та аналіз спектрів сигналів ВСП;
- програмне управління параметрами сигналу збудження ВСП та режимами роботи вимірювального каналу системи;
- формування діагностичних рішень щодо визначення дефектності ОК та інтерактивна взаємодія з технологом-дефектоскопістом за результатами аналізу сигналів ВСП та ін.

Таким чином, запропонована структура роботизованої системи неруйнівного ВСК дозволяє реалізувати парадигму адаптивного неруйнівного контролю виробів зі складною.

Реалізація концепції повної автоматизації ВСК вимагає більш загального підходу до опрацювання сигналів ВСК і формування полів інформативних ознак у зв'язаній з ОК системі координат.

Найчастіше збудження ВСП здійснюють гармонічними струмами виду

$$i_0(t) = I_0 \cos(2\pi f_0 t \pm \varphi_0), t \in (-\infty, \infty), \quad (1)$$

де  $t$  — поточний час;  $I_0 > 0$  — амплітуда сигналу збудження;  $\varphi_0 \in [0, 2\pi]$  — початкова фаза;  $f_0 > 0$  — частота.

Вихідний сигнал існує у вигляді напруги синусоїдальної форми, що спостерігається на фоні адитивних шумів  $n(t)$ . Локалізація неоднорідностей ОК у просторі під час сканування ВСП поверхні ОК в роботизованих системах ВСК призводить до локальних в часі і просторі змін (збурень) параметрів сигналів. Тому в загальному випадку аргументами сигналів ВСП є не тільки час  $t$ , але й вектор параметрів  $\bar{p}_r$  системи «ВСП – ОК» і просторові декартові координати  $r = \{x, y, z\}$  точок поверхні ОК:

$$u(t, \bar{p}_r, r) = U(t, \bar{p}_r, r) \times \cos(2\pi f_0 t - \varphi(t, \bar{p}_r, r)) + n(t), t \in T_a, \quad (2)$$

де  $T_a$  — повний час аналізу всього ОК.

Перша, інформаційна складова сигналу (2) належить до класу синусоїдальних сигналів з локально зосередженими збуреннями інформативних параметрів. Просторові координати обмежені сукупністю значень  $\{x_{\min} \dots x_{\max}, y_{\min} \dots y_{\max}, z_{\min} \dots z_{\max}\}$ , що визначаються технічними характеристиками робота-маніпулятора. Області значень складових

вектора параметрів  $\bar{p}_r$  також обмежені і визначаються фізичними параметрами та характеристиками матеріалу ОК та геометричними характеристиками системи «ВСП – ОК».

Шумова складова  $n(t)$  сигналу (2) утворюється внаслідок дії багатьох факторів — шумів електронних компонентів системи, електромагнітних наведень, механічних вібрацій і т. і. Зазвичай не-суперечливим є обґрунтування  $n(t)$  як реалізації гауссового випадкового процесу з нульовим математичним сподіванням та дисперсією  $\sigma^2$ .

На всьому інтервалі аналізу сигнал (2) є не-стаціонарним. Проте умови реалізації процесу контролю допускають наступне спрощення. Процес вимірювання параметрів сигналів ВСП в цифрових системах відбувається дискретно у часі на скінченній множині точок простору  $r_g = \{x_g, y_g, z_g, g \in [1, G]\}$ . Кожне окреме вимірювання виконується на інтервалі часу  $T_g, T < T_g \ll T_a$ . Така умова має місце з огляду на відносно невелику швидкість сканування, чи навіть можливість виконувати вимірювання після зупинки ВСП у наступній  $g$ -тій точці. Тому на відповідному інтервалі часу  $T_g$  сигнал  $u(t, \bar{p}_g, r_g), t \in T_g$  можна вважати локально стаціонарним, параметри якого, амплітуда і початкова фаза, лишаються незмінними впродовж  $T_g$ . Таке припущення дозволяє суттєво спростити аналіз сигналу ВСП.

В сучасних системах ВСК обробка сигналів ВСП виконується у цифровій формі, що передбачає дискретизацію сигналів у часі з кроком  $T_d \ll 1/f$ . Дискретний аналог сигналу (2) представляється як

$$u[j, \bar{p}_g, r_g] = U[j, \bar{p}_g, r_g] \times \cos[2\pi f_0 j - \varphi[j, \bar{p}_g, r_g]] + n[j], \quad (3)$$

$$g \in [1, G], j \in [1, T_a/T_d],$$

Для моделі (3) існує дискретне перетворення Гільберта. Ця модель є базовою для обробки сигналів у роботизованих системах ВСК.

З точки зору загального алгоритму обробки сигналів ВСП у роботизованих системах контролю умовно можна розділити на три етапи: первинний (формування та опрацювання аналогового сигналу), вторинний (опрацювання цифрового сигналу та його дискретних характеристик) та третинний (візуалізація результатів контролю та їх статистичне опрацювання).

Перший етап виконується за традиційною схемою [9], яка передбачає формування сигналів збудження ВСП (1) та управління їх параметрами, програмне підсилення сигналів ВСП (2), компенсацію (за необхідності) сигналу небалансу, аналого-цифрове перетворення сигналів.

Другий етап обробки вихрострумового сигналу призначено для здобуття корисної інформації відносно дефектності контрольованої поверхні і формування діагностичних ознак.

Загальна концепція опрацювання сигналів ВСП ґрунтується на поєднанні дискретного перетворення Гільберта [10, 11], зі статистичними методами обробки характеристик сигналів [12]. Для отримання оцінок параметрів сигналів, що є неперервними у реальному часі, застосування алгоритму «ковзного середнього» з подвійним вікном є найбільш ефективним.

Перше вікно  $W_1[j_k]$  з апертурою  $k$  забезпечує формування поточної вибірки з послідовності (3). Для цієї вибірки обчислюється дискретний гільберт-образ

$$u_H[j_k, \bar{p}_g, r_g] = \mathbf{H}\{u[j_k, \bar{p}_g, r_g]\}, j_k = \overline{j, j+k}, \quad (4)$$

де  $\mathbf{H}\{\cdot\}$  — оператор дискретного перетворення Гільберта.

Послідовності (3) ставиться у відповідність її комплексно значуща аналітична версія  $u[j_k, \bar{p}_g, r_g] + iu_H[j_k, \bar{p}_g, r_g]$ , де  $i = \sqrt{-1}$ , для якої доступні визначенню такі характеристики:

а) дискретна амплітудна характеристика

$$A[j_k, \bar{p}_g, r_g] = \sqrt{u^2[j_k, \bar{p}_g, r_g] + u_H^2[j_k, \bar{p}_g, r_g]}; \quad (5)$$

б) дискретна фазова характеристика

$$\begin{aligned} \Phi[j_k, \bar{p}_g, r_g] = & \arctg \frac{u_H[j_k, \bar{p}_g, r_g]}{u[j_k, \bar{p}_g, r_g]} + \\ & + \frac{\pi}{2} \left\{ 2 - \text{sign } u_H[j_k, \bar{p}_g, r_g] \left( 1 + \text{sign } u[j_k, \bar{p}_g, r_g] \right) \right\} + \\ & + 2\pi \mathbf{L} \left[ u[j_k, \bar{p}_g, r_g], u_H[j_k, \bar{p}_g, r_g] \right], \end{aligned} \quad (6)$$

де  $\text{sign}$  — знакова функція;  $\mathbf{L}$  — оператор розгортання фазової характеристики за межі інтервалу  $[0, 2\pi)$ ;

в) дискретна частотна характеристика

$$f[j] = \frac{\Phi[j_k, \bar{p}_g, r_g] - \Phi[j_k - 1, \bar{p}_g, r_g]}{2\pi T_d}; \quad (6)$$

г) різниця дискретних фазових характеристик двох послідовностей, наприклад,  $u_1[j_k, \bar{p}_g, r_g]$  (визначена для вимірювального сигналу) і  $u_2[j_k]$  (визначена для опорного сигналу)

$$\Delta\Phi[j_k, \bar{p}_g, r_g] = \Phi_1[j_k, \bar{p}_g, r_g] - \Phi_2[j_k]. \quad (7)$$

Друге вікно  $W_2[j_m]$  з апертурою  $m \ll k$  забезпечує відбір поточних значень дискретних характеристик сигналів, зокрема за послідовністю (7) визначаються нові для ВСК кругові статистичні характеристики [11]: кругове вибіркове середнє,

дисперсія, довжина результуючого вектора, медіана, мода та ін.

Етап третинного опрацювання передбачає документування та архівацію результатів контролю, класифікацію дефектів, статистичне опрацювання результатів контролю серій однотипних виробів чи їх фрагментів, побудови і візуалізації полів діагностичних ознак у зв'язаній з ОК системі координат і т. і.

**Обговорення отриманих результатів.** Поєднання промислових роботів-маніпуляторів з приладами ВСК в рамках єдиних діагностичних комплексів НК має наступні переваги для дефектоскопії:

- повна автоматизація процесу ВСК та підвищення його продуктивності;
- можливість стабілізації зазору між поверхнею ОК та ВСП;
- підвищення об'єктивності та вірогідності контролю за рахунок усунення людського чинника на всіх стадіях контролю від формування сигналів ВСП до прийняття діагностичних рішень;
- можливість представлення результатів контролю на 3D моделях та отримання відповідних дефектограм (документування результатів контролю);
- можливість прив'язки результатів контролю до точок поверхні виробу в одній системі просторових координат;
- висока точність та повторюваність позиціонування ВСП;
- можливість повторного контролю (або контролю різних однотипних виробів) в точках з незмінними просторовими координатами, що необхідно, наприклад, для реалізації багатопараметричного ВСК;
- можливість адаптації та швидкого переналагоджування комплексу до різних типів ВСП, геометрії ОК та задач контролю.

Розширення можливостей цифрової обробки сигналів ВСП на основі поєднання дискретного перетворення Гільберта та статистичних методів оцінювання характеристик сигналів дозволить підвищити чутливість та вірогідність контролю за рахунок використання нових для ВСК кругових статистик, які визначаються через фазові характеристики сигналів ВСП.

Таким чином, роботизація процесів ВСК дозволяє не тільки збільшити продуктивність неруйнівного контролю, але й підвищити його якісні характеристики.

## Висновки

1. Поєднання можливостей сучасних роботів-маніпуляторів, методів цифрової обробки сигналів і статистичних методів опрацювання результатів вимірювань дозволяє створити



сучасну роботизовану систему ВСК з покращеними технічними характеристиками та якісно новими можливостями, що забезпечують автоматичний неруйнівний контроль виробів зі складною геометрією.

2. Запропоновано ефективну методологію обробки сигналів ВСП, основою якої є використання дискретного перетворення Гільберта у поєднанні із статистичними методами опрацювання характеристик сигналів.

3. Запропонована структура роботизованої системи автоматичного неруйнівного контролю, що дозволяє досягти високих показників продуктивності та достовірності результатів НК виробів зі складною геометрією.

### Список літератури

1. Ключев В. В. (ред.) (2003). *Неразрушающий контроль*. Справочник: в 7 т. Москва, Машиностроение, Т. 2.
2. ДСТУ EN 12084:2005. *Неруйнівний контроль. Контроль вихрострумів. Загальні вимоги і рекомендації*.
3. Лобанов Л. М., Шаповалов Е. В., Коляда В. А. (2014). Применение современных информационных технологий для решения задач автоматизации технологических процессов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 52–56.
4. Schwabe M., Maurer A., Koch R. (2010). *Ultrasonic Testing Machines with Robot Mechanics – A New Approach to CFRP Component Testing*. 2nd International Symposium on NDT in Aerospace, Germany.
5. Louviot P., Tachattate A., Garnier D. (2012). *Robotised UT Transmission NDT of Composite Complex Shaped Parts*. 4th International Symposium on NDT in Aerospace, Berlin (Germany).
6. Попов Е. П., Письменный Г. В. (1990). *Основы робототехники*. Москва, Высшая школа.
7. Юревич Е. И. (2005). *Основы робототехники*. 2-е изд., перераб. и доп., Санкт-Петербург, БХ-Петербург.
8. Сляднева Н. А. (2008). «РОБОСКОП ВТ-3000» Роботизированный комплекс вихретокового контроля. *Диагностические приборы. Средства и технологии неразрушающего контроля*, 1, 31.
9. Учанін В. М. (2013). *Накладні вихроструміві перетворювачі подвійного диференціювання*. Львів, СПОЛІОМ.
10. Тетерко А. Я., Назарчук З. Т. (2004). *Селективна вихрострумова дефектоскопія*. Львів, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України.

11. Куц Ю. В., Щербак Л. М. (2009). *Статистична фазометрія*. Тернопіль, Вид-во Тернопіль. технічного ун-ту імені Івана Пулюя.
12. Бендат Дж., Пирсол А. (1989). *Прикладной анализ случайных данных*. Москва, Мир.

В. В. Долиненко<sup>1</sup>, Е. В. Шаповалов<sup>1</sup>,  
Т. Г. Скуба<sup>1</sup>, В. А. Коляда<sup>1</sup>, Ю. В. Куц<sup>1</sup>,  
Р. М. Галаган<sup>1</sup>, В. В. Карпинский<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского».  
03056, г. Киев, просп. Победы, 37.

### РОБОТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

Выполнен анализ современного состояния разработки автоматизированных и автоматических систем вихретокового неразрушающего контроля изделий со сложной геометрией. Показана необходимость создания адаптивных роботизированных систем, в которых оператор непосредственно не задействован в процессе выполнения контроля. Выполнено обоснование необходимости внедрения новой эффективной методологии обработки сигналов вихревых токов, в которой используется теория дискретного преобразования Гильберта в сочетании с методами теории статистической обработки сигналов. Предложена структурная схема роботизированного комплекса автоматического контроля, который состоит из промышленного робота-манипулятора, координатного стола с несколькими степенями свободы и устройством фиксации объекта контроля, автоматизированной станции с набором вихретоковых преобразователей различных типов, блока датчиков технического зрения, персонального компьютера и электронного блока управления и обработки вихретоковых сигналов. Библиогр. 12, рис. 7.

**Ключевые слова:** автоматический неразрушающий вихретоковый контроль, адаптивный робототехнический комплекс, амплитудная и фазовая характеристики вихретокового сигнала

Надійшла до редакції 19.04.2017

### НОВАЯ КНИГА

Спеціальні способи зварювання: підручник / І. В. Кривцун, В. В. Квасницький, С. Ю. Максимов, Г. В. Єрмолаєв, за заг. ред. академіка НАН України, д-ра техн. наук, професора Б. Є. Патона. – Миколаїв: НУК, 2017. – 348 с.

Викладено спеціальні способи зварювання у твердому стані, плавленням із використанням висококонцентрованих джерел енергії та гібридних технологій, зварювання та споріднених технологій під водою, в космосі і медицині. Широко використано досвід і розробки авторів та сучасні досягнення наукових організацій і підприємств. Призначено для студентів технічних університетів, що вивчають зварювання та споріднені процеси і технології, а також може бути корисним магістрантам, дипломникам, аспірантам, інженерно-технічним працівникам машинобудування та інших галузей.

По питанню придбання підручника звертатись до редакції журналу «Автоматическая сварка».



## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ТРУБ ТЕПЛООБМЕННИКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ МОКРОЙ ПОДВОДНОЙ СВАРКОЙ

С. Ю. МАКСИМОВ

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

Одним из альтернативных источников энергии являются тепловые насосы. Входящие в их состав теплообменники представляют собой трубы диаметром 140...190 мм, уходящие в землю на глубину 200 м и заполненные теплоносителем — смесью воды с 25 % специальной охлаждающей жидкости FHC2 на основе антифриза с коррозионными ингибиторами. Для герметизации теплообменника разработана технология приварки доньшка с помощью автоматической подводной сварки порошковой проволокой. Определено влияние охлаждающей жидкости и глубины на формирование и структуру металла шва, выбраны основные параметры процесса сварки — скорость подачи проволоки, скорость вращения автомата, углы наклона горелки, оптимальный зазор между стенкой трубы и торцом привариваемого доньшка. Проведена опытно-промышленная проверка. Библиогр. 2, рис. 8.

*Ключевые слова:* дуговая мокрая сварка, низкоуглеродистая сталь, тепловые насосы, приварка доньшка, порошковая проволока, автоматизация процесса

Постоянный рост стоимости нефтепродуктов и газа заставляет многие страны все чаще обращать свое внимание на способы получения так называемой возобновляемой энергии. Одним из типовых решений в данной отрасли являются тепловые насосы. В частности, на их основе работает разработанная компанией «Greenfield Energy Limited» система «Geoscart™» [1]. Она предназначена для управления тепловыми потоками общественных и коммерческих зданий и предприятий с непрерывным энергопотреблением высокой плотности: современные супермаркеты, отели повышенного класса, стационарные больничные комплексы, предприятия пищевой и фармакологической промышленности. При этом используются геотермальные теплообменники специальной конструкции для быстрой и эффективной передачи излишков или дефицита тепла, используя высокую плотность и теплоемкость геологических формаций, расположенных значительно ниже поверхностных грунтов. Стандартными глубинами для теплообменного процесса являются интервалы до 200 м ниже уровня поверхности земли. Каждый комплекс состоит из более чем десятка теплообменников, представляющих собой трубы диаметром 140...190 мм, заполненные смесью воды с 25 % специальной охлаждающей жидкости FHC2 на основе антифриза с коррозионными ингибиторами. Нижний конец труб герметизируется с помощью каучуковой пробки специальной конструкции. Практика эксплуатации теплообменников показала, что через несколько лет в результате старения материала пробки появляется утечка теплоносителя, приводящая к снижению КПД тепловых насосов.

Целью работы являлась разработка технологии герметизации труб теплообменников автоматической подводной мокрой сваркой порошковой проволокой в растворе антифриза на глубине 200 м.

Исследования проводились в два этапа — на лабораторной установке на базе трактора ТС-17 и в гидробарокамере с имитацией глубины. На первом этапе выполнялись наплавки опытными порошковыми проволоками в растворе антифриза. Скорость сварки составляла 6,8 м/ч, скорость подачи порошковой проволоки — 250 м/ч. Образующиеся при диссоциации раствора охлаждающей



Рис. 1. Сварка с охлаждающей жидкостью FHC2



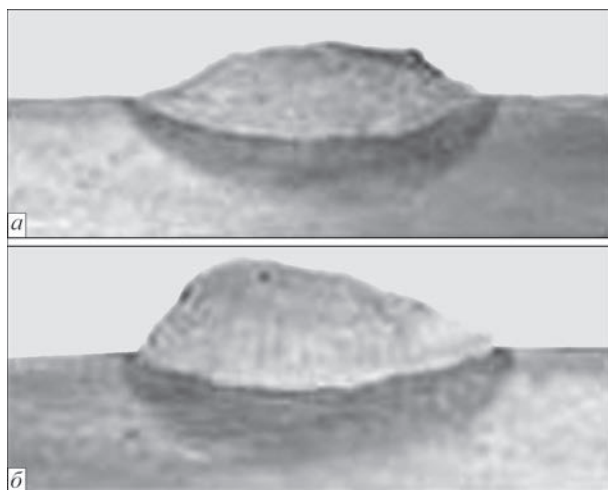


Рис. 2. Макрошлифы наплавов, выполненных в пресной воде (а) и в 25%-м растворе охлаждающей жидкости FXC2 (б)

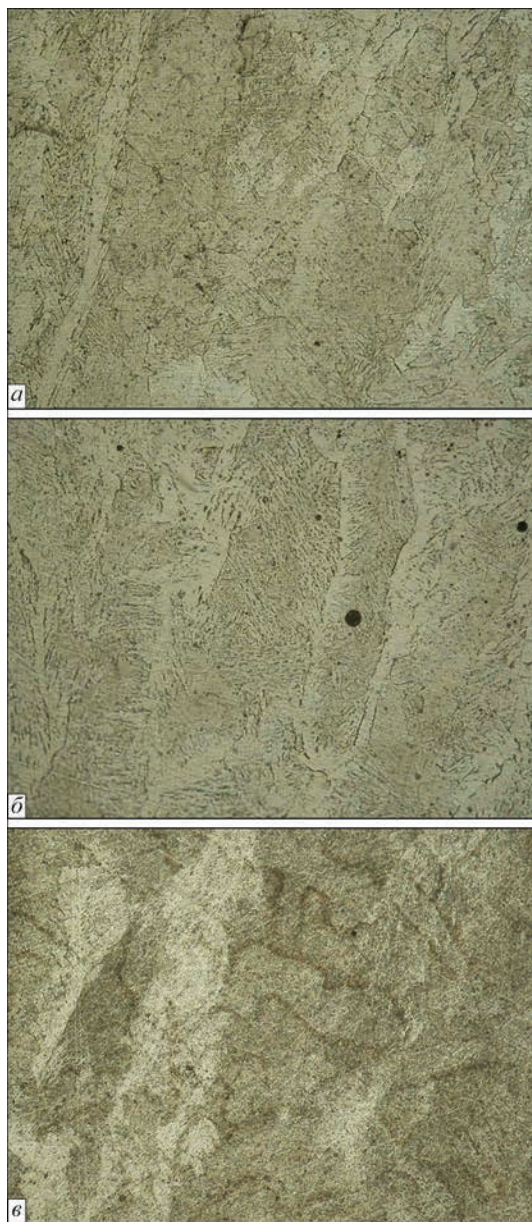


Рис. 3. Микроструктура наплавов, выполненных в пресной воде (а); в 25%-м растворе охлаждающей жидкости FXC2 на глубине 0,2 (б) и 200 м (в) ( $\times 250$ )

жидкости пары, выходя на поверхность воды, воспламенялись (рис. 1).

Макрошлифы наплавов, выполненных выбранной для дальнейших исследований порошковой проволокой, приведены на рис. 2. Наличие охлаждающей жидкости фактически не оказало заметного влияния на формирование наплавленного валика.

Для определения влияния условий сварки на структуру металла шва дополнительно была выполнена наплавка на глубине 200 м. Металлографические исследования образцов проводили на микроскопах Neophot-32 и Poluvar при разных увеличениях. Твердость измеряли на микротвердомере М-400 фирмы Лесо. Цифровое изображение получили при помощи фотокамеры Olympus-5050. Результаты показали, что структура металла шва при сварке в пресной воде — феррит с упорядоченной второй фазой (рис. 3, а), с максимальной твердостью  $HV10$  — 1950 МПа. При сварке в 25%-м растворе охлаждающей жидкости FXC2 в металле шва образуются полигональный феррит, иногда с ориентацией по Видманштетту, и тонкодисперсные выделения перлита вдоль границ кристаллитов, размер зерен несколько увеличивается. В теле кристаллитов образуется несколько модификаций феррита — полиэдрический и две модификации пластинчатого — с упорядоченной второй фазой и с неупорядоченной (рис. 3, б). Твердость несколько уменьшается ( $HV10$  — 1820 МПа). При сварке на глубине 200 м структура металла шва представляет собой мелкодисперсный зернистый перлит и участки свободного феррита (рис. 3, в). Появились отдельные крупные поры. Твердость снизилась до  $HV10$  — 1600 МПа. Таким образом, добавка охлаждающей жидкости FXC2 не приводит к значительной деградации микроструктуры металла шва.

На втором этапе выполнялась отработка техники сварки применительно к приварке доньшка автоматом в гидробарокамере. Образцы представляли собой тавровое соединение (рис. 4). Горизонтальная полка толщиной 10 мм имитировала



Рис. 4. Образец для сварки



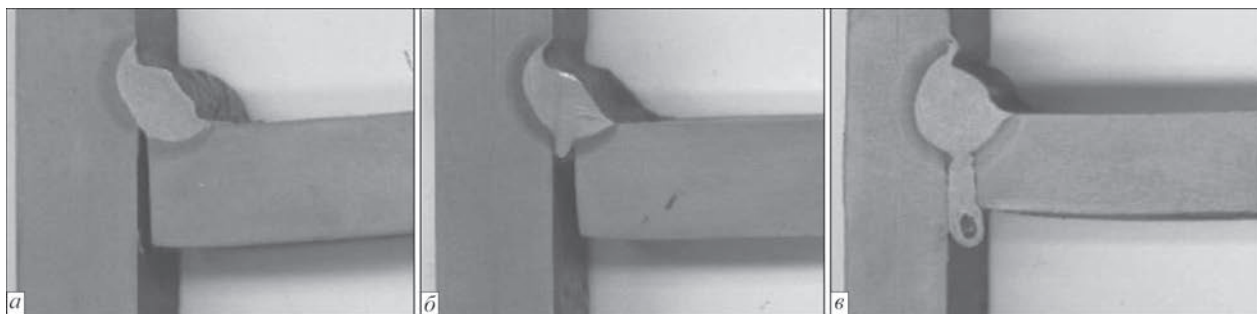


Рис. 5. Примеры сварных соединений образцов с различными параметрами сборки и сварки

донышко. Исходя из конструктивных особенностей автомата [2] и условий доставки донышка к месту сварки желательно, чтобы зазор между его кромками и стенкой трубы был как можно больший. С другой стороны, увеличение зазора может привести к потере жидкого металла. Поэтому образцы для сварки собирались с зазором от 0 до 5 мм. Также варьировали угол наклона держателя в вертикальной и горизонтальной плоскости и место зажигания дуги — на стенке или донышке с различным расстоянием от края. Скорость сварки изменялась в диапазоне 2,8...6,8 м/ч, скорость

подачи проволоки 160...260 м/ч. Сварка выполнялась опытной порошковой проволокой диаметром 1,6 мм на обратной полярности. Напряжение холостого хода 40...42 В.

На рис. 5 приведены макрошлифы типичных сварных соединений. Наиболее приемлемые результаты получены при величине зазора между го-

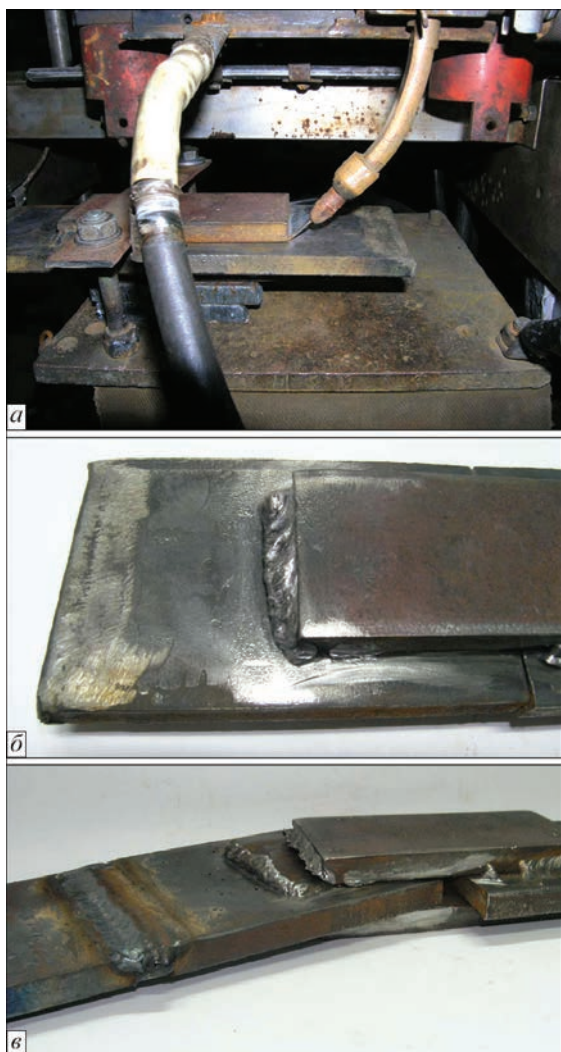


Рис. 6. Образец для испытаний на разрыв: перед сваркой (а), после сварки на глубине 200 мм (б) и после испытания (в)

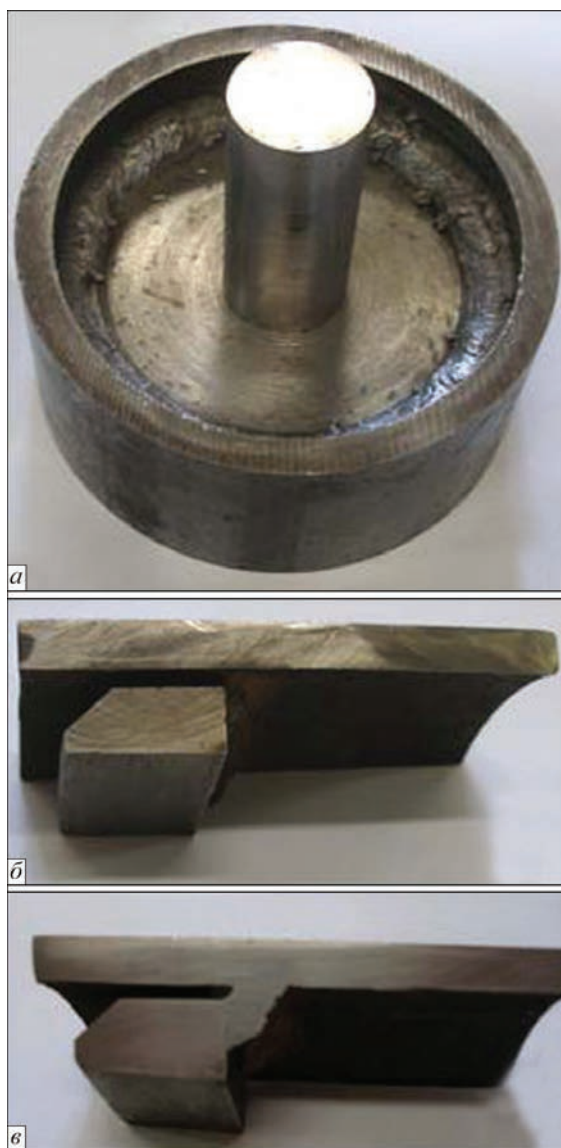


Рис. 7. Результаты приварки донышка к внутренней поверхности трубы: а — кольцевой шов с перекрытием; б — реальный зазор между донышком и трубой; в — форма сварного соединения



Рис. 8. Внешний вид приваренного доньшка

ризонгальной и вертикальной полками таврового соединения 4 мм. Поджиг осуществлялся на горизонтальной полке на расстоянии 1...2 мм от края. Угол наклона электрода в вертикальной плоскости составлял 40...50°, в горизонтальной — порядка 20°. Скорость сварки около 5 м/ч, скорость подачи проволоки 220...240 м/ч.

Для определения прочности металла шва на срез были сварены образцы, имитирующие угловое соединение (рис. 6), и испытаны на растяжение. Скорость сварки 5,1 м/ч, скорость подачи проволоки 240 м/ч,  $U_{x,x} = 41$  В. Усилие разрушения составило 9150 кг или в пересчете на сечение разрушения 438 МПа. Учитывая, что доньшко испытывает давление столба воды величиной 200 МПа, можно заключить, что образующееся сварное соединение имеет значительный запас прочности.

На заключительном этапе разработанная технология проверялась на специальном стенде, разработанном в ОКТБ ИЭС, в автоматическом режиме. Сварку выполняли в два этапа. С помощью прихватки доньшко фиксировалось относительно стенки трубы для предотвращения вращения доньшка вместе с автоматом внутри трубы. Затем автомат перемещался на противоположную сторону доньшка и выполнялась сварка кольцевого шва. Время сварки выбиралось из учета перекрытия в 2...3 см начала шва. Внешний вид приваренного доньшка и макрошлифы приведены на рис. 7.

В промышленных условиях сварка выполнялась в г. Крейфорд, Великобритания, в трубе диаметром 119 мм. Объект состоял из 15 скважин

глубиной от 180 до 210 м, угол размещения скважин относительно вертикали от 0 до 15°. Перед началом сварочных работ скважины проверялись специальным набором муляжей диаметрами 118, 117, 116 мм на проходимость сварочного автомата и для определения диаметра доньшка. Скорость сварки 6,3 м/ч; время сварки 3 мин 18 с; ток сварки 200...220 А; напряжение 50 В. После сварки качество сварного шва оценивалось визуально с помощью специальной видеокамеры (рис. 8) и избыточным давлением 1 МПа в течение 30 мин.

Полученные результаты показали, что разработанная технология приварки доньшка внутри трубы обеспечивает ее герметизацию, предотвращая потерю дорогостоящего теплоносителя и снижение КПД теплового насоса.

### Список литературы

1. Stickney K. (2009). Introduction to geoscartTM and the benefits to refriaeration systems. *Greenfield Energy Ltd*, 18.
2. Лебедев В. А., Максимов С. Ю., Пичак В. Г. и др. (2014). Автомат для дуговой подводной сварки мокрым способом в стесненных условиях. *Автоматическая сварка*, 9, 41–46.

С. Ю. Максимов

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

### РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ГЕРМЕТИЗАЦІЇ ТРУБ ТЕПЛООБМІННИКА АВТОМАТИЧНИМ МОКРИМ ПІДВОДНИМ ЗВАРЮВАННЯМ

Одним з альтернативних джерел енергії є теплові насоси. Теплообмінники, що входять до їх складу, являють собою труби діаметром 140...190 мм, які йдуть в землю на глибину 200 м і заповнені теплоносієм – сумішшю води з 25 % спеціальної охолоджувальної рідини FHC2 на основі антифризу з корозійними інгібіторами. Для герметизації теплообмінника розроблена технологія приварювання денця за допомогою автоматичного підводного зварювання порошковим дротом. Визначено вплив охолоджуючої рідини і глибини на формування та структуру металу шва, обрані основні параметри процесу зварювання — швидкість подачі дроту, швидкість обертання автомата, кути нахилу пальника, оптимальний зазор між стінкою труби і торцем донця, що приварюється. Проведена дослідно-промислова перевірка. Бібліогр. 2, рис. 8.

*Ключові слова:* дугове мокре зварювання, низьковуглецева сталь, теплові насоси, приварка денця, порошковий дріт, автоматизація процесу

Поступила в редакцію 21.04.2017

## СОЗДАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ГИБРИДНОЙ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. Н. КОРЖИК<sup>1,2</sup>, В. Н. СИДОРЕЦ<sup>1,2</sup>, ШАНГУО ХАН<sup>1</sup>,  
А. А. БАБИЧ<sup>1,2</sup>, А. А. ГРИНЮК<sup>2,3</sup>, В. Ю. ХАСКИН<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Гуандунский Институт сварки (Китайско-украинский институт сварки им. Е. О. Патона).  
510650, Китай, Гуанчжоу, Тяньхе, ул. Чапкиннг, 363.

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

<sup>3</sup>НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 37

Целью данной работы является создание комплекса оборудования и технологии гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом с коаксиальной подачей проволоки для конструкций из сталей и алюминиевых сплавов толщиной 5...12 мм с использованием промышленных роботов. Математическое моделирование процессов в дуге при гибридной плазменно-дуговой сварке явилось основой выбора параметров режима сварки с учетом взаимного влияния столба сжатой дуги неплавящегося электрода и дуги с плавящимся электродом, позволившей сформулировать технические требования к источникам питания сварочного тока. На основании математического и физического моделирования процесса гибридной сварки создан комплекс оборудования и базовые технологические процессы для роботизированной сварки тонкостенных конструкций из сталей и алюминиевых сплавов. Разработанная система управления комплексом позволила синхронизировать функционирование двух сварочных источников и вспомогательного оборудования с перемещениями антропоморфного промышленного робота для реализации устойчивого процесса гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом. Применение данного процесса сварки позволило уменьшить расход электродного металла на 40 % по сравнению с импульсно-дуговой сваркой плавящимся электродом при сопоставимых скоростях. При этом уровень продольных прогибов сварных образцов при использовании гибридного процесса был в 3 раза меньше по сравнению с процессом сварки импульсной дугой с плавящимся электродом. Библиогр. 20, табл. 1, рис. 10.

*Ключевые слова:* роботизированный комплекс, плазма, дуга с плавящимся электродом, гибридный процесс, алюминиевые сплавы, стали, режимы сварки, качество соединений

В настоящее время тенденции роботизации и автоматизации сварочного производства становятся все более актуальными для крупносерийного производства. Примером может служить использование роботов в конвейерных линиях при производстве автомобилей [1]. Еще одним актуальным примером является использование промышленных роботов в судостроении [2]. Здесь сварочные роботы применяются для изготовления элементов корпусов кораблей, палубных надстроек, коммуникационных систем и различного рода судового оборудования [3]. Основное преимущество, получаемое при этом – повышение производительности и качества сварных соединений за счет замены ручной сварки на автоматическую. Кроме того, сокращается необходимость в высококвалифицированных специалистах сварщиках и появляется возможность высокопроизводительной сварки в труднодоступных местах. Так, применение вместо стали алюминия и его сплавов в судостроении и вагоностроении для изготовления корпусных элементов позволяет снизить их массу на 50...60 %. В результате появляется возможность повысить грузоподъемность судов и железнодорожного транспорта.

Для выполнения роботизированной сварки чаще всего используют хорошо известные традиционные дуговые способы [3]. Это, в первую очередь, сварка плавящимся (MIG/MAG) и неплавящимся (TIG) электродами. Однако, получаемые этими способами сварные соединения не всегда в полной мере удовлетворяют требованиям к качеству поверхности и уровню остаточных деформаций после сварки изготавливаемых конструкций. При роботизации сварочных процессов целесообразно применять доступную высокопроизводительную технологию, позволяющую минимизировать уровень остаточных сварочных деформаций.

Одним из сварочных процессов, позволяющих решить поставленную задачу, является гибридная плазменно-дуговая (Plasma-MIG) сварка плавящимся электродом [4]. Этот процесс впервые был запатентован в 1972 г. Вильгельмом Эссерсом и другими сотрудниками исследовательского центра компании Philips (Нидерланды) [5]. При таком способе сварки образуется источник нагрева для гибридной плазменно-дуговой сварки, состоящий из сжатой дуги неплавящегося электрода, охватывающей дугу с плавящимся электродом. Дополнительное сжатие последней обеспечивает сниже-



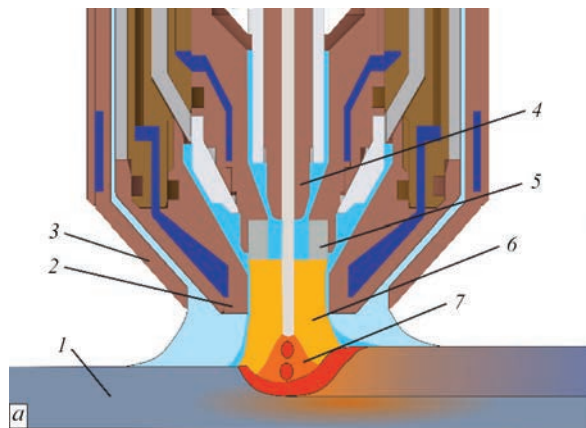
ние разбрызгивания и возможность повышения глубины проплавления основного металла при меньших значениях скорости подачи электродной проволоки (меньше сварочный ток дуги плавящегося электрода). Применение такого процесса для изготовления сварных конструкций способно обеспечить формирование мелкозернистых структур швов, а также высокое качество и производительность сварки [6].

Ранее в конструкциях головок для гибридной плазменно-дуговой сварки дугой с плавящимся электродом применялся обычный штывевой неплавящийся электрод. В современных конструкциях его заменили на полый – кольцевой [7]. Современный модифицированный процесс гибридной плазменно-дуговой сварки еще не получил достаточно широкого распространения, однако активно изучается исследователями [8]. Технологии сварки различных материалов этим способом также находятся на стадии разработки.

Целью данной работы являлось создание оборудования и технологии для гибридной плазменно-дуговой сварки с плавящимся электродом с коаксиальной подачей проволоки для роботизированной сварки конструкций из сталей и алюминиевых сплавов с толщиной стенок 5...12 мм.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Моделирование процесса гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом с учетом взаимного влияния сжатой дуги неплавящегося электрода и дуги с плавящимся электродом, на базе результатов которого осуществляется предварительный выбор параметров режима гибридной сварки.
2. Формулирование требований к сварочным источникам питания.
3. Синхронизация работы сварочных источников и вспомогательного оборудования с антропоморфным промышленным роботом.



4. Разработка сварочной горелки для гибридной плазменно-дуговой сварки, ориентированной на непрерывную роботизированную сварку.

5. Создание роботизированного комплекса и отработка технологии гибридной плазменно-дуговой сварки конструкций из сталей и алюминиевых сплавов с толщиной стенок 5...12 мм.

Для предварительного выбора параметров режима гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом процессы нагрева плавящегося электрода рассматривали при следующих предположениях (рис. 1): фазы нагрева вылета электрода и его плавления достаточно разделены и взаимодействие происходит таким образом, что конечные условия для нагрева являются начальными условиями для плавления; вылет электрода нагревается плазмой разряда с неплавящимся электродом и сварочным током; длина расплавленной зоны намного меньше, чем длина вылета электрода; перенос электродного металла капельный. Эти предположения совпадают с допущениями, сделанными в работе [9]. Поэтому математическую модель строили аналогично. Различие между сварочными процессами MIG и Plasma-MIG состоит в том, что вылет электрода дополнительно нагревается плазмой разряда с неплавящимся кольцевым электродом (анодом).

Электродная проволока расположена внутри плазменного разряда на его оси. Повышение ее температуры происходит за счет конвекционного и радиационного нагрева. Учитывая, что температура плазмы  $T_p = 5500...15000$  К легко показать, что доля энергии, подводимой к электродной проволоке конвекционным нагревом, чрезвычайно мала. Поэтому при решении тепловой задачи конвекционный нагрев нами не учитывается. Радиационный нагрев подчиняется закону Стефана-Больцмана, а дифференциальное уравнение, описывающее изменение температуры  $T$  во времени  $t$ , имеет вид

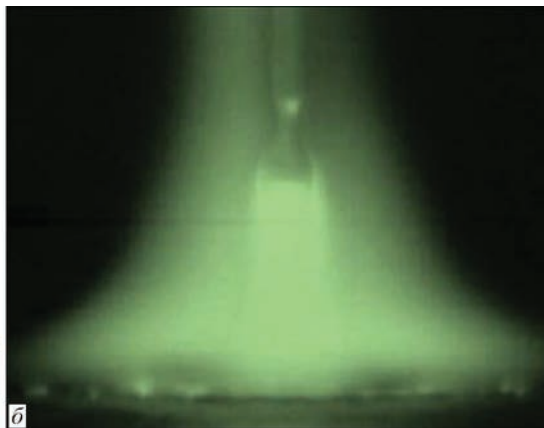


Рис. 1. Технологическая схема процесса (а) и фотография совместного действия сжатой дуги и дуги с плавящимся электродом (б) гибридной плазменно-дуговой сварки: 1 — свариваемый образец; 2 — плазмообразующее сопло; 3 — защитное сопло; 4 — мундштук плавящегося электрода; 5 — трубчатый электрод плазматрона (анод); 6 — сжатая дуга прямого действия; 7 — дуга плавящегося электрода

$$\frac{dT}{dt} = \frac{2\beta\sigma_{SB}}{\gamma cr_w} (T_p^4 - T^4), \quad (1)$$

где  $\sigma_{SB}$  — постоянная Стефана-Больцмана;  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $c$ ,  $r_w$  — степень черноты, плотность, удельная теплоемкость, радиус электродной проволоки, соответственно.

Решение дифференциального уравнения (1) имеет неявную форму

$$t = \frac{\beta\sigma_{SB} T_p^3}{\gamma cr_w} \times \left[ \operatorname{atanh}\left(\frac{T}{T_p}\right) - \operatorname{atanh}\left(\frac{T_0}{T_p}\right) + \operatorname{atan}\left(\frac{T}{T_p}\right) - \operatorname{atan}\left(\frac{T_0}{T_p}\right) \right], \quad (2)$$

где  $T_0$  — начальная температура электродной проволоки.

Решение (2) трудно использовать для дальнейших исследований. Оно упрощается, если принять во внимание, что температура плавления электродной проволоки  $T_m$  намного меньше температуры плазмы  $T_p$ . В этом случае мы получаем простое решение

$$T = T_0 + \frac{2\beta\sigma_{SB} T_p^4}{\gamma cr_w} t. \quad (3)$$

Разница между решениями при температуре плавления  $T_m$  составляет 0,2 для стали и 0,02 % для алюминия (диаметр электродной проволоки 1,2 мм). Это дало нам основание для дальнейшего использования формулы (3).

Энергия, накопленная в металле вылета электрода от прохождения сварочного тока и от излучения плазмы, суммируясь с энергией, выделяемой в приэлектродной (прикатодной) области, расходуется на нагрев и плавление металла. Из этого условия может быть получена скорость плавления электрода

$$v_m = \frac{\pi r_w^2 U_k i + \rho i^2 (l_w - l) + 2\pi^2 \beta \sigma_{SB} T_p^4 r_w^3 (l_p - l)}{\pi^2 \gamma r_w^4 [c(T_m - T_0) + \lambda]},$$

где  $i$  — сварочный ток (ток MIG процесса);  $l$  — длина дуги;  $U_k$  — катодное падение напряжения;  $l_w$ ,  $l_p$  — расстояния от мундштука до изделия и от сопла плазматрона до изделия (рис. 2);  $\rho$ ,  $\lambda$  — удельное сопротивление и скрытая теплота плавления электродного металла.

Очевидно, что динамика плавления электрода описывается дифференциальным уравнением, суть которого состоит в том, что изменение длины дуги равно разности скорости плавления электрода и скорости подачи электрода  $v$

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\pi r_w^2 U_k i + \rho i^2 (l_w - l) + 2\pi^2 \beta \sigma_{SB} T_p^4 r_w^3 (l_p - l)}{\pi^2 \gamma r_w^4 q} - v, \quad (4)$$

где  $q = c(T_m - T_0) + \lambda$ .

В соответствии с законом Кирхгофа напряжение холостого хода  $U_{OC}$  источника питания равно сумме падений напряжения на элементах цепи (см. рис. 2) — активное сопротивление  $R_S$  и индуктивность  $L$  источника питания и соединительных кабелей, активное сопротивление вылета электрода и падение напряжения на дуге  $El$  ( $E$  — напряженность электрического поля в дуге)

$$U_{OC} = R_S i + L \frac{di}{dt} + \rho \frac{l_w - l}{\pi r_w^2} i + El + U_a + U_k, \quad (5)$$

где  $U_a$  — анодное падение напряжения.

Уравнения (4) и (5) составляют систему нелинейных дифференциальных уравнений, которые описывают динамику системы «источник питания — дуга с плавящимся электродом» в процессе

$$\begin{cases} \frac{dl}{dt} = \frac{\pi r_w^2 U_k i + \rho i^2 (l_w - l) + 2\pi^2 \beta \sigma_{SB} T_p^4 r_w^3 (l_p - l)}{\pi^2 \gamma r_w^4 q} - v \\ \frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \left( U_{OC} - R_S i - \rho \frac{l_w - l}{\pi r_w^2} i - El - U_a - U_k \right) \end{cases} \quad (6)$$

Для того, чтобы найти особые точки, которые определяют статическое состояние необходимо правые части системы (6) приравнять к нулю. Уравнения для определения статических значений длины дуги  $l_0$  и сварочного тока  $i_0$  имеют вид:

$$\begin{aligned} & \rho(r_w E^2 + 2\rho\beta\sigma_{SB} T_p^4) l_0^3 - \\ & - \rho \left[ r_w E (2\bar{U}_{OC} + U_k + El_w) + 4\beta\sigma_{SB} T_p^4 (\pi r_w^2 R_S + \rho l_w) + \right. \\ & \left. + \rho (2\beta\sigma_{SB} T_p^4 l_p - \gamma q v r_w) \right] l_0^2 + \\ & + \left[ r_w U_k E + 2\rho (2\beta\sigma_{SB} T_p^4 l_p - \gamma q v r_w) \right] (\pi r_w^2 R_S + \rho l_w) + \\ & + \rho r_w \bar{U}_{OC} (\bar{U}_{OC} + U_k + 2El_w) + 2\beta\sigma_{SB} T_p^4 (\pi r_w^2 R_S + \rho l_w)^2 \Big] l_0 - \\ & - \left[ r_w U_k \bar{U}_{OC} (\pi r_w^2 R_S + \rho l_w) + \rho r_w \bar{U}_{OC}^2 l_w + \right. \\ & \left. + (2\beta\sigma_{SB} T_p^4 l_p - \gamma q v r_w) (\pi r_w^2 R_S + \rho l_w)^2 \right] = 0; \\ & \rho R_S i_0^3 - \rho (\bar{U}_{OC} + U_k - El_w) i_0^2 + \\ & + \pi r_w \left[ 2\beta\sigma_{SB} T_p^4 (\pi r_w^2 R_S + \rho l_w) + \rho (l_w - l) \right] + r_w (U_k E + \gamma q v) \Big] i_0 - \\ & - \pi^2 r_w^3 \left[ 2\beta\sigma_{SB} T_p^4 (\bar{U}_{OC} - El_p) + \gamma q v E r_w \right] = 0, \end{aligned}$$

где  $\bar{U}_{OC} = U_{OC} - U_a - U_k$ .

Для исследования свойств этих решений воспользуемся условиями существования, суть которых состоит в следующем: Plasma-MIG процесс

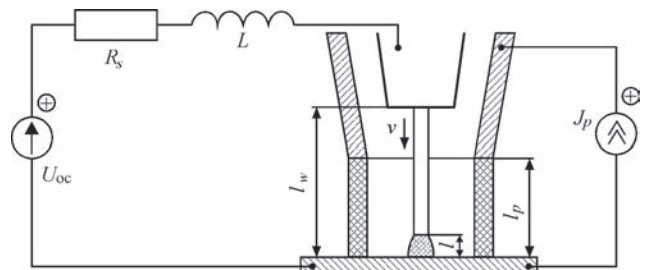


Рис. 2. Схема подключения источников питания при гибридном плазменно-дуговом сварочном процессе

физически реализуем, когда статический сварочный ток больше нуля

$$i_0 > 0, \quad (7)$$

а статическое значение длины дуги находится в пределах от нуля (контакт электрода с изделием) до расстояния от сопла до изделия (отгорание электрода)

$$0 < l_0 < l_w. \quad (8)$$

Применение этих условий позволяет определить максимальную температуру плазмы, при которой процесс Plasma-MIG протекает

$$T_{p\max} = \left( \frac{\gamma q v E r_w}{2\beta\sigma_{\text{SB}}(El_p - U_{\text{OC}} + U_a + U_k)} \right)^{1/4}.$$

Наши оценки показали, что максимальная температура для стали  $T_{p\max} = 7960$  К; для алюминия  $T_{p\max} = 7340$  К (параметры процесса, для которых проводились вычисления, приведены в работе [10]). Этот результат хорошо согласуется с экспериментальными результатами измерения температуры [11].

В гибридном процессе Plasma-MIG присутствует взаимное воздействие газовых разрядов один на другой. Воздействие плазменного разряда на плавление электродной проволоки было рассмотрено выше. Плавление электродной проволоки, в свою очередь, влияет на электрические параметры плазменного разряда [12, 13], в частности, на его вольтамперную характеристику (ВАХ). Эти особенности были учтены при выборе источников питания и разработке аппаратуры для Plasma-MIG процесса [14]. Однако, зависимость электрических характеристик от технологических параметров Plasma-MIG процесса не могут быть получены при использовании существующих резистивных моделей [15].

Для описания плазменного разряда гибридного Plasma-MIG процесса была усовершенствована модель дуги, разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона [16, 17].

Плазменная дуга рассматривается феноменологически как тепловой макрообъект, который является элементом электрической цепи со статической ВАХ  $U_{\text{Plasma}}(i)$ . Закон сохранения энергии для такого теплового макрообъекта выглядит так

$$\frac{dQ}{dt} = P - P_\theta.$$

Этот закон связывает три энергетических параметра столба плазменной дуги: внутреннюю энергию  $Q$ , подводимую  $P$  и отводимую  $P_\theta$  мощности. Внутренняя энергия столба дуги  $Q$  является суммой всех энергий плазмы: энергии теплового движения, энергии ионизации, колебательной и вращательной энергии молекул, и т. п. и зависит от радиуса и длины дуги, т.е. от ее объема. Под тер-

мином подводимая мощность  $P$  будем понимать мощность, потребляемую от источника питания, а под термином отводимая мощность  $P_\theta$  будем понимать мощность, которую столб дуги отдает в окружающее пространство посредством теплопроводности и излучения.

Применение термина ток состояния [16] и введение переменной  $i_\theta$  дает возможность выразить энергетические параметры дуги через электрические параметры

$$P = \frac{U_{\text{Plasma}}(i_\theta)}{i_\theta} i_\theta^2, \quad P_\theta = U_{\text{Plasma}}(i_\theta) i_\theta,$$

$$Q = 2\theta \int_0^{i_\theta} U_{\text{Plasma}}(i_\theta) di_\theta,$$

(где  $i_{\text{Plasma}}$  — ток плазменной дуги;  $\theta$  — постоянная времени плазменной дуги) и получить дифференциальное уравнение модели

$$\theta \frac{di_\theta^2}{dt} + i_\theta^2 = i_{\text{Plasma}}^2. \quad (9)$$

Уравнение (9) дополняется формулой связи между током плазменной дуги и напряжением на ней

$$u = \frac{U_{\text{Plasma}}(i_\theta)}{i_\theta} i_{\text{Plasma}},$$

которая входит в уравнения, соответствующие законам Кирхгофа.

В случае плазменной дуги с обдувом газом помимо естественной конвекции появляется дополнительный механизм рассеяния энергии. Этот механизм основан на принудительной конвекции, мощность которой  $P_v$  может быть учтена непосредственно

$$P_v = \frac{W_A}{V_A} Q = \frac{v_{\text{ShG}}}{l_p} Q,$$

где  $V_A$  — объем, занимаемый столбом плазменной дуги;  $W_A$  — объем плазмы, расходимый в единицу времени для продольного обдува  $W_A = \pi(r_{\text{Aout}}^2 - r_{\text{Ain}}^2)v_{\text{ShG}}$ ,  $v_{\text{ShG}}$  — скорость обдува защитным газом;  $r_{\text{Ain}}$  и  $r_{\text{Aout}}$  — внутренний и внешний радиусы столба плазменного разряда.

Уравнение баланса мощности в этом случае имеет вид

$$\frac{dQ}{dt} = P - P_\theta - P_v.$$

Уравнением модели дуги с продольным обдувом является

$$\theta \frac{di_\theta^2}{dt} = i_{\text{Plasma}}^2 - i_\theta^2 \left[ 1 + \frac{v_{\text{ShG}}}{l_p} \frac{Q}{P_\theta} \right]. \quad (10)$$

Уравнение (10) перспективно использовать для описания динамики плазменной дуги, где про-



дольный обдув защитным газом является существенной частью процесса.

Когда электродная проволока перемещается внутри цилиндрического плазменного разряда, появляется еще один механизм отвода энергии, связанный с ее нагревом. Его следует учитывать в законе сохранения энергии

$$\frac{dQ}{dt} = P - P_{\theta} - P_v - P_w.$$

Выше рассмотрен нагрев электродной проволоки за счет излучения плазменного разряда. Воспользовавшись этими результатами, получаем формулу для мощности

$$P_w = 2\pi r_w \beta \sigma_{SB} T_p^4 (l_p - l_0).$$

Уравнение обобщенной динамической модели плазменной дуги для Plasma-MIG процесса имеет вид

$$\theta \frac{di_{\theta}^2}{dt} = i_{\text{Plasma}}^2 - i_{\theta}^2 \left( 1 + \frac{P_v + P_w}{P_{\theta}} \right).$$

Для получения ВАХ плазменного разряда в Plasma-MIG процессе воспользуемся процедурой, описанной в статье [18]. В результате получена параметрическая зависимость напряжения плазменного разряда от его тока (рис. 3)

$$U_{\text{PlasmaMIG}}(i_{\theta}) = U(i_{\theta}) \left( 1 + \frac{P_v + P_w}{P_{\theta}} \right)^{1/2};$$

$$I_{\text{PlasmaMIG}}(i_{\theta}) = i_{\theta} \left( 1 + \frac{P_v + P_w}{P_{\theta}} \right)^{1/2}.$$

В этих формулах переменная  $i_{\theta}$  играет роль параметра.

График, представленный на рис. 3, демонстрирует тенденцию к увеличению напряжения на плазменном разряде при Plasma-MIG процессе. Это хорошо согласуется с явлениями, которые наблюдались в ходе технологических экспериментов при сравнении Plasma и Plasma-MIG процессов [10, 19, 20].

На основании проведенных расчетов разработаны технические условия для создания или подбора сварочных источников питания. Так, определено, что источник питания плазменной составляющей должен обеспечивать возможность горения сжатой дуги неплавящегося электрода на постоянном токе обратной полярности с токовой нагрузкой от 50 до 250 А и напряжением на дуге до 45 В. Источник питания дуги плавящегося электрода должен обеспечивать сварочный ток от 10 до 350 А при ПВ 100 %. При этом источники питания должны обладать возможностью связи с системой управления через шинный интерфейс использующий наиболее распространенные протоколы связи. На основе данных технических требований выбраны сварочные инверторные

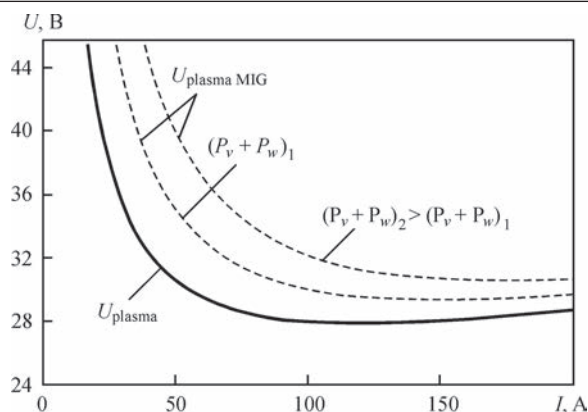


Рис. 3. ВАХ плазменного разряда в Plasma-MIG процессе (пунктирные линии) в сравнении с ВАХ разряда плазмы без процесса MIG (сплошная линия)

источники, наиболее подходящие разработанным техническим условиям. Эти источники снабжены шинным интерфейсом обмена сигналами управления и обратной связи с общей системой управления комплексом. Для надежной работы плазменного модуля в режиме сварки на постоянном токе обратной полярности проведена перекоммутация разъемов дежурной дуги для обеспечения ее поджига на обратной полярности. Система управления сварочными источниками питания и плазменным модулем построена на основе программируемого PLC контроллера, она обеспечивает алгоритм последовательного включения и отключения электрических компонентов комплекса оборудования для гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом, сбор информации о режиме сварки, контроль параметров работы узлов комплекса на предмет возникновения аварийных ситуаций (рис. 4). Связь между источниками питания происходит через шины по протоколу CAN bus. Алгоритм последовательности включения компонентов комплекса оборудования использует сигналы обратной связи по току и напряжению, которые генерируют источники питания.

Типичный алгоритм для процесса гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом выглядит следующим образом: при подаче питания на источники сварочного тока генерируются сигналы «Готовность к работе» и они поступают на контролер системы управления. При отсутствии сигнала дальнейший процесс включения блокируется. При подаче команды «Пуск сварки» сигнал проходит по шине на источник питания дуги с плавящимся электродом, после чего выполняется его поджиг. При наличии дуги с плавящимся электродом формируется сигнал «Основной ток» с источника питания плавящегося электрода на контроллер системы управления. При поступлении данного сигнала генерируется команда для плазмен-

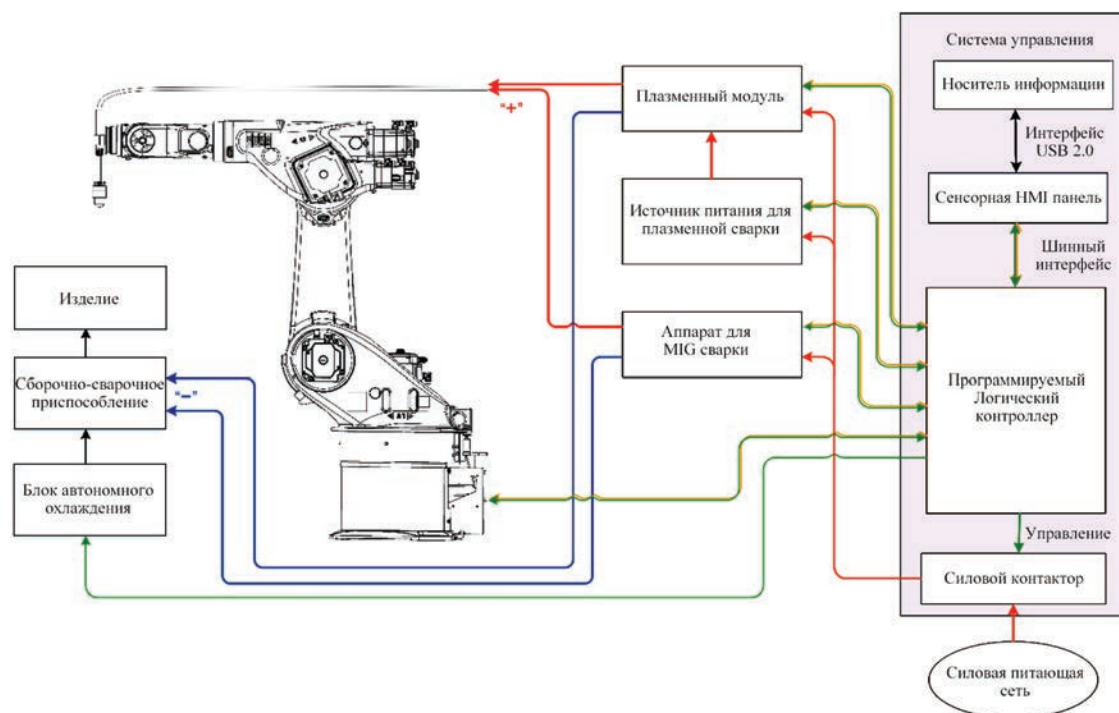


Рис. 4. Блок-схема роботизированного комплекса гибридной плазменно-дуговой сварки

ного модуля на поджиг дежурной дуги. После поджига дежурной дуги с временной задержкой генерируется сигнал на поджиг дуги на источнике питания плазменной составляющей. При возбуждении сжатой дуги неплавящегося электрода на источнике питания плазменной составляющей генерируется сигнал «Основной ток» и отправляется на контроллер системы управления. После прохождения сигнала «Основной ток» с источника питания плазменной составляющей происходит пуск системы перемещения горелки или детали с выбранной временной задержкой. Отсутствие или снятие во время процесса каждого из сигналов «Основной ток» является сигналом для прекращения алгоритма включения источников питания и самого процесса гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом.

Система осуществляет управление внешними устройствами перемещения (сварочная колонна, сварочный вращатель или другое устройство) или обеспечивает взаимодействие комплекса сварочных источников питания с контроллером сварочного робота и синхронизацию этапов цикла сварки с его действиями. Основные технические характеристики оборудования роботизированного комплекса для гибридной плазменно-дуговой сварки (рис. 5) приведены ниже.

#### Основные технические характеристики комплекса оборудования для гибридной плазменно-дуговой сварки

Напряжение трехфазной питающей сети переменного тока с частотой 50 Гц, В .....	400 (±15 %)
Рабочее напряжение на дуге плавящегося электрода, В .....	0...50

Рабочий ток дуги плавящегося электрода при гибридной плазменно-дуговой сварке, А .....	50...250
Рабочее напряжение источника для плазменной сварки, В .....	15...34
Пределы регулирования разнополярного асимметричного тока, А .....	10...350
Пределы регулирования постоянного тока прямой и обратной полярности, А .....	10...350
Пределы регулирования длительности протекания тока при прямой полярности, % .....	15...85
Защитный газ .....	Ar; Ar + He
Плазмообразующий газ в гибридной сварочной горелке... Ar	
Давление рабочих газов на входе в источники питания, МПа .....	0,2...0,4
Расходы газов, л/мин:	
защитного .....	10...40
центрального .....	1...10
плазмообразующего .....	0,1...10,0
Диаметры присадочной и электродной проволоки, мм .....	1,2; 1,6

Для связи с контроллером робота предусмотрено использование шинного интерфейса, работающего по протоколу CAN bus. Задача взаимодействия системы управления комплекса сварочного оборудования для гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом и контроллером робота строится по принципу «Master – Slave». В качестве «Master» выступает контроллер робота. После включения системы управления комплекса сварочного оборудования происходит опрос готовности к работе и исправности источников питания. При отсутствии сигналов о неполадке формируется сигнал «Готов» и передается на контроллер робота. Контроллер робота по команде «Пуск сварки» выводит сварочную горелку в точку начала сварки и передает команду на кон-



Рис. 5. Оборудование комплекса для роботизированной гибридной Plasma-MIG сварки: а — пульт управления комплексом для гибридной Plasma-MIG сварки; б — источники питания плазменной и дуговой составляющих с механизмами подачи проволоки; в — сварочная горелка в руке робота KR 60 HA фирмы KUKA (Германия)

троллер системы управления комплексом сварочного оборудования для пуска алгоритма поджига дуги при гибридной плазменно-дуговой сварке. Система управления запускает алгоритм поджига гибридной дуги и после прохождения сигналов «Основной ток», выдаваемых источниками питания при ее поджиге, генерирует сигнал для контроллера робота на начало перемещения сварочной горелки по программе, установленной на контроллере робота. После достижения горелкой точки окончания сварки контроллер останавливает перемещение и выдает команду на контроллер системы управления комплексом сварочного оборудования на гашение гибридной дуги. Контроллер системы управления выполняет отключения источников питания и плазменного модуля по установленному в нем алгоритму. После снятия сигнала «Основной ток» источника питания плавящегося электрода и завершения цикла сварки передается сигнал на контроллер робота для возвращения сварочной горелки в исходную точку.

Данный алгоритм взаимодействия системы управления комплексом сварочного оборудования для гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом и котроллером сва-

рочного робота дает возможность упростить процесс интегрирования сварочного оборудования с роботами различных производителей. При этом функции контроля за перемещением сварочного инструмента берет на себя контроллер робота, он же выдает команды для системы управления комплексом сварочного оборудования на поджиг и гашение сварочной дуги при гибридной плазменно-дуговой сварке.

Для формирования качественных швов создана сварочная горелка с узлом дополнительной газовой защиты (рис. 6). Диаметры сменных плазмобразующих сопел выбраны в пределах 6...10 мм. Конструкция анода была составной, представляющей собой медный корпус с тугоплавкой (вольфрамовой) вставкой. Для подачи электродной проволоки в вольфраме выполнено отверстие. Рабочее расстояние между плазмобразующим соплом и свариваемым образцом должно составлять порядка 6,0 мм. Это расстояние выбрано из условий существования (7) и (8), что обеспечивало изменение длины вылета электрода (расстояния от токоподводящего наконечника для электродной проволоки до изделия) в диапазоне 16...18 мм. При этом достигается минимальное забрызгивание плазмобразующего и защитных сопел плаз-

Параметры режимов гибридной плазменно-дуговой сварки (Plasma-MIG) сталей и алюминиевых сплавов в защите аргона с использованием электродных проволок диаметром 1,6 мм

Марка стали или сплава	Толщина образца $\delta$ , мм	Скорость сварки, м/мин	Ток сжатой дуги, $I_{PL}$ , А	Напряжение сжатой дуги $U_{PL}$ , В	Расход плазмобразующего газа $Q_{PL}$ , л/мин	Ток дуги плавящегося электрода $I_{MIG}$ , А	Напряжение дуги плавящегося электрода $U_{MIG}$ , В	Скорость подачи электродной проволоки, $v_{пр}$ , м/мин
SUS304	12,0	0,25	240	39	7	300	28	7,5
Сталь 20	10,0	0,25	200	37	6	240	28	8,0
5083	8,0	0,4	168	23	5	213	23	7,0
1561	5,0	0,6	115	26	5	165	18	7,6





Рис. 6. Внешний вид (а) и схема (б) горелки для роботизированной гибридной плазменно-дуговой сварки с дополнительным защитным соплом



Рис. 7. Стыковое соединение стали SUS304 ( $\delta = 12$  мм), полученное гибридной Plasma-MIG сваркой на созданном роботизированном комплексе: а — верхний валик; б — нижний валик



Рис. 8. Стыковое соединение Стали 20 ( $\delta = 10$  мм), полученное гибридной Plasma-MIG сваркой на роботизированном комплексе: а — верхний валик; б — нижний валик

мотрона при гибридной плазменно-дуговой сварке.

Для отработки технологии роботизированной гибридной плазменно-дуговой сварки конструкций из сталей и алюминиевых сплавов толщи-

ной 5...12 мм были подготовлены образцы стыковых соединений размером  $400 \times 200 \times \delta$  мм из стали SUS304 ( $\delta = 12$  мм), Стали 20 ( $\delta = 10$  мм) и алюминиевых сплавов 5083 ( $\delta = 8,0$  мм) и 1561 ( $\delta = 8,0$  мм). Сварку выполняли без разделки кро-



Рис. 9. Стыковое соединение сплава 1561 ( $\delta=5$  мм), полученное гибридной Plasma-MIG сваркой на созданном роботизированном комплексе: *а* — верхний валик; *б* — нижний валик

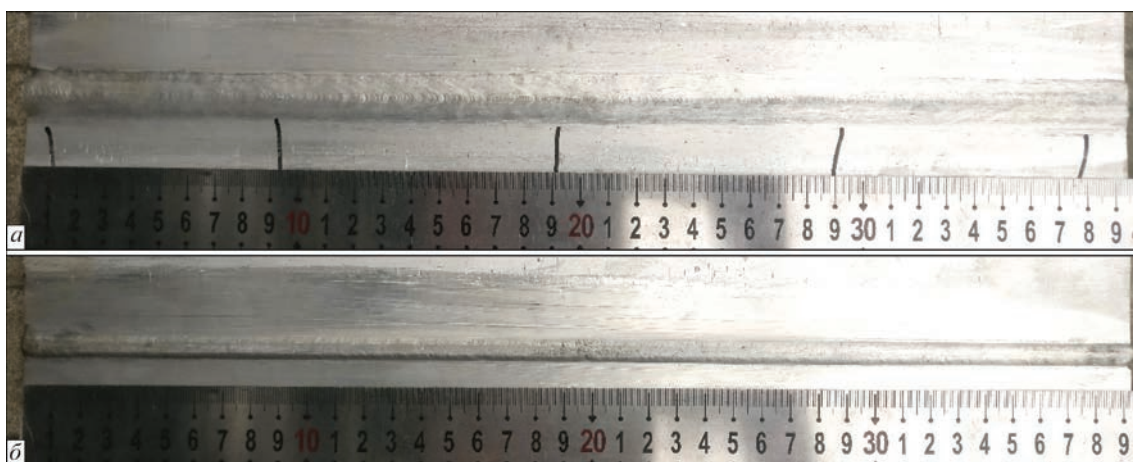


Рис. 10. Стыковое соединение сплава 5083 ( $\delta=8$  мм), полученное гибридной Plasma-MIG сваркой на роботизированном комплексе: *а* — верхний валик; *б* — нижний валик

мок. Для формирования корневой части шва использовали удаляющиеся подкладки: для сталей — медные, водоохлаждаемые, с размером канавки  $4 \times 1,5$  мм; для алюминиевых сплавов — из немагнитной аустенитной стали с размерами канавок  $8 \times 3,0$  и  $6 \times 2,0$  мм. Критерием окончательного выбора режима сварки являлось качественное формирование шва (рис. 7–10). Для определения наличия либо отсутствия внутренних пор полученные образцы подвергали рентгеновскому контролю. В результате были определены режимы роботизированной гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом, позволяющие получать качественные сварные соединения (таблица).

При импульсно-дуговой сварке плавящимся электродом сварочный ток прямо пропорционален скорости подачи электродной проволоки. Это вызывает в некоторых случаях необходимость выполнения разделки кромок с целью размещения расплавленного электродного металла. При гибридной плазменно-дуговой сварке плавящимся электродом с коаксиальной подачей электродной проволоки за счет подбора соотношения между

энергией сжатой дуги неплавящегося электрода и энергией дуги с плавящимся электродом можно уменьшать скорость подачи электродной проволоки до значений, необходимых для формирования геометрии проплава и выпуклости шва согласно требований нормативных документов. При применении разработанной технологии нет необходимости в разделке кромок швов для сварки конструкций из сталей и алюминиевых сплавов с толщиной стенок 5...12 мм. Кроме того, как показало сравнение получаемых результатов с результатами дуговой сварки плавящимся электродом, ширина швов и усиление при гибридной плазменно-дуговой сварке уменьшается до 40 %.

Еще одним результатом сравнения роботизированного гибридного плазменно-дугового процесса с процессами плазменной и MIG/MAG сварки является определение возможности повышения скорости сварки на 25...40 %. При этом за счет повышения скорости сварки и уменьшения количества наплавленного электродного металла снижается уровень продольных и поперечных деформаций. Так для сплава 1561 при одних и тех же значени-



ях скорости сварки уровень продольного прогиба образца при гибридной плазменно-дуговой сварке уменьшается в 3 раза по сравнению с образцом, выполненным импульсно-дуговой сваркой плавящимся электродом.

### Выводы

1. На основании результатов, полученных при моделировании процесса гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом с коаксиальной подачей электродной проволоки, создано оборудование и разработаны базовые технологические процессы для роботизированной сварки конструкций из сталей и алюминиевых сплавов с толщиной стенки 5...12 мм.

2. Разработанная система управления комплексом позволяет синхронизировать функционирование двух сварочных источников и вспомогательного оборудования с действиями антропоморфного промышленного робота для реализации процесса гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом.

3. Применение созданного роботизированного комплекса гибридной плазменно-дуговой сварки и разработанного процесса сварки сталей и алюминиевых сплавов толщиной 5...12 мм позволяет повысить скорость сварки на 25...40 % по сравнению с импульсно-дуговой сваркой плавящимся электродом, уменьшить на 40 % количество электродной проволоки, необходимой для формирования сварного соединения согласно нормативным документам, а также снизить уровень остаточных сварочных деформаций сваренных изделий.

*Работа выполнена при поддержке программы Государственного управления иностранных экспертов № WQ20124400119 «1000 талантов» (КНР), Инновационной исследовательской команды провинции Гуандун (КНР) № 201101C0104901263, Проекта Академии наук провинции Гуандун (КНР) «Capacity – building of innovation – driven development for special fund projects» 2017GDASCX-0411; Проектов провинции Гуандун (КНР) № 2015A050502039 и № 2016B050501002.*

### Список литературы

1. Схиртладзе А. Г., Бочкарев С. В., Лыков А. Н., Борискин В. П. (2013) *Автоматизация технологических процессов*. Москва, ООО «ТНТ».
2. Водовозов В. М., Мядзель В. Н., Рассудов Л. Н. (1986) *Работы в судокорпусных производствах (Управление, обучение, алгоритмизация)*. Москва, Судостроение.
3. Овчинников В. В. (2012) *Оборудование, механизация и автоматизация сварочных процессов. Практикум*. Москва, Академия.
4. Essers W. G., Jelmorini G. (1975) *Method of plasma-MIG-welding*. U.S. Philips Corporation, New York, NY, USA, Пат. US3891824.

5. Essers W. G., Liefkens A. C. (1972) Plasma-MIG welding developed by Philips. *Machinery and Production Engineering*, **12**, 632–633.
6. Essers W. G., Willemes G. A. (1984) *Plasma-MIG – schweißen von Aluminium auftragschweißen und Zweielektadenschweißen, von autahl*. DVS-Berichte, **90**, 9–14.
7. Дедюх Р. И. (2014) Особенности процесса плазменной сварки плавящимся электродом (Обзор). *Сварочное производство*, **5**, 34–39.
8. Tao Yang, Hongming Gao, Shenghu Zhang et al. (2013) The study on plasma-MIG hybrid arc behaviour and droplet transfer for mild steel welding. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, **33**, 459–464.
9. Sydorets V. N., Zhernosekov A. M. (2004) Numerical simulation of the system of power source–consumable-electrode arc. *The Paton Welding J.*, **12**, 9–15.
10. Korzhyk V., Grynuik A., Khaskin V., Babych O. (2016) The Hybrid Plasma-Arc Welding of Thin-Walled Panels Made of Aluminum Alloy. *First Independent Sci. J.*, **12-13**, 28–36.
11. Ton H. (1975) Physical Properties of the Plasma-MIG Welding Arc. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, **8**, 922–933.
12. Hertel M., Füssel U., Schnick M. (2014) Numerical Simulation of the Plasma-MIG Process – Interactions of the Arcs, Droplet Detachment and Weld Pool Formation. *Welding in the World*, **58**, 85–92.
13. Yang T., Xu K., Liu Y. et al. (2013) Analysis on Arc Characteristics of Plasma-MIG Hybrid Arc Welding. *Trans. of the China Welding Ins.*, **34(5)**, 62–66.
14. Kornienko A. N., Makarenko N. A., Granovskij A. V., Kondrashov K. (2001) A Universal Source for Plasma-MIG Surfacing and Welding. *Svarochnoe proizvodstvo*, **9**, 25–26.
15. Oliveira M. A. de., Dutra J. C. (2007) Electrical Model for the Plasma-MIG Hybrid Welding Process. *Welding & Cutting*, **6(6)**, 324–328.
16. Pentegov I. V., Sydorets V. N. (1990) Energy Parameters in a Mathematical Model of a Dynamic Welding Arc. *Welding International*, **4(4)**, 272–275.
17. Pentegov I. V., Sydorets V. N. (2015) Comparative Analysis of Models of Dynamic Welding Arc. *The Paton Welding J.*, **12**, 45–48.
18. Pentegov I. V., Sydorets V. N. (1991) Quasistatic and Dynamic Volt-Ampere Characteristics and Time Constant of Blown and Moving Arcs. *The Paton Welding J.*, **3**, 361–364.
19. Gao H.-M., Bai Y., Wu L. (2008) Comparison between Plasma-MIG and MIG Procedures on 5A06 Aluminum Alloy. *Mat. Sci. Forum*, **575-578**, 1382–1388.
20. Matthes K.-J., Kohler T. (2002) Electrical Effects and Influencing Quantities in the Case of the Hybrid Plasma-MIG Welding Process. *Welding & Cutting*, **2**, 87–90.

В. М. Коржик<sup>1,2</sup>, В. М. Сидорець<sup>1,2</sup>,  
Шангуо Хан<sup>1</sup>,  
О. А. Бабіч<sup>1,2</sup>, А. А. Гринюк<sup>2,3</sup>, В. Ю. Хаскін<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Гуандунський Інститут зварювання  
(Китайсько-український інститут зварювання  
ім. С. О. Патона). 510650, Китай, Гуанчжоу,  
Тяньхе, вул. Чапкінг, 363.

<sup>2</sup>ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.  
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>3</sup>НТУУ «КПІ ім. Ігора Сікорського».  
03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

### СТВОРЕННЯ РОБОТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ГІБРИДНОГО ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Метою даної роботи є створення комплексу обладнання та технології гібридного плазмОВО-ДУГОВОГО зварювання плавким електродом з коаксіальною подачею дроту для конструкцій



цій із сталей і алюмінієвих сплавів товщиною 5...12 мм з використанням промислових роботів. Математичне моделювання процесів в дузі при гібридному плазмово-дуговому зварюванні стало основою вибору параметрів режиму зварювання з урахуванням взаємного впливу стовпа стислої дуги, що не плавиться і дуги з плавким електродом, дозволила сформулювати технічні вимоги до джерел живлення зварювального струму. На підставі математичного і фізичного моделювання процесу гібридного зварювання створений комплекс обладнання і базові технологічні процеси для роботизованого зварювання тонкостінних конструкцій із сталей і алюмінієвих сплавів. Розроблена система управління комплексом дозволила синхронізувати функціонування двох зварювальних джерел і допоміжного обладнання із застосуванням антропо-

морфного промислового робота для реалізації сталого процесу гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом. Застосування даного процесу зварювання дозволило зменшити витрату електродного металу на 40 % в порівнянні з імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом при порівнянних швидкостях. При цьому рівень поздовжніх прогинів зварних зразків при використанні гібридного процесу був у 3 рази меншим в порівнянні з процесом зварювання імпульсною дугою з плавким електродом. Бібліогр. 20, табл. 1, рис. 10.

*Ключові слова:* роботизований комплекс, плазма, дуга з плавким електродом, гібридний процес, сплави алюмінія, сталі, режими зварювання, якість з'єднань

Поступила в редакцию 11.05.2017

## ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

**Е. В. Кудинова (Приазовский государственный технический университет)** защитила в специализированном совете НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского» 19 декабря 2016 г. кандидатскую диссертацию на тему «Синтез ультрадисперсных модифицированных слоев на твердых сплавах плазменной обработкой».

В диссертации разработана математическая модель оптимального управления процессом плазменного поверхностного модифицирования твердосплавного инструмента и инженерная методика расчета оптимальных режимов обработки, основанная на решении уравнения теплопроводности, которая позволяет решать как прямую задачу — вычисление  $T_{\text{тах}}$  и  $W$  при заданных условиях обработки, так и обратную задачу — вычисление требуемых (оптимальных) режимов плазменной обработки ( $I$ ,  $q$ ,  $V$ ). С использованием разработанной математической модели выполнены расчеты параметров термического цикла плазменного нагрева твердосплавных пластин. Исследованы механизмы структурных преобразований в инструментальных твердых сплавах при плазменном поверхностном модифицировании. Выявлены закономерности структурных превращений в твердых сплавах при нагреве высококонцентрированной плазменной струей. Установлено, что максимальный эффект упрочнения для сплавов типа ТК и ВК ( $HV \sim 1700$ ) достигается при плазменной обработке без оплавления композиции с превращениями в карбидах и связке. Разработана методика испытаний и исследованы тре-

щиностойкость, механизмы разрушения и износа инструментальных твердых сплавов с поверхностным модифицированным слоем. Установлено, что плазменное модифицирование приводит к повышению трещиностойкости твердых сплавов на 20 % в сравнении с исходным состоянием, дополнительным фактором повышения трещиностойкости модифицированных твердых сплавов является рассеяние энергии разрушения благодаря образованию мезоструктурных ансамблей. Разработано технологическое оборудование для проведения плазменной обработки, позволяющее осуществлять закрепление твердосплавных пластин разной формы, осуществление обработки под разным углом наклона и на разной удаленности от источника нагрева. Разработаны технологические процессы плазменного модифицирования режущего инструмента из твердых сплавов. Разработана структурная схема синтеза модифицированных слоев на твердосплавном инструменте после плазменного модифицирования. Разработаны рекомендации по выбору оптимального размещения модифицированной зоны на твердосплавных пластинах. Проведены стойкостные исследования твердосплавных пластин после плазменного модифицирования. Установлено, что после плазменного модифицирования стойкость твердосплавного инструмента повышается в 2,5...3,0 раза. Металлографические исследования материала режущей кромки после резания показали, что износ становится более равномерным, уменьшается количество микросколов и выкрашиваний.

## МОНІТОРИНГ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ДУГОВОГО РОБОТИЗОВАНОГО ЗВАРЮВАННЯ

І. О. СКАЧКОВ

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, просп. Перемоги, 37. E-mail: i.skachkov@kpi.ua

В умовах роботизованого зварювання важливим є забезпечення безперервного моніторингу виготовлення зварної конструкції. Стосовно до процесів МІГ/МАГ зварювання перевагу слід віддавати контролю за електричними параметрами дуги, які узагальнюють умови протікання технологічного процесу протягом 1 с. Комплексна оцінка електричних параметрів може бути здійснена на площині «струм дуги–напруга на дузі». Висновки про наявність збурень слід проводити за допомогою коефіцієнтів вейвлет-розкладання Хаара. Бібліогр. 5, табл. 1, рис. 2.

*Ключові слова:* зварювання плавким електродом в захисних газах, роботизація, моніторинг якості, двомірні вейвлет-перетворення Хаара

Забезпечення якості зварного з'єднання у виробничих умовах зводиться переважно до стабілізації умов виробництва у всіх аспектах. Це потребує суворого контролю технології, стану обладнання, забезпечення відповідної кваліфікації персоналу. Роботизація сприяє виконанню зазначених умов і, водночас, потребує їх суворого виконання. Однак навіть при суворому дотриманні всіх вимог забезпечення якості потребує застосування контролю технологічного процесу і випробувань готової продукції. Найбільш поширеними методами підтвердження відповідності якості продукції, як правило, є статистично обґрунтовані плани вибіркового контролю за адекватними щодо обраних груп дефектів методикам [1]. Стосовно зварювання всі відомі методи контролю якості з'єднання мають обмежену сферу застосування, тобто здатні виявляти лише певні групи дефектів.

За впливом на матеріал або виріб ці способи контролю якості групуються на два класи: методи руйнівного і неруйнівного контролю. Очевидно, що методи руйнівного контролю застосовуються тільки вибірково і можуть дати лише оцінку якості виробів, які йдуть в експлуатацію з певною ймовірністю. Всі прийняті до застосування в промисловості методи неруйнівного контролю зварних з'єднань спрямовані на виявлення певних дефектів, що призводять до порушення вимог щодо суцільності, геометричних розмірів, фізико-механічних або фізико-хімічних властивостей як шва, так і біляшовної зони. З технічних і економічних причин методи неруйнівного контролю найчастіше також застосовуються вибірково і, отже, можуть дати лише вірогідну оцінку якості виробів.

Це обумовлює необхідність моніторингу процесу виготовлення зварної конструкції, що вклю-

чає як перевірку якості готового або проміжного продукту методами руйнівного і неруйнівного контролю, так і контроль відповідності параметрів технологічного процесу заданим.

Підготовка виробництва при роботизованому зварюванні спрямована, поряд з вирішенням інших задач, на створення умов, що забезпечують стабільність умов зварювання. Однак це не може повністю виключити утворення різноманітних дефектів формування та металургійних дефектів, що виникають через низку енергетичних, кінематичних та технологічних збурень, спричинених як випадковими зовнішніми чинниками на кшталт зміни напруги живильної мережі, так і виходом з ладу устаткування. В останньому випадку можливе забруднення зварюваних поверхонь мастилом, порушення газового захисту, тощо. Деякі технологічні збурення, як правило, мають місце через технічні і економічні обмеження на підвищення точності підготовки деталей під зварювання. Виміряти або хоча б оцінити рівень збурень при роботизованому зварюванні часто неможливо з технічних або економічних причин. Це стосується, в першу чергу, таких чинників як порушення газового захисту, зміни зазору або перевищення кромки, наявність забруднень на поверхні деталей. Однак такі невідповідності умов перебігу зварювання можуть чинити істотний вплив на формування з'єднання. При роботизованому зварюванні контроль якості з'єднання здійснюється тільки на певних етапах технологічного процесу виготовлення конструкції. Тому невідповідності перебігу зварювання можуть призводити до суттєвих матеріальних витрат.

Традиційно моніторинг технологічного процесу за параметрами режиму здійснюють шляхом реєстрації їх відхилень від заданих значень. Кількість параметрів визначається способом зварювання і можливістю вимірювання контролюва-

них параметрів при зварюванні конкретного виробу. Контролю підлягає деяка узагальнена оцінка параметра — середнє чи середньоквадратичне значення.

За великої кількості контрольованих параметрів виникає проблема комплексної їх оцінки. Поєднання значень значної кількості параметрів, які перебувають в межах встановлених допусків, може іноді привести до дефекту внаслідок несприятливого їх поєднання. Зменшення допусків при цьому може призвести до визнання невідповідною деякої частки якісної продукції.

Найбільш прийнятним і фізично обґрунтованим методом безперервного моніторингу якості зварних з'єднань, отриманих електричним зварюванням, є аналіз енергетичних параметрів зварювального процесу [2]. Наявність природних зворотних зв'язків між джерелом нагріву і з'єднанням, що формується, робить принципово можливим оцінити процес формування з'єднання за електричними параметрами джерела нагріву. Природна мінливість процесу формування веде до появи стохастичної компоненти в електричних параметрах джерела нагріву. Для різних способів зварювання стохастична складова по-різному відображає процес формування з'єднання. Так, для зварювання МАГ/МІГ наявність збурень призводить до зміни рухливості електродної плями на поверхні ванни і порушення вісесиметричності сил, що діють на краплю електродного металу, тобто на перенос електродного металу. Це впливає на миттєві значення струму і напруги на дусі та вносить певні стохастичні складові в осцилограми. Таким чином, основна ідея моніторингу полягає в порівнянні деякого ідеального образу стохастичного процесу з поточним.

Дослідження проводились при зварюванні тонколистової сталі плавким електродом ER-49-1 (Св-08Г2С) діаметром 0,8 мм в середовищі суміші МІХ1 (82%Ar+18%CO<sub>2</sub>) струм 80 А. Досліджувались зміни електричних параметрів дуги під дією збурень.

Запис електричних параметрів дуги під час зварювання здійснювали вимірювальною системою, що містила персональний комп'ютер, датчики струму LA-305S/SP1 і напруги LV-25P на основі ефекту Холла, аналого-цифровий перетворювач Е-140 та персональний комп'ютер зі встановленою на нього програмою L-graph. Частота аналого-цифрового перетворення складала 10 кГц на кожен канал.

Процес зварювання плавким електродом в захисних газах можна розділити на низку подібних циклів плавлення і переносу електродного металу. Через наявність великої кількості різноманітних збурень електричні параметри кожного циклу

мають певні, часто значні, відмінності від інших. Таким чином, оцінка процесу має бути статистичною, а висновки про наявність суттєвих збурень процесу або утворення дефектів — ймовірнісними.

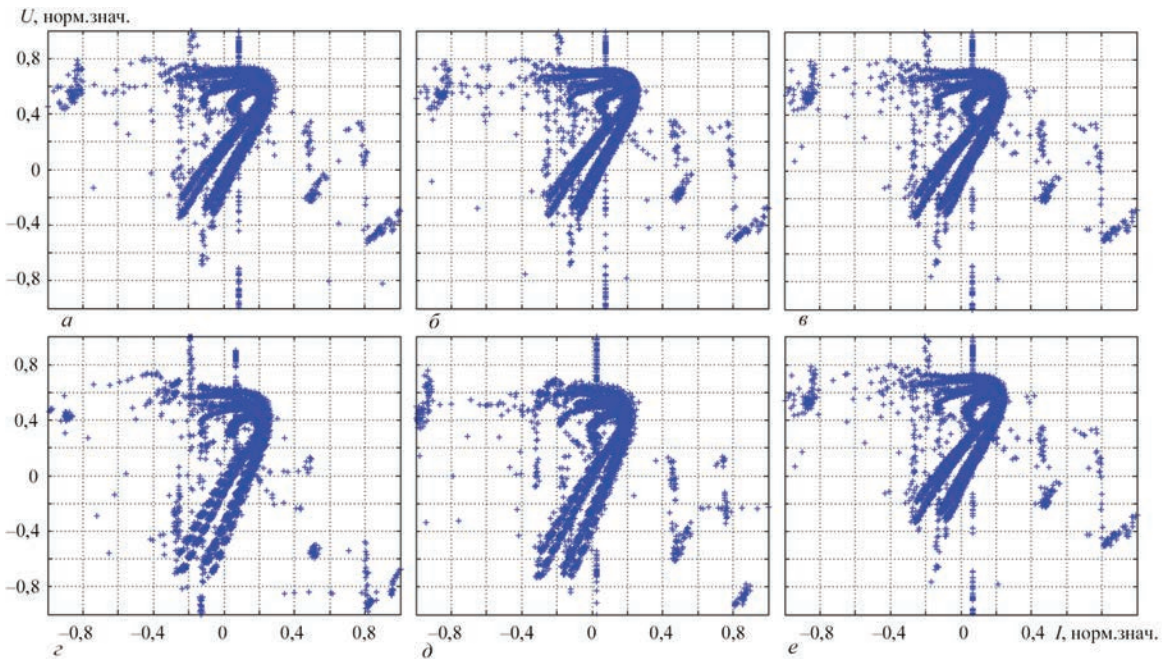
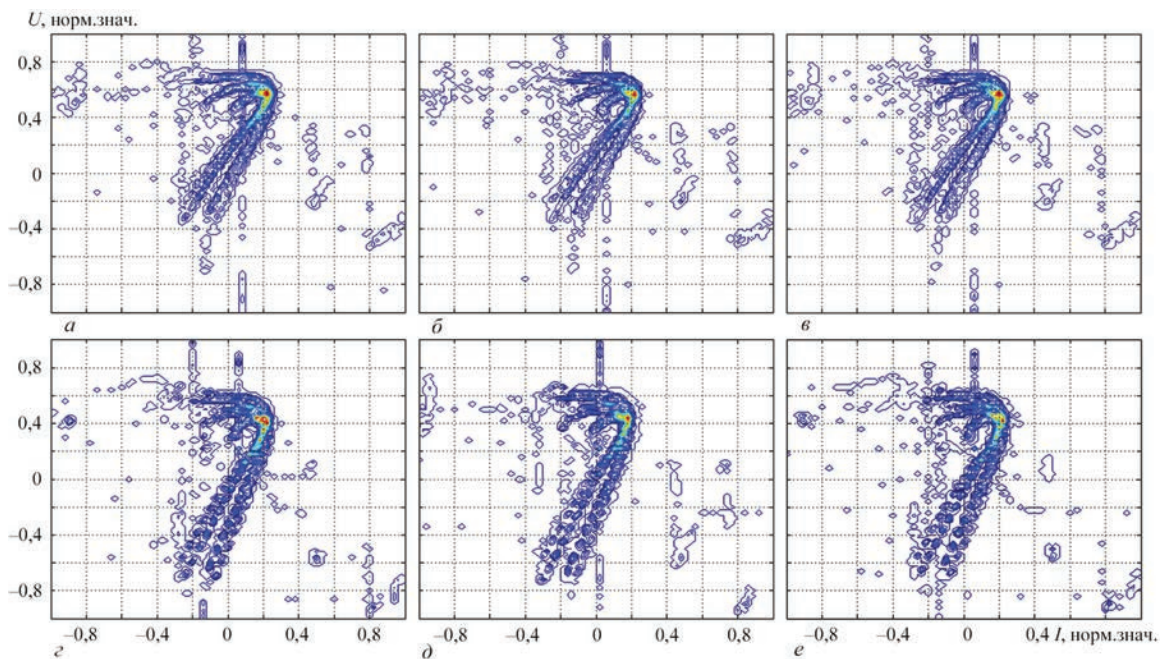
Попередня підготовка даних полягала у вилученні з отриманих осцилограм помилкових значень, обумовлених електромагнітними перешкодами. Такі помилкові значення поодинокі, мають значну амплітуду і трапляються доволі рідко — одне-два на 30...50 тис. вимірів. Це дозволяє замінити їх на середнє значення за вибіркою без втрати статистичної достовірності. Для того, щоб уникнути при аналізі впливу масштабного фактора оцінку процесу зварювання проводили за нормованими до діапазону  $[-1, 1]$  осцилограмами струму і напруги.

Стабільність горіння дуги на протязі зварювання шва оцінювалась за щільністю розташування точок на графіку залежності напруги від струму (рис. 1), отриманого з осцилограм струму та напруги. За стабільності процесу точки на графіку повинні чітко лягати одна на одну, утворюючи хоч лінію складної траєкторії. Однак стохастичний характер процесу перенесення електродного металу, обумовлений випадковими діями різної природи і інтенсивності, призводить до розмиття графіку. Для аналізу доцільно оцінювати перебіг процесу за період часу, що не достатній для утворення дефектів з'єднання, але не надто великий для «поглинання» впливу збурення через усереднення за вибіркою. Для шва, звареного без дії збурень, графіки (рис. 1, а–в) для інтервалів часу 10...11 с, 20...21 та 30...31 перебігу процесу мають стаціонарну стохастичну складову, тобто процес можна вважати ергодичним. Внесення збурення при зварюванні (забруднення зразків мастилом) призводить до зміни форми графіків з явним підвищенням стохастичної складової (рис. 1, г–е). За наявності збурень розкид точок не тільки збільшився, але і сам стохастичний процес стає неергодичним.

Для визначення кількісної оцінки ступеню стохастичності процесу доцільно обчислити щільність розташування точок на рис. 1 на площині «струм–напруга» (рис. 2).

Можна бачити, що таке представлення дозволяє здійснити редукцію даних. При розбитті площини «струм–напруга» на квадрати  $0,01 \times 0,01$  кількість даних для аналізу перебігу процесу на протязі 1 с зменшується в 10000 разів. Отриману таким чином матрицю цілих чисел можна аналізувати як цифрове зображення. Головним завданням обробки є знаходження ефективного представлення, яке дозволяє представити зображення в компактній формі. У сучасній теорії і практиці обробки широко застосовують вейвлет-перетворення [3–5].



Рис. 1. Нормовані графіки «струм–напруга» процесу зварювання (описання *a–e* див. у тексті)Рис. 2. Щільність розташування точок на графіках «струм–напруга» (*a–e* див. рис. 1)

На практиці найчастіше застосовують вейвлети, що визначаються як функції однієї дійсної змінної. Для аналізу зображень застосовують двовимірне дискретне вейвлет-перетворення, що ґрунтується на одновимірному вейвлет-перетворенні і не залежить від числа стовпців і рядків зображення. Тому перевагу має горизонтальний і вертикальний напрямки. Для обробки дискретних одновимірних і двовимірних сигналів добре зарекомендували себе вейвлети Хаара. Перетворення Хаара не потребує складних обчислень і є роздільним.

Суттєвою відмінністю задач традиційного аналізу зображень від задач, що вимагає моніторинг перебігу технологічного процесу,

#### Деталізуючі коефіцієнти вейвлет-розкладання Хаара

Деталізуючі коефіцієнти 6 рівня		Графік
–25,5787037037037	0,810185185185186	Рис. 1, <i>a</i>
–67,4479166666667	0,192901234567901	
–45,1976102941177	0,0574448529411765	Рис. 1, <i>г</i>
–59,2026654411765	0,0114889705882353	
–27,1956699346405	0,714869281045752	Рис. 1, <i>б</i>
–71,5788398692811	0,224673202614379	
–40,5063291139241	1,84928797468355	Рис. 1, <i>д</i>
–52,7986550632912	0	
–22,8591160220995	0,656077348066299	Рис. 1, <i>в</i>
–59,4872237569061	0,129488950276243	
–39,6990740740741	0,578703703703704	Рис. 1, <i>е</i>
–52,8549382716050	0,0385802469135803	

є потреба у оцінці рівня шумів, а не їх придушення. На практиці це означає, що необхідно оцінити значення лише деталізуючих коефіцієнтів вейвлет-перетворення.

Для матриці з розмірами 100x100 можливе розкладання Хаара до 7 рівня. Однак відмінності між набором деталізуючих коефіцієнтів починають проявлятися тільки на 6 рівні (4 коефіцієнти). Підвищення рівня до другого дозволяє виявити більше відмінностей між графіками, але і збільшує кількість коефіцієнтів для аналізу (26x26) (таблиця).

Автоматизація аналізу можлива із застосуванням методів штучного інтелекту на основі штучних нейронних мереж.

### Висновки

1. Моніторинг відповідності технологічного процесу зварювання МІГ/МАГ доцільно проводити за електричними параметрами дуги.

2. Моніторинг необхідно здійснювати за даними, що узагальнюють умови перебігу технологічного процесу за 1 с.

3. Для зменшення часу обробки інформації без її втрати доцільно проводити комплексну оцінку електричних параметрів дуги на площині «струм дуги–напруга на дузі».

4. Висновки про наявність збурень доцільно проводити за деталізуючими коефіцієнтами вейвлет-розкладання Хаара.

### Список літератури

1. Тараричкін І. О. (2002) *Статистичні методи забезпечення якості продукції зварювального виробництва*. Луганськ, СХУ ім. В. Даля.
2. Li X. R., Shao Z., Zhang Y. M., Kvidahl L. (2013) Monitoring and Control of Penetration in GTAW and Pipe Welding. *Welding Journal*, 6, 90–196.
3. Gonzalez R. C, Woods R. E. (2001) *Digital image processing*. Boston: Addison Wesley.
4. Pratt W. K. (2001) *Digital image processing*. N. Y.: Wiley Intersci.
5. Чуи Ч. (2001) *Введение в вейвлеты*. Москва, Мир.

И. А. Скачков

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сикорського».  
03056, г. Киев, пр. Победы, 37  
E-mail: i.skachkov@kpi.ua

### МОНИТОРИНГ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДУГОВОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ

В условиях роботизированной сварки важным является обеспечение непрерывного мониторинга изготовления сварной конструкции. Применительно к процессам МИГ/МАГ сварки предпочтение следует отдавать контролю за электрическими параметрами дуги, которые обобщают условия протекания технологического процесса в течение 1 с. Комплексная оценка электрических параметров может быть осуществлена на плоскости «ток дуги–напряжение на дуге». Выводы о наличии возмущений следует проводить с помощью коэффициентов вейвлет-разложения Хаара. Библиогр. 5, табл. 1, рис. 2.

*Ключевые слова:* сварка плавящимся электродом в защитных газах, роботизация, мониторинг качества, двухмерные вейвлет-преобразования Хаара

Надійшла до редакції 25.04.2017

### НОВАЯ КНИГА

«Титан. Технологии. Оборудование. Производство». – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2017. – 254 с. Выпуск четвертый.

Сборник включает более сорока статей, опубликованных в основном в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за период 2014–2016 гг. по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. Тематика статей посвящена созданию новых технологических процессов, оборудования и материалов при производстве и сварке титана и его сплавов. Представлены обзоры по аддитивному производству и сварке титановых сплавов. Приведены направления деятельности НТЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины по промышленному производству слитков титановых сплавов и созданию новых сплавов на основе титана. Сборник предназначен для инженеров, технологов, конструкторов, занятых в машиностроении, энергетике, строительстве, судостроении, металлургии и других отраслях промышленного производства, связанных с обработкой и потреблением титана; полезен также преподавателям и студентам высших учебных заведений. Предыдущие три выпуска сборника «Титан. Технологии. Оборудование. Производство», включающие статьи из журналов «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за периоды 2001–2004, 2005–2010, 2011–2013 гг. находятся в открытом доступе на сайте Издательского Дома «Патон»: [www.patonpublishinghouse.com/rus/compilations](http://patonpublishinghouse.com/rus/compilations).



Заказы на сборник просьба направлять в редакцию журнала «Автоматическая сварка».



## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СТЫКОВОЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ ОПЛАВЛЕНИЕМ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЫКОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

П. М. РУДЕНКО, В. С. ГАВРИШ, С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, А. В. ДИДКОВСКИЙ, Е. В. АНТИПИН

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

Проведен анализ основных параметров стыковой контактной сварки оплавлением по данным текущих технологических рапортов, формируемых компьютерной системой управления при сварке железнодорожных рельсов. Показана возможность разработки модели предсказания выходного показателя качества сварного стыка железнодорожного рельса — разрушающей нагрузки образца и стрелы прогиба — по параметрам процесса сварки различными методами статистического анализа, в частности, корреляционным и регрессионным анализом и нейронными сетями. Расчеты проводились по экспериментальным данным, полученным на Киевском рельсосварочном предприятии при сварке рельсов на сварочной машине K1000. Библиогр. 6, табл. 2, рис. 5.

*Ключевые слова:* контактная стыковая сварка оплавлением, статистические модели контроля и управления, контроль параметров процесса, статистическое управление

При сварке железнодорожных рельсов на стационарных и подвесных контактных машинах осуществляется контроль технологических параметров режима с регистрацией их компьютерной системой для каждого сварного стыка. Одновременно осуществляется УЗ контроль этих стыков. Периодически проводятся механические испытания сварных рельсов и выдается заключение о соответствии данного технологического режима требуемому качеству сварки. Контроль процесса осуществляется за счет проверки наличия параметров режима в допусках, установленных техническими условиями (ТУ) [1].

В настоящее время компьютерными системами контроля оснащены стационарные и передвижные рельсосварочные машины нового поколения типа K1000, K920, K922. Схемы управления машин построены на основе промышленных контроллеров SIEMENS. Современная элементная база позволила воспроизводить с высокой точностью значения параметров режима, регламентированы ТУ на сварку железнодорожных рельсов. Однако даже в этом случае нельзя исключить возможность появления дефектов в сварных соединениях, если под действием случайных внешних факторов изменилась зона разогрева, пластическая деформация или стабильность оплавления. В производственных условиях возникают различные технологические и электрические возмущения, которые приводят к нарушению стабильности процесса и к ухудшению качества сварки. Необходимы исследования новых параметров и алгоритмов управ-

ления, повышающие вероятность прогнозирования качества сварных соединений.

Целью настоящей работы является разработка алгоритмов контроля для системы управления процессом сварки оплавлением в стационарных и полевых условиях, обеспечивающих контроль качества стыков по параметрам процесса и контроль технического состояния сварочного оборудования. Эти алгоритмы воплощаются в двухуровневую систему контроля и управления. Такая система, кроме прямого цифрового управления сварочным процессом и контроля параметров процесса по допускам выполняет следующие функции:

- прогнозирование качества сварного стыка по параметрам процесса и повышения достоверности его за счет применения более совершенных алгоритмов и привлечения к прогнозированию квалифицированных специалистов;

- контроль технического состояния сварочного оборудования, систематизация видов износа узлов сварочного оборудования, разделение их на общие для всех машин данного типа и частные для конкретных машин, выработки рекомендаций и планирования технического обслуживания сварочного оборудования;

- обнаружение и распознавание аварийных ситуаций (недопустимых отклонений параметров процесса сварки, технического состояния оборудования, выполнение вспомогательных технологических операций, данных механических испытаний, недопустимого отклонения напряжения,



охлаждения и т. д.) для немедленного вмешательства в технологический процесс;

- систематизация отклонений параметров процесса сварки, которые могут приводить к ухудшению показателей качества сварных соединений, разработка рекомендаций по корректировке параметров режима сварки;

- косвенный контроль по ходу процесса сварки отклонений в выполнении вспомогательных технологических операций (подготовки торцов к сварке), в состоянии вспомогательных объектов (трансформаторной подстанции, оборудование подготовки торцов).

Алгоритмы контроля основаны на анализе параметров процесса сварки, которые отображаются в технологическом рапорте компьютерной системы управления. Пример рапорта приведен ниже:  $v_{оп}$  — 0,108 мм/с;  $S$  — 26,1 мм;  $T$  — 67 с;  $U_1$  — 412 В;  $U_2$  — 320 В;  $I$  — 359 А;  $v_{ф}$  — 1 мм/с;  $P_a$  — 136 атм;  $L_{ос}$  — 15,5 мм;  $T_{ocl}$  — 1,4 с;  $Z_{к.з}$  — 104,5 мкОм;  $Q$  — 2271 Вт·ч;  $v_{ос}$  — 68 мм/с;  $P_p$  — 2400 кН;  $L_{пр}$  — 48 мм.

При этом  $v_{оп}$  — скорость оплавления;  $S$  — припуск на оплавление;  $T$  — длительность сварки;  $U_1$  — напряжение на 1-ом этапе;  $U_2$  — напряжение на 2-ом этапе;  $I$  — ток сварки;  $v_{ф}$  — скорость форсировки;  $P_a$  — давление;  $L_{ос}$  — припуск на осадку;  $T_{ocl}$  — длительность осадки;  $Z_{к.з}$  — сопротивление короткого замыкания контура машины;  $Q$  — общая энергия;  $v_{ос}$  — скорость осадки;  $P_p$  — разрушающая нагрузка;  $L_{пр}$  — стрела прогиба.

Целью исследований была проверка возможности разработки модели предсказания выходного показателя качества сварного стыка железнодорожного рельса — разрушающей нагрузки образца и стрелы прогиба — по параметрам процесса сварки различными методами статистического анализа, в частности, корреляционным и регрессионным анализом и нейронными сетями. Конструктивная прочность сварных рельсов определяется при проведении испытаний на статический поперечный изгиб. При этом регистрируется величина разрушающей нагрузки  $P_p$  и стрела прогиба рельса  $L_{пр}$  под действием этой нагрузки. Допустимые значения этих величин регламентируются ТУ. Эксперименты проводились на Киевском рельсосварочном предприятии на сварочной машине К1000. Данные параметров процесса (162 набора) измерялись и контролировались системой контроля и управления сварочной машиной. Все дальнейшие исследования проводились с помощью программ Excell 2010 (Microsoft) и Statistica v.10 (StatSoft, Dell) [2].

Каждый из контролируемых параметров определяет ход процесса на отдельных этапах: 1 — сплавления косины ( $U_1$ ); 2 — оплавления ( $U_2$ ,  $I$ ,

$v_{оп}$ ,  $Q$ ); 3 — форсирования ( $v_{ф}$ ,  $T_{к.з}$ ); 4 — осадка ( $v_{ос}$ ,  $L_{ос}$ ,  $P_a$ ,  $T_{ocl}$ ).

Параметр  $S$  характеризует процесс до осадки (1, 2, 3 этапы),  $T$  характеризует процесс за время сварки (1, 2, 3, 4);  $Z_{к.з}$  — техническое состояние сварочной машины.

Для управления процессом задание каждого этапа осуществляется по величине перемещения подвижной колонны, т.е. при достижении заданного  $S$  (типовой режим для машин К920 и К1000). Таким образом, параметр  $S$ , а также  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $L_{ос}$ ,  $P_a$ ,  $T_{ocl}$  стабилизируются системой управления. Другие параметры:  $I$ ,  $v_{оп}$ ,  $Q$ ,  $v_{ф}$ ,  $T_{к.з}$ ,  $v_{ос}$ ,  $Z_{к.з}$ ,  $T$  определяются условиями прохождения процесса (имеющимися возмущениями, техническим состоянием сварочного оборудования, квалификацией сварщика и вспомогательных рабочих).

Если какой-то параметр имеет постоянное значение, его бессмысленно вводить в модель [3, 4]. Однако все перечисленные параметры кроме  $T_{к.з}$  имеют рассеивание от  $\pm 8$  до  $\pm 100$  % и целесообразны для изучения.

Отклонение параметров процесса ( $\pm$ ), в исследуемых экспериментах:  $v_{оп}$  — 99 мм/с;  $S$  — 17 мм;  $T$  — 68 с;  $U_1$  — 8 В;  $U_2$  — 8 В;  $I$  — 41 А;  $v_{ф}$  — 67 мм/с;  $P_a$  — 9 атм;  $L_{ос}$  — 14 мм;  $T_{ocl}$  — 56 с;  $Z_{к.з}$  — 9 мкОм;  $Q$  — 49 Вт·ч;  $v_{ос}$  — 79 мм/с;  $P_p$  — 38 кН;  $L_{пр}$  — 39 мм.

Из данных корреляционного анализа (табл. 1) наибольшая связь с выходом — разрушающей нагрузкой  $P_p$  имеют следующие параметры в порядке убывания (рис. 1):  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $I$ ,  $L_{ос}$ ,  $S$ ,  $v_{оп}$ ,  $T_{ocl}$ ,  $P_a$ ,  $v_{ос}$ ,  $Z_{к.з}$ ,  $Q$ ,  $T$ ,  $v_{ф}$ . Из них два последних ниже оценки по Стьюденту (0,159) и 6 ниже по Чеддоку (0,3). Для оценки силы связи в теории корреляции применяется шкала английского статистика Чеддока: слабая — от 0,1 до 0,3; умеренная — от 0,3 до 0,5; заметная — от 0,5 до 0,7; высокая — от 0,7 до 0,9; весьма высокая (сильная) — от 0,9 до 1,0.

Из коэффициентов взаимной корреляции между параметрами следует:

- высокая связь (0,7...0,9) между  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $I$ ,  $L_{ос}$ ,  $S$ ;

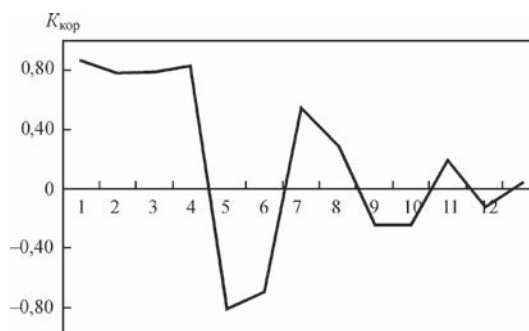


Рис. 1. Коэффициенты корреляции параметров процесса с величиной разрушающей нагрузки образца по убыванию: 1 —  $U_1$ ; 2 —  $U_2$ ; 3 —  $I$ ; 4 —  $L_{ос}$ ; 5 —  $S$ ; 6 —  $v_{оп}$ ; 7 —  $T_{ocl}$ ; 8 —  $P_a$ ; 9 —  $v_{ос}$ ; 10 —  $Z_{к.з}$ ; 11 —  $Q$ ; 12 —  $T$ ; 13 —  $v_{ф}$

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между параметрами процесса сварки

$v_{оп}$	$S$	$T$	$U_1$	$U_2$	$I$	$v_{ф}$	$P_a$	$L_{oc}$	$T_{ocl}$	$Z_{к.з}$	$Q$	$v_{oc}$	$P_p$	$L_{пр}$	
1,00	0,67	-0,34	-0,78	-0,67	-0,70	-0,14	0,00	-0,82	-0,45	0,12	-0,64	0,15	-0,69	-0,46	$v_{оп}$
	1,00	0,30	-0,89	-0,82	-0,88	0,13	-0,46	-0,74	-0,38	0,37	-0,05	0,35	-0,81	-0,54	$S$
		1,00	-0,09	-0,16	-0,23	0,14	-0,35	0,05	0,03	0,35	0,80	0,17	-0,13	-0,04	$T$
			1,00	0,87	0,83	-0,03	0,32	0,91	0,62	-0,28	0,25	-0,29	0,86	0,59	$U_1$
				1,00	0,74	-0,09	0,32	0,81	0,62	-0,18	0,15	-0,20	0,78	0,47	$U_2$
					1,00	0,07	0,22	0,75	0,33	-0,40	0,27	-0,34	0,79	0,51	$I$
						1,00	-0,49	0,10	0,09	-0,03	0,31	0,07	0,03	0,13	$v_{ф}$
							1,00	0,11	0,17	-0,32	-0,37	-0,13	0,29	0,13	$P_a$
								1,00	0,72	-0,14	0,39	-0,17	0,82	0,58	$L_{oc}$
									1,00	0,10	0,24	0,05	0,55	0,37	$T_{ocl}$
										1,00	0,13	0,22	-0,24	-0,16	$Z$
											1,00	0,01	0,19	0,12	$Q$
												1,00	-0,24	-0,14	$v_{oc}$
													1,00	0,67	$P_p$
														1	$L_{пр}$

– высокая связь  $v_{оп}$  с этой группой кроме  $S$  (0,67) и с  $Q$  (0,64);

–  $Q$  имеет высокую связь с  $T$  (0,8) и среднюю с  $v_{оп}$  (0,64);

– остальные параметры  $T_{ocl}$ ,  $P_a$ ,  $v_{oc}$ ,  $Z_{к.з}$ ,  $T$ ,  $v_{ф}$  имеют связь с другими параметрами ниже средней.

Проверка корреляционных связей параметров второго порядка на этапе оплавления показала, что эти параметры мало изменили картину связи с  $P_p$ .

Анализ данных со стрелой прогиба показывает явно худшую зависимость, что возможно связано с точностью измерения.

С учетом данных теоретических и опытных исследований на первом этапе строили линейную регрессию от параметров:

$$v_{оп}, S, U_2, I, P_a, L_{oc}, Z_{к.з}, v_{oc}.$$

Далее с учетом коэффициентов корреляции были рассчитаны модели с различной комбинацией параметров:

$$\begin{aligned} &v_{оп}, S, U_2, I, P_a, L_{oc}, Z_{к.з}, Q, v_{oc}; \\ &v_{оп}, S, U_2, P_a, L_{oc}; \\ &v_{оп}, S, P_a, L_{oc}; \\ &v_{оп}, S, U_2, I, L_{oc}; \\ &S, L_{oc}. \end{aligned}$$

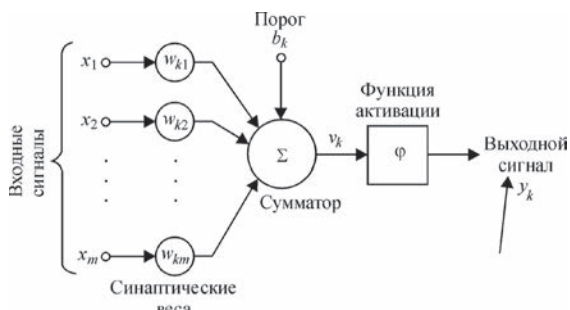


Рис. 2. Структурная схема искусственного нейрона

Все перечисленные модели имеют среднее квадратическое отклонение (С.К.О), равное 73 кН для  $P_p$  и 2,35 мм для  $L_{пр}$ .

**Нейронные сети для моделирования процесса.** Искусственная нейронная сеть — математическая зависимость, моделирующая способ обработки конкретной задачи. Очевидно, что она сильно упрощена и примитивна по сравнению с биологическими нейронами [5, 6].

Имея сигналы или численные их значения на входе сети, однозначно определяется выходной сигнал по формуле (рис. 2):

$$v_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j + b_k, \quad y_k = \phi(v_k).$$

Ошибка прогнозирования по нейронной сети

$$e_k(n) = Y_k(n) - y_k(n),$$

где  $Y_k(n)$  — действительное значение выхода;  $y_k(n)$  — расчетное значение.

Функция стоимости

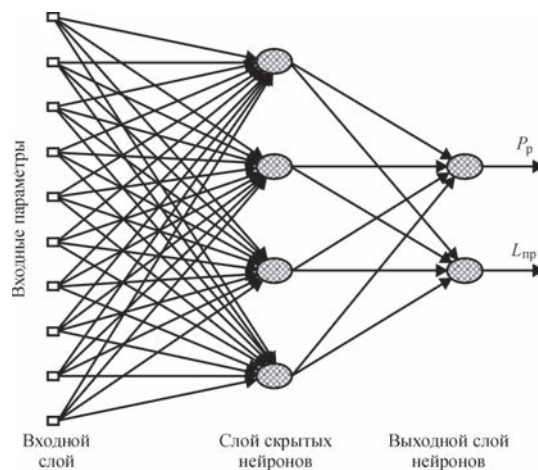
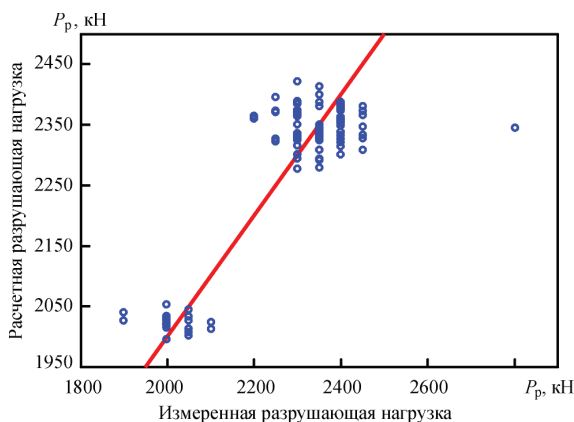
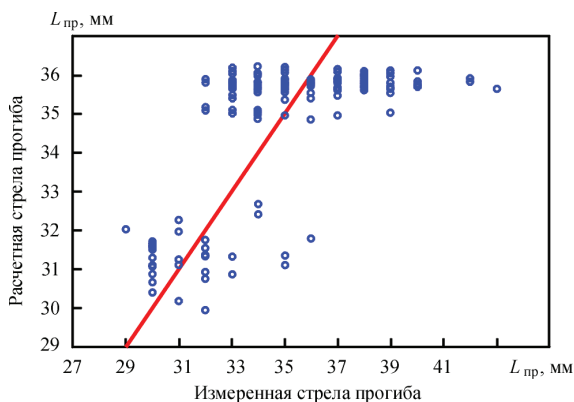


Рис. 3. Многослойный персептрон MLP

Таблиця 2. Нейронні мережі на основі MLP для величини розривного зусилля  $P_p$  і стрели прогибу  $L_{пр}$  об'єктів

Номер п.п.	Выходные переменные сети	Входные переменные сети	Структура	С.К.О
1	$P_p$	$v_{оп}, S, L_{ос}, U_2$	4-8-1	66,4
2	$L_{пр}$	$v_{оп}, S, L_{ос}, U_2$	4-10-1	2,27
3	$P_p$	$v_{оп}, S, L_{ос}$	3-4-1	66,1
4	$L_{пр}$	$v_{оп}, S, L_{ос}$	3-3-1	2,33
5	$P_p$	$S, L_{ос}$	2-4-1	66,8
6	$L_{пр}$	$S, L_{ос}$	2-4-1	2,3

Рис. 4. Ошибка предсказания  $P_p$  по сетям 3-4-1, 0,87, 79 кНРис. 5. Ошибка предсказания  $L_{пр}$  по сетям 4-10-1, 0,88, 2,27

$$E(n) = e_k^2(n) / 2 \rightarrow \min,$$

где номер шага  $n$  итеративного процесса настройки синаптических весов нейрона  $k$ .

При разработке нейронных сетей использовали те же входные параметры, что и для нелинейной регрессии без членов второго порядка. Структура сети была в MLP с одним скрытым слоем, в котором и отрабатываются нелинейности аппроксимируемой зависимости. В качестве функции активации внутренних нейронов применялся гиперболический тангенс, выходной — тождественная (identity) функция [6]. Начальные весовые коэффициенты не задавались. Обучение проводилось по алгоритму BFGS. Сначала поиск наилучшей сети осуществляли в режиме ANS (automated network search), а затем CNN (custom neural networks) для выбора одной и той же

структуры скрытого слоя. Результаты расчета приведены в табл. 2. Ошибки предсказания показаны на графиках (рис. 4, 5).

## Выводы

1. Регрессионные модели и нейронные сети с входными параметрами  $v_{оп}, S, L_{ос}, U_2$ , которые входят в технологический рапорт системы управления сварочной машиной, могут быть использованы для предсказания прочностных характеристик сварных стыков железнодорожных рельсов.

2. Разработанные модели имеют приблизительно одинаковую погрешность предсказания, а среднее квадратическое отклонение (С.К.О) равно 73 кН для  $P_p$  и 2,35 мм для  $L_{пр}$ .

## Список литературы

1. Мойсеєнко К. В., Мала Т. Л. (2016) *Рейки нові зварені для залізниць*. Технічні умови. ТУ У 24.1-40075815-002:2016.
2. Neuron Networks. Manual. www.statsoft.com.
3. Мостицкий С. Э., Шитиков В. К. (2014) *Статистический анализ и визуализация данных с помощью R*. Москва, ДМК Пресс.
4. Дрейпер Н., Смит Г. (2007) *Прикладной регрессионный анализ*. Москва, Вильямс.
5. Круглов В. В., Дли М. И., Голунов Р. Ю. (2001) *Нечеткая логика и искусственные нейронные сети*. Москва, Физматлит.
6. Осовский С. (2002) *Нейронные сети для обработки информации*. Москва, Финансы и статистика.

П. М. Руденко, В. С. Гавриш, С. І. Кучук-Яценко,  
О. В. Дідковський, Є. В. Антіпін

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

## ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ СТИКОВОГО КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ ОПЛАВЛЕННЯМ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ СТИКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК

Проведено аналіз основних параметрів стикового контактного зварювання оплавленням за даними поточних технологічних рапортів, що формуються комп'ютерною системою управління при зварюванні залізничних рейок. Показана можливість розробки моделі передбачення вихідного показника якості зварного стику залізничної рейки — руйнівного навантаження зразка і стріли прогину — за параметрами процесу зварювання різними методами статистичного аналізу, зокрема, кореляційним і регресійним аналізом і нейронними мережами. Розрахунки проводилися за експериментальними даними, отриманими на Київському рейкозварювальному підприємстві при зварюванні рейок на зварювальній машині K1000. Бібліогр. 6, табл. 2, рис. 5.

**Ключові слова:** контактне стикове зварювання оплавленням, статистичні моделі контролю і управління, контроль параметрів процесу, статистичне управління

Поступила в редакцію 12.05.2017



## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В. Н. КОРЖИК<sup>1</sup>, А. Н. ВОЙТЕНКО<sup>1,2</sup>, С. И. ПЕЛЕШЕНКО<sup>3,4</sup>, В. И. ТКАЧУК<sup>1,2</sup>,  
В. Ю. ХАСКИН<sup>1</sup>, А. А. ГРИНЮК<sup>1,5</sup>

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

<sup>2</sup>НПЦ «ПЛАЗЕР», г. Киев, ул. Генерала Наумова, 17А, корп. 1

<sup>3</sup>Институт машиностроения и автомобилестроения Южно-Китайского технологического университета.

510641, Китай, Гуанчжоу, Гуандонг, ул. Вушан 381, строение 381

<sup>4</sup>Компания «Вэйхань наука и технология». 518071, Китай, Гуанчжоу, Шеньжен, авеню Хуан 1001, строение А4

<sup>5</sup>НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». г. Киев, просп. Победы, 37

Аддитивные технологии имеют огромный потенциал в направлении снижения энергетических и материальных затрат на создание самых разнообразных видов продукции. На сегодня наблюдается повышение доли сварочных технологий в аддитивном производстве металлических объемных изделий. Это связано как с высокой производительностью дуговой сварки (наплавки), так и с ее невысокой стоимостью. В работе описан автоматизированный комплекс для трехмерной печати металлических изделий. Показано, что созданный автоматизированный комплекс позволяет изготавливать объемные металлические изделия методами аддитивной дуговой наплавки плавящимся электродом (на токах до 80 А), плазменной наплавки проволоками (на токах до 120 А) и микроплазменной наплавки порошковыми материалами (на токах до 50 А). Библиогр. 10, рис. 7.

*Ключевые слова:* аддитивное наращивание, микроплазменная наплавка, проволоки, порошки, комплекс оборудования, технологические исследования, металлография

В современном мире наблюдается стойкий рост интереса к процессам аддитивного производства (технологиям 3D печати). Ожидается, что применение этих процессов принципиально изменит промышленное производство. Это связано с такими возможностями технологий аддитивного производства, как реализация автоматического проектирования деталей, гибкость и быстрота их изготовления, перераспределение производства от больших предприятий к мелким, изготовление деталей непосредственно у потребителя [1]. Технологии 3D печати позволяют «выращивать» изделия любой сложности с минимальными затратами. При этом практически отсутствуют отходы производства и сокращается количество обслуживающего персонала. Аддитивные технологии имеют огромный потенциал в деле снижения энергетических и материальных затрат на создание самых разнообразных видов продукции.

Для наиболее полного использования возможностей трехмерной печати требуется наличие технологий получения высокопрочных объемных изделий из металлов, сплавов, в том числе с высокой твердостью [2]. Использование металлических материалов даст возможность непосредственного получения готовой продукции, а не ее прототипа, как это часто происходит до сих пор

[3]. Поэтому актуальным является создание технологий аддитивного производства готовых металлических объемных изделий. К таким технологиям, в первую очередь, относятся сварочные процессы (например, наплавка).

С точки зрения получения трехмерных металлических изделий наиболее высокого качества перспективными являются процессы избирательного лазерного плавления (Selective Laser Melting – SLM) и электронно-лучевое плавление (Electron-Beam Melting – EBM). Однако процесс EBM из-за сложности, дороговизны и громоздкости используемого оборудования получил довольно ограниченное распространение [4].

Процессы SLM в настоящее время получили весьма широкое распространение для изготовления высокопрочных объемных металлических изделий [5]. Данный процесс обеспечивает возможность получения изделий путем сплавления порошков различных металлов и сплавов лазерным излучением. Преимуществами являются высокая степень детализации элементов, высокая плотность (до 99 %), а также точность порядка  $\pm 5$  мкм. Вместе с тем, при всей его эффективности и гибкости, процесс SLM также имеет ряд ограничений, которые сужают его применение:

– необходимость использования дорогостоящего и энергетически затратного оборудования с

высокой стоимостью обслуживания, что обуславливает высокую себестоимость процесса трехмерной печати и приводит к высокой стоимости изготавливаемых изделий;

- относительно низкая производительность трехмерной печати (обычно для наиболее распространенных машин не более  $10 \text{ см}^3/\text{ч}$  наращиваемого металла);

- ограничения по материалу — для SLM используются дорогостоящие порошки с жесткими требованиями по гранулометрическому и химическому составу, текучести и другим характеристикам;

- недостаточно высокие прочностные характеристики изготовленных изделий.

Большой промышленный интерес для изготовления объемных металлических изделий представляет применение дуговых и плазменных сварочных технологий (например, наплавки) из-за их технической и экономической доступности. На сегодня научно-исследовательская работа по трехмерной дуговой сварке ведется в University of Nottingham (Великобритания), Университете Wollongong (Австралия) и Southern Methodist University (США) [6]. Группы исследователей из Индийского института технологий (Бомбей, Индия) и Института технологии производства и автоматизации Фраунгофера (Германия) представили свои концептуальные идеи объединения сварки с фрезерованием. Разрабатывались пути устранения характерных дефектов формирования объемных изделий сварочными способами [7]. Была показана необходимость контроля температуры наращиваемых слоев. Особое внимание обращалось на создание изделий из титановых [7] и никелевых [8] сплавов для задач аэрокосмической отрасли.

Таким образом, на сегодня наблюдается повышение доли сварочных технологий в аддитивном производстве металлических объемных изделий. Это связано как с высокой производительностью дуговой сварки (наплавки), так и с ее невысокой стоимостью. Поэтому интерес представляет разработка автоматизированного комплекса для трехмерной печати металлических изделий при помощи таких технологий, а также детальное изучение их особенностей и перспектив дальнейшего промышленного применения.

Целью работы является создание автоматизированного комплекса для изготовления объемных металлических изделий методами аддитивных технологий дуговой и плазменной наплавки и исследование особенностей процессов изготовления металлических пространственных изделий (примитивов).

Для достижения поставленной цели было принято решение использовать блочно-модульную ар-

хитектуру проектируемого комплекса. Такая архитектура позволяет легко изымать существующие и интегрировать новые необходимые составляющие в единую систему, совмещать доступность и простоту составляющих комплекса с необходимой технологической гибкостью и возможностью адаптации оборудования под различные задачи, возникающие при его промышленной эксплуатации. Использование данного типа архитектуры комплекса позволило использовать три сменные наплавочные головки: дуговую с плавящимся электродом (МИГ/МАГ), плазменную и микроплазменную. Это позволяет легко переходить от одного процесса наплавки к другому, используя их преимущества. Так, при необходимости наращивания больших объемов металла целесообразно использовать наплавку МИГ/МАГ, а при необходимости повышения точности, уменьшения толщины наплавляемой стенки и снижения шероховатости — микроплазменную наплавку. Кроме того, для повышения конкурентоспособности и снижения стоимости проектируемого комплекса вместо дорогостоящего антропоморфного робота использовали трехкоординатный позиционер портального типа. Техническими преимуществами такого оборудования являются простота изготовления изделий больших размеров, а также повышенная точность перемещения наплавочного инструмента.

В результате для создания автоматизированного комплекса была выбрана схема, приведенная на рис. 1, согласно которой управление перемещением сменных наплавочных головок 6, крепящихся на каретке позиционера 1, осуществляется со стойки системы управления 2 в ручном или автоматическом режиме по ранее заданной программе. Данный узел также управляет сигналом старт/стоп для модуля источника питания 4. В свою очередь модуль 4 управляет сигналом старт/стоп для механизма подачи проволоки или порошкового питателя 3 и контролирует наличие протока воды, подаваемой БАО 5. В процессе работы предлагаемого комплекса площадка, на которой создается объемное металлическое изделие, располагается в трехкоординатном позиционере 1, который производит аддитивную наплавку путем пространственных перемещений головки 6 по программе, введенной в систему управления 2.

Принятая блочно-модульная архитектура автоматизированного комплекса позволила изготовить его отдельные блоки независимо друг от друга, что ускорило и упростило этот процесс. Так, был разработан оригинальный недорогой и технологичный трехкоординатный позиционер сменных наплавочных головок (рис. 2, а, б). В рабочей зоне позиционера размещается технологическая

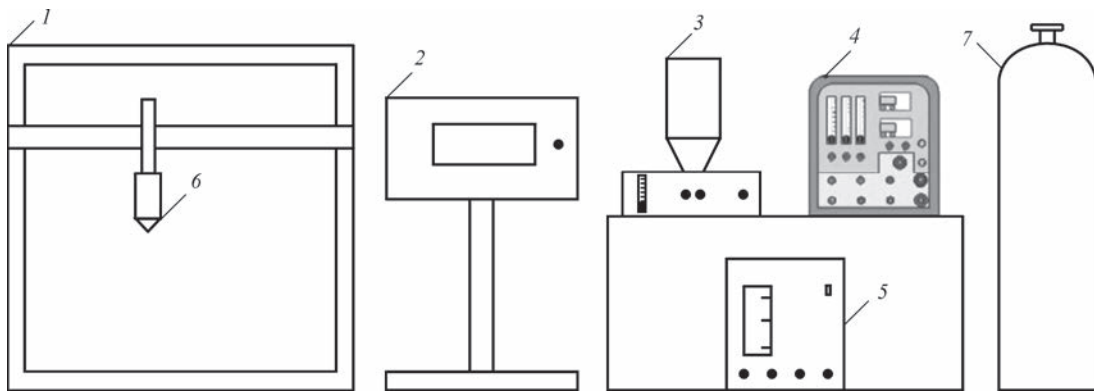


Рис. 1. Функциональная схема комплекса оборудования для изготовления объемных металлических изделий на основе плазменных и дуговых наплавочных технологий: 1 — трехкоординатный позиционер; 2 — система управления; 3 — порошковый питатель (механизм подачи проволоки); 4 — модуль источника питания; 5 — блок автономного охлаждения (БАО) наплавочной головки (плазмотрона); 6 — сменная наплавочная головка; 7 — защитный газ (аргон)

площадка для изготовления объемной металлической детали. Поскольку в качестве расходных присадочных материалов в таких головках используются как порошки, так и проволоки, создаваемый комплекс был укомплектован механизмом подачи проволоки (рис. 2, в) и дозатором порошков (рис. 2, г, д).

Созданный автоматизированный комплекс аддитивной микроплазменной наплавки объемных металлических изделий имеет два источника питания, представляющих собой преобразователи инверторного типа. Один из них рассчитан на реализацию аддитивных технологий плазменной наплавки проволокой (диаметром 0,8/1,2 мм) на сварочных токах до 120 А и порошковой микро-

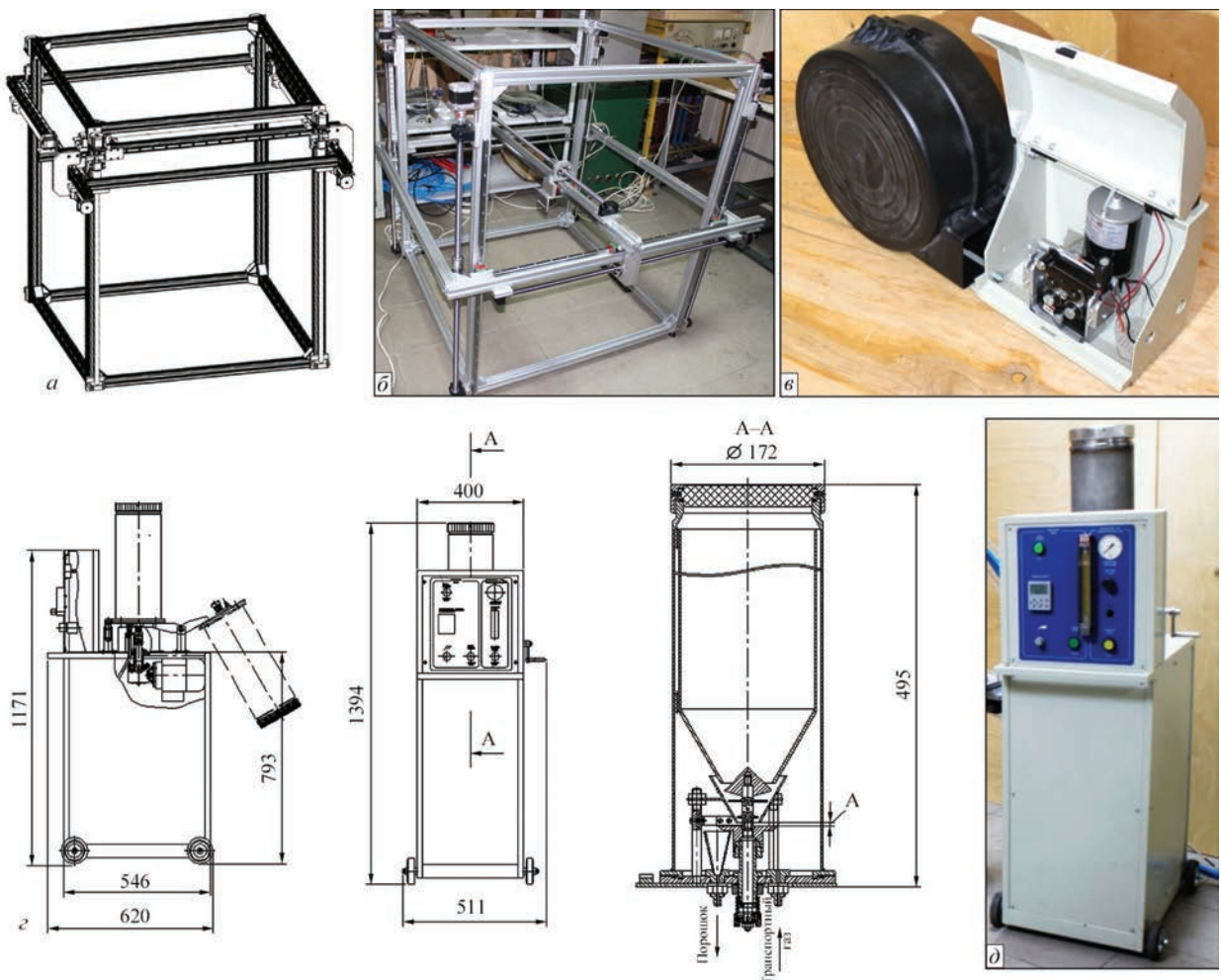


Рис. 2. Блоки автоматизированного комплекса аддитивной наплавки объемных металлических изделий: компьютерная 3D модель (а) и внешний вид (б) трехкоординатного позиционера, механизм подачи проволоки (в), чертеж (г) и внешний вид (д) дозатора наплавочных порошков



плазменной наплавки на сварочных токах до 50 А, а другой — на технологию дуговой наплавки МИГ/МАГ проволокой (диаметром 0,8/1,2 мм) на сварочных токах до 100 А. Соответственно, комплекс снабжен тремя сменными наплавочными головками — дуговой и плазменной для наплавки проволоками и микроплазменной для наплавки порошками. Конструирование таких головок выполнялось при помощи расчетного пакета программ Solidworks Flow Simulation [9]. Этот пакет использует для моделирования один из подразделов вычислительной гидродинамики — механику сплошных сред, включающий совокупность физических и математических исчисленных методов, предназначенных для вычисления характеристик

поточных процессов. Благодаря данному пакету программ были спроектированы различные модели наплавочных головок. Примером может служить моделирование головок микроплазменной порошковой наплавки и виртуальная проверка их работоспособности (рис. 3). Было установлено, что вариант модели микроплазменной наплавочной головки с внутренней подачей порошка является самым удачным (рис. 3, *жс, з, и*). В результате были выбраны конструкции и изготовлены головки для трех процессов наплавки: МИГ/МАГ, плазменной и микроплазменной (рис. 4).

Конструкция комплекса включает трехкоординатный позиционер оригинальной разработки с рабочей зоной перемещения наплавочной го-

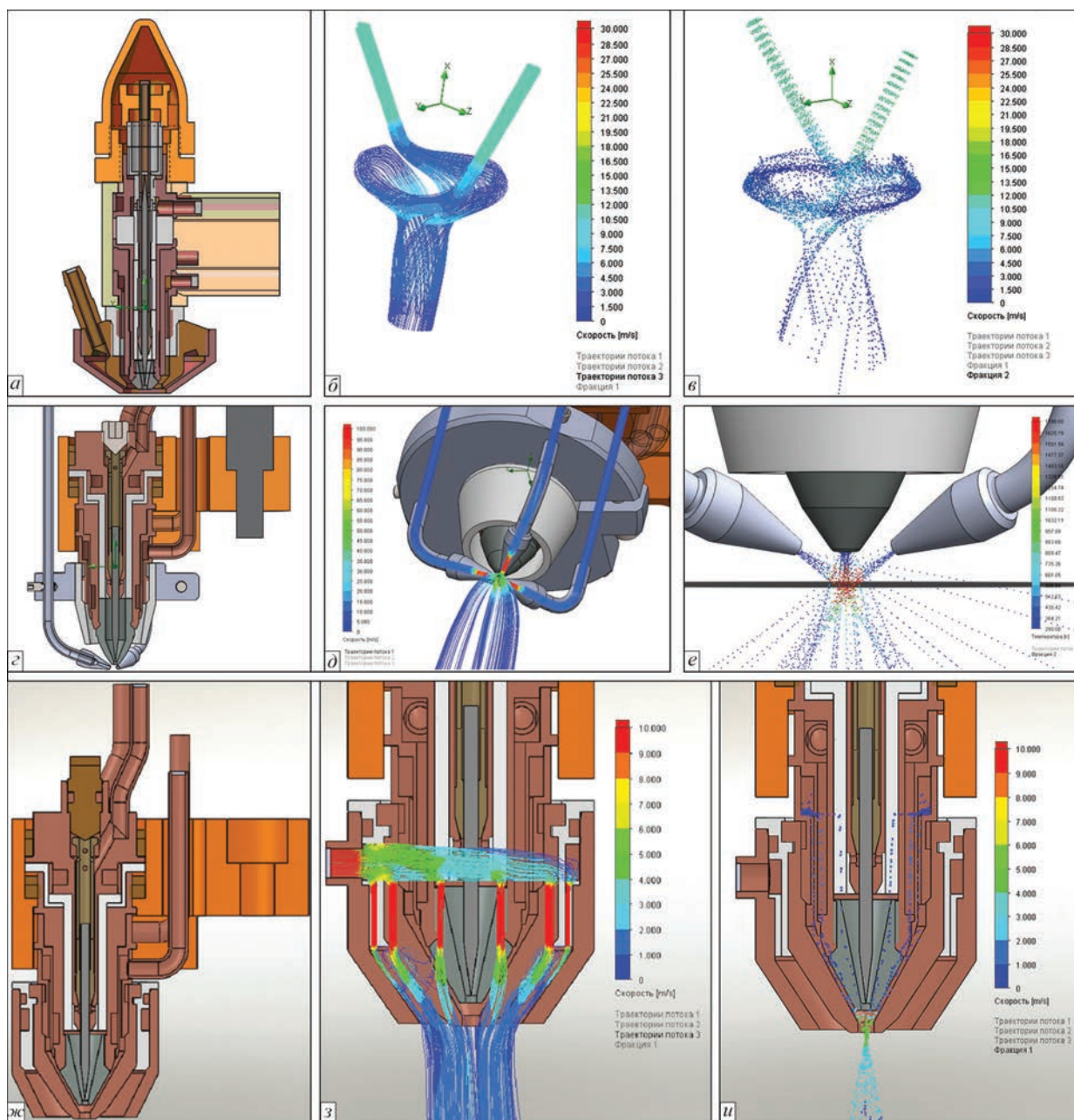


Рис. 3. Конструкция (*а, з, жс*), скорость и направление потоков транспортирующего газа (*б, д, з*) и частиц наплавочного порошка (*в, е, и*) различных моделей микроплазменных головок: *а–в* — модернизированный плазматрон МПУ-4; *з–е* — головка с подачей порошка тремя внешними трубками; *жс–и* — головка с внутренней подачей порошка

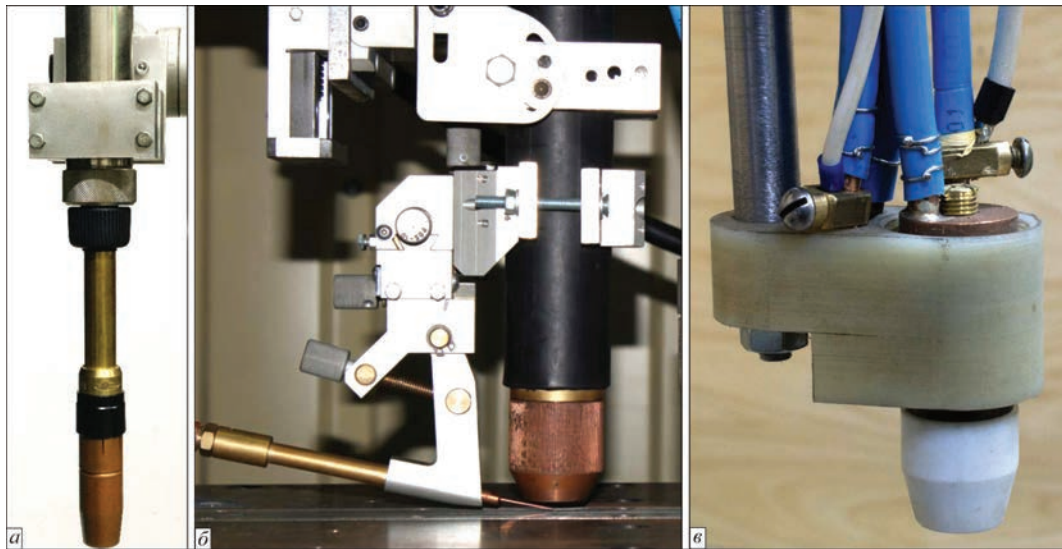


Рис. 4. Внешний вид наплавочных головок: *а* — для наплавки дугой с плавящимся электродом (МИГ/МАГ); *б* — для плазменной наплавки проволоками; *в* — для микроплазменной порошковой наплавки

ловки 900×900×900 мм (рис. 5, *а*). Головка МИГ/МАГ работает на постоянном токе. Плазмотроны способны работать в режимах постоянного и импульсного тока прямой полярности, режиме разнополярных импульсов и др. [10]. Управление позиционированием наплавочной головки и подачи проволоки или расходного порошка происходит при помощи системы ЧПУ, которая объединена с источником питания и пультами управления механизма подачи проволоки и порошкового питателя (рис. 5, *б*). Управление автоматизированным комплексом аддитивной наплавки осуществляется при помощи общего PLC-контроллера с возможностью обмена данными по режимам трехмерной печати и управляющими командами с компьютером.

С применением созданного комплекса аддитивной наплавки объемных металлических изделий был проведен ряд экспериментов по изготовле-

нию металлических пространственных примитивов. Для этого использовали сварочную проволоку Св-08Г2С ГОСТ 2246–70 (диаметром 1,0 и 1,2 мм) и наплавочный порошок ПГ-10Н-04 ТУУ 322-19-004-96 (фракция 60...100 мкм). Были получены изделия типа «стенка», «стакан», «конус», «полусфера» (рис. 6). Для определения точности изготовления этих изделий проводилось их измерение с помощью штангенциркуля с ценой деления 0,05 мм. Было установлено, что отклонения полученных аддитивной наплавкой изделий от номинального размера лежат в пределах  $\pm 0,5$  мм. Помимо определения точности проводили металлографические и механические исследования изготовленных объемных изделий.

Для исследования структурных особенностей металла из наплавленных проволокой Св-08Г2С (диаметром 1,2 мм) образцов типа «стенка» вырезали темплеты, шлифовали и полировали их,



Рис. 5. Автоматизированный комплекс аддитивной наплавки объемных металлических изделий: *а* — манипулятор с плазмотроном и порошковым дозатором-питателем; *б* — вид блока питания и управления с открытой лицевой панелью





Рис. 6. Металлические изделия, изготовленные на разработанном комплексе: *а* — стенка 5×70 мм, плазменная наплавка проволокой Св-08Г2С (диаметр 1,2 мм) за 50 проходов; *б* — конус, наплавка проволокой Св-08Г2С (диаметр 1,0 мм); *в* — стакан диаметром 80 мм, наплавка МИГ/МАГ проволокой Св-08Г2С (диаметр 1,2 мм); *з* — стакан диаметром 40 мм, микроплазменная наплавка порошком ПГ-10Н-04

а затем подвергали травлению в 4%-ом растворе азотной кислоты. Выявленные структуры изучали при помощи микроскопа «Neophot-31». На отполированных не протравленных образцах изучали наличие пористости и неметаллических включений. Эти исследования показали, что пористость наплавленных стенок не превышает 1...2 % (рис. 7, *а*). Изучение структуры образцов показало укрупнение дендритных зерен в верхней части и наличие более мелких равноосных зерен в средней и нижней части (рис. 7, *б*). Это объясняется перекристаллизацией предыдущих наплавленных слоев при нанесении последующих. Щелей между соприкасающимися слоями и по линии сплавления нет (рис. 7, *в*). Размер зоны термического влияния от наращиваемого слоя составляет 2 мм. Структура как зоны сплавления (рис. 7, *з*), так и наплавленного материала равноосная, перемешивание слоев чрезвычайно низкое.

Прочность наплавленного металла оценивали путем усреднения результатов испытаний в условиях одноосного статического растяжения трех образцов. Испытания вырезанных из наплавленных стенок образцов типа XIII ГОСТ 6996–66 проводились с помощью универсальной сервоги-

дравлической разрывной машины MTS 810. Их результаты показали, что механическая прочность полученных аддитивной плазменной наплавкой проволокой Св-08Г2С изделий составляет порядка 90...95 % прочности литого металла.

Основными недостатками разрабатываемых технологических процессов можно считать:

- значительные неровности и шероховатости стенок, формируемых аддитивной дуговой и плазменной наплавкой изделий;

- перегрев стенок изделий в процессе наплавки, приводящий к их термической деформации.

Для устранения первого из данных недостатков целесообразно использовать традиционную механическую обработку, например, токарную (рис. 6, *в*). Для устранения второго недостатка возможно применение лазерного пирометра, постоянно контролирующего температуру наплавливаемых стенок и передающего информацию системе управления. Последняя может корректировать режим наплавки соответственно уровню нагрева изделия. Еще одним вариантом устранения этого недостатка может быть принудительное охлаждение наплавливаемых стенок изделия.



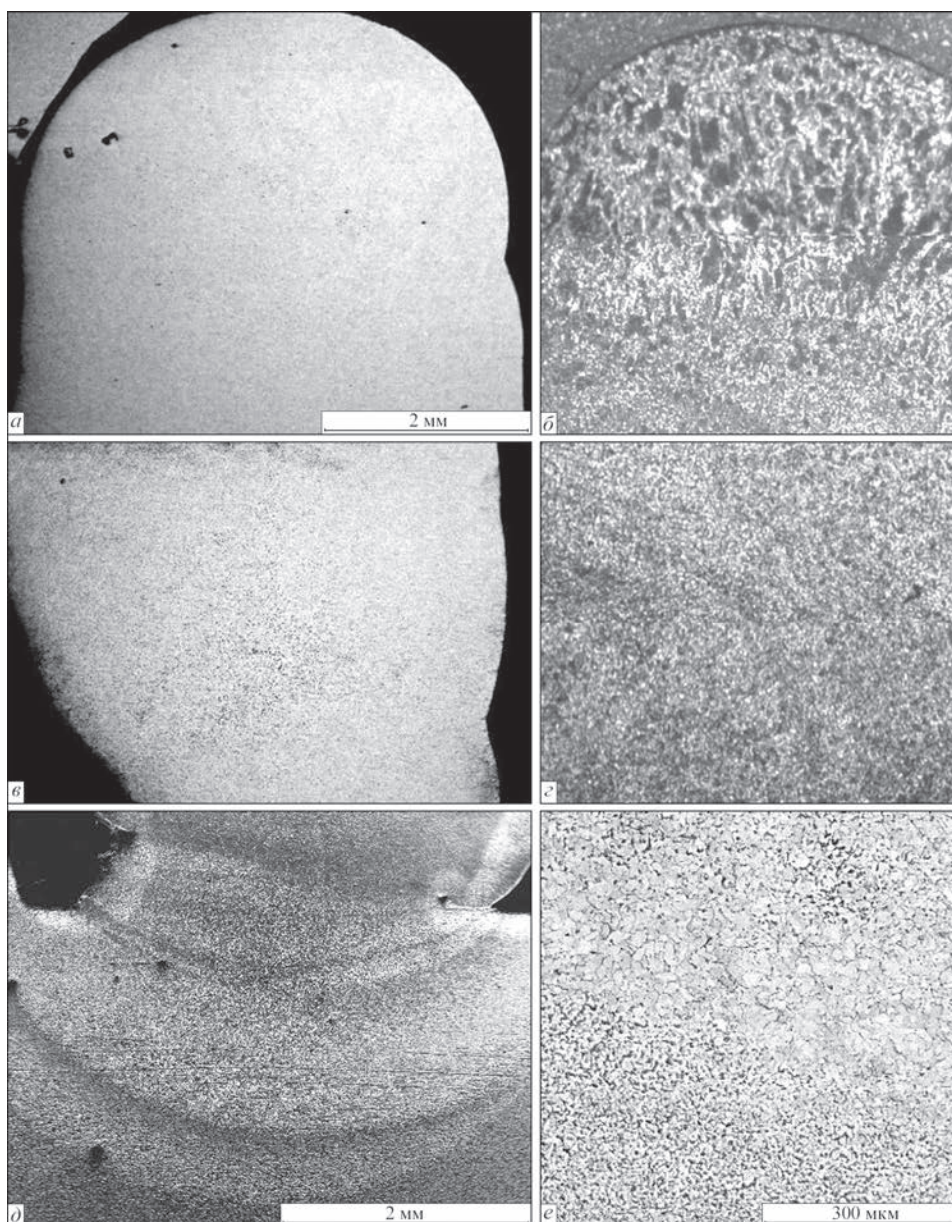


Рис. 7. Структуры аддитивной плазменной наплавки примитива типа «стенка» с использованием проволоки Св-08Г2С: *а* — нетравленный шлиф верхней части; *б* — структура верхней части после травления,  $\times 63$ ; *в* — нетравленный шлиф средней части; *г* — структура средней части после травления,  $\times 63$ ; *д* — линия сплавления и зона термического влияния,  $\times 35$ ; *е* — зона сплавления,  $\times 200$

Таким образом, созданный автоматизированный комплекс позволяет изготавливать объемные металлические изделия методами аддитивной дуговой наплавки плавящимся электродом (на токах до 80 А), плазменной наплавки проволоками (на токах до 120 А) и микроплазменной наплавки порошковыми материалами (на токах до 50 А).

Исследование особенностей процессов изготовления металлических пространственных примитивов типа «стенка», «стакан», «конус» и «полусфера» показали, что отклонения от номинального размера при их изготовлении не превышают  $\pm 0,5$  мм, пористость лежит в пределах 1...2 %, а механическая прочность составляет порядка 90...95 % прочности литого металла. Структура наплавленного материала мелкозер-

нистая, равноосная, перемешивание слоев чрезвычайно низкое.

### Список литературы

1. Kruth J. P., Leu M. C., Nakagawa T. (1998) Progress In Additive Manufacturing And Rapid Prototyping. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 47(2), 525–540.
2. Слюсар В. И. (2003) Фаббер-технологии. Новое средство трехмерного моделирования. *Электроника: наука, технология, бизнес*, 5, 54–60.
3. Korzhyk V. N., Khaskin V. Yu., Grinyuk A. A. et al. (2016) 3D-printing of metallic volumetric parts of complex shape based on welding plasma-arc technologies (Review). *The Paton Welding Journal*, 5-6, 117–123.
4. Bruce M. R., Riley S. F., Cola M. J. et al. (2012) Measurement And Simulation Of Titanium Alloy Deposit Temperature In Electron Beam Additive Manufacturing. *Trends in Welding Research 2012: Proceedings of the 9th International Conference, Chicago, Illinois, USA, June 4–8*, pp. 963–969.

5. Kruth J. P. (2004) Selective laser melting of iron-based powder. *J. Mater. Process. Technol.*, **149**, 616–622.
6. Alhuzaim A. F. (2014) Investigation in the use of plasma arc welding and alternative feedstock delivery method in additive manufacture. *A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science General Engineering*, Montana Tech of the University of Montana.
7. Baufeld B., Van der Biest O., Gault R. S. (2010) Additive Manufacturing of Ti–6Al–4V Components by Shaped Metal Deposition: Microstructure and Mechanical Properties. *Materials & Design*, **31**, 106–111.
8. Clark D., Bache M. R., Whittaker M. T. (2008) Shaped Metal Deposition of a Nickel Alloy for Aero Engine. *Journal of Materials Processing Technology*, **203**, 439–448.
9. (2009) *Основные элементы SolidWorks (SolidWorks 2010)*. Dassault Systems SolidWorks Corporation.
10. Гринюк А. А., Коржик В. Н., Бабич А. А. и др. (2016) Унифицированный плазмотрон для сварки сжатой дугой неплавящимся электродом *Зб. доповідей Міжнародної конференції «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні – Poliweld-2016 (26-27 мая 2016)*. Київ, НТУУ «КПІ», сс. 43–49.

В. М. Коржик<sup>1</sup>, О. М. Войтенко<sup>1,2</sup>, С. І. Пелешенко<sup>3,4</sup>,  
В. І. Ткачук<sup>1,2</sup>, В. Ю. Хаскін<sup>1</sup>, А. А. Гринюк<sup>1,5</sup>

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

<sup>2</sup>НПЦ «ПЛАЗЕР»,  
м. Київ, вул. Генерала Наумова, 17А, корп. 1

<sup>3</sup>Інститут машинобудування і автомобілебудування  
Південно-Китайського технологічного університету,  
м. Гуанчжоу, КНР

<sup>4</sup>Компанія «Вейхань наука і технологія», м. Шеньжен, КНР

<sup>5</sup>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».  
м. Київ, просп. Перемоги, 37

### РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТРИВИМІРНИХ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ НА ОСНОВІ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Аддитивні технології мають величезний потенціал у напрямку зниження енергетичних та матеріальних витрат на створення найрізноманітніших видів продукції. На сьогодні спостерігається підвищення частки зварювальних технологій в адитивному виробництві металевих об'ємних виробів. Це пов'язано як з високою продуктивністю дугового зварювання (наплавлення), так і з його невисокою вартістю. У роботі описаний автоматизований комплекс для тривимірного друку металевих виробів. Показано, що створений автоматизований комплекс дозволяє виготовляти об'ємні металеві вироби методами адитивного дугового наплавлення електродом, що плавиться (на токах до 80 А), плазмового наплавлення дротами (на токах до 120 А) і мікроплазмового наплавлення порошковими матеріалами (на токах до 50 А). Бібліогр. 10, рис. 7.

**Ключові слова:** адитивне нарощування, мікроплазмове наплавлення, дроти, порошки, комплекс обладнання, технологічні дослідження, металографія

Поступила в редакцію 12.05.2017



Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАН України  
Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»  
Международная Ассоциация «Сварка»

## Восьмая международная конференция ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

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

**Председатели программного комитета**  
академик И.В. Кривцун  
проф. В.С. Коваленко

### 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

Подача заявок на участие и тезисов докладов до 23.06.2017 г.

## ОБОРУДОВАНИЕ ♦ ТЕХНОЛОГИИ ♦ МОДЕЛИРОВАНИЕ



**АДРЕС ОРГКОМИТЕТА**  
Украина, 03680, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11  
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины  
Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
<http://pwi-scientists.com/rus/twmp2017>





## АВТОМАТИЗАЦИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕХАНИЧЕСКОГО СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

И. В. ЛЕНДЕЛ<sup>1</sup>, В. А. ЛЕБЕДЕВ<sup>2</sup>, С. Ю. МАКСИМОВ<sup>1</sup>, Г. В. ЖУК<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.  
03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 15. E-mail: dktbpaton@gmail.com

В статье приведены примеры роботизации, автоматизации и механизации сварочных и родственных процессов на базе механического сварочного оборудования (МСО). В состав комплексов и установок, применяемых для процессов сварки или наплавки, входят как серийные образцы МСО, так и специально созданные, учитывающие индивидуальность конструкции изделия и технологические особенности его изготовления. Показано широту решаемых задач и возможность отечественного производителя МСО осуществлять разработку и создавать современные высокотехнологические комплексы и установки для сварки и наплавки. Отмечена возможность разработки специального МСО для новых технологий сварки и наплавки в составе роботизированных комплексов и автоматических установок. Библиогр. 9, рис. 5.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, наплавка, механическое сварочное оборудование, автоматизация, механизация.

Выполнение сварочных работ связано с необходимостью использования комплекса оборудования, обеспечивающего, зачастую при участии сварщика, получение швов заданного качества и конфигурации. На условия выполнения сварки больше, чем на какой-либо другой технологический процесс обработки металлов, влияют размеры и форма заготовок, качество и точность сборки, а также изменение в процессе работы размеров деталей вследствие тепловых деформаций. Поэтому к оборудованию, которое используется для организации сварочных работ, предъявляются многочисленные требования и уделяется огромное внимание [1–4].

В состав комплекса технологически связанного между собой оборудования, обеспечивающего проведение сварочных работ, в зависимости от степени его оснащенности входят:

- источник питания и сварочный аппарат с приборами управления, регулирования процесса и электрододержателем;
- механическое и вспомогательное оборудование, предназначенное для манипулирования свариваемым изделием в процессе наложения шва и для крепления и перемещения сварочных аппаратов;
- технологические сборочно-сварочные приспособления, позволяющие осуществить быструю и точную сборку деталей под сварку, удержать их в нужном положении во время работы и предотвратить или уменьшить при этом коробление свариваемого изделия.

В каждом отдельном случае комплекс или сварочная установка может иметь все перечисленные элементы или некоторые из них. Поскольку зна-

чительное время расходуется на вспомогательные, сборочные и дополнительные работы, что снижает эффективность применения современных высокопроизводительных способов сварки, сокращение цикла производства и высокое качество сварных швов могут быть достигнуты только при комплексной механизации и автоматизации сварочных, сборочных и вспомогательных операций. Уровень комплексной механизации обуславливает наличие в составе установки технологических приспособлений, механического, вспомогательного и другого оборудования (транспортного, контрольного и тому подобного) [1–5].

Как известно, установка для автоматической сварки содержит устройства для укладки, сборки и вращения свариваемого изделия, площадку для сварщика и другое оборудование. В ней механизированы, по крайней мере, две основные операции сварочного процесса: подача электрода и перемещение дуги вдоль свариваемых кромок. Соответственно установки, где механизирована только одна из этих операций, считаются установками для полуавтоматической сварки [1–4].

Решающее значение для комплексной механизации процесса сварки имеет наличие в составе сварочной установки механического и вспомогательного оборудования. Согласно работе [6] к механическому сварочному оборудованию (МСО) относятся: горизонтальные, вертикальные и универсальные манипуляторы, роликовые и балансирные вращатели; цепные кантователи; трубные вращатели. Кроме этого, к данному типу оборудования относятся также сварочные порталы, тележ-



ки, столы сварщика, а также колонны для сварочных автоматов и полуавтоматов.

Некоторую оснастку или простейшие образцы вспомогательного МСО машиностроительные предприятия, в технологическом цикле производства продукции которых присутствуют сварочные работы, могут изготовить сами на собственных производственных мощностях. Однако зачастую в таких случаях обращаются к специалистам специализированных предприятий, где готовы предложить профессиональное, комплексное решение автоматизации и механизации сварочных и родственных процессов.

В Украине таким предприятием является ПАО «Ильницкий завод механического сварочного оборудования» («ИЗМСО»), которое берет свое начало с 1964 г. Данное предприятие было создано для разработки и внедрения оборудования автоматизации и механизации сварочных работ. Начиная с момента образования им осваивался выпуск все новых и новых видов МСО и одновременно наращивался объем выпуска, что позволило полностью удовлетворить потребности страны. В тесном сотрудничестве с Всесоюзным институтом сварочного производства (ВИСП) был освоен выпуск вращателей сварочных (универсальных, горизонтальных, вертикальных, роликовых), а также колонн для сварочных автоматов и полуавтоматов. Совместно с Институтом электросварки им. Е. О. Патона осваивался выпуск новых моделей горелок таких типов, как А1231 и ГДПГ-305 для электродуговой сварки, а также проводилась модернизация горелки А-547уМ. Совместная работа украинских партнеров дала возможность выпускать оборудование и комплексы для наплавки и восстановления деталей металлургических комбинатов и ремонтных заводов.

Подтверждением этому служат такие комплексы, как: РМ-04, РМ-05, РМ-06, РМ-09 (рис. 1, а) — для автоматической дуговой наплавки колес грузоподъемных кранов; РМ-15 (рис. 1, б) — универсальная установка для наплавки канатных блоков диаметром до 2,5 м и других цилиндрических и плоских деталей; РМ-165 и ИЗРМ-05 (рис. 1, в) — для автоматической дуговой наплавки малога-

баритных цилиндрических деталей диаметром до 0,5 м, длиной до 1 м, массой до 120 кг; РМ-10 — для наплавки прокатного инструмента диаметром до 0,6 м, длиной до 2 м, массой 5000 кг, и ряд других установок. В зависимости от конструктивных особенностей и массогабаритных характеристик наплавляемых изделий в состав установок входят универсальные манипуляторы, колонны, роликовые вращатели, столы сварщика производства ПАО «ИЗМСО» в их серийном или специальном исполнении.

Для повышения степени технико-технологических характеристик производимого МСО специалисты ПАО «ИЗМСО» проводят постоянную модернизацию выпускаемой продукции для того, чтобы потребитель имел возможность установить, задействовать и пользоваться системами с новыми технологическими решениями и всеми преимуществами современного сварочно-наплавочного оборудования, например, с импульсными технологиями. Так, в тесном сотрудничестве с ГП «ОКТБ Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины» была проведена доработка установки ИЗРМ-05 для возможности оборудования ее безредукторными системами подачи электродной проволоки на базе безколлекторных электродвигателей с управлением от компьютеризованных регуляторов. Такие системы обеспечивают работу с модуляцией режимов и управляемой импульсной подачей электродной проволоки. Новые системы подачи вследствие эффективного управления переносом электродного металла и снижения тепловложений в изделие, в комплексе с рассматриваемым оборудованием, позволяют:

- получить сварку-наплавку с энерго- и ресурсосберегающими эффектами;
- снизить деформацию изделия;
- обеспечить качественное ведение процесса во всех пространственных положениях, в том числе выполнение горизонтальных швов на вертикальной плоскости и в потолочном положении.

Рациональность применения в системах манипуляторов, вращателей, передвижных колонн, новых разработок сварочно-наплавочного оборудования обусловлена, в том числе, и возможностью



Рис. 1. Установки для наплавки и восстановления деталей: РМ-09 (а); РМ-15 (б); ИЗРМ-05 (в)



Рис. 2. Роботизированные комплексы с применением универсального манипулятора (а), универсального и двухстоечного горизонтального манипулятора (б)

этого оборудования поддерживать заданные параметры рабочего движения даже в протяженных циклах, с высокой степенью точности осуществлять позиционирование рабочего инструмента. В качестве примера можно отметить, что передвижные сварочные колонны могут выполнять высокопроизводительную сварку протяженных изделий типа настилов с возможностью высокоточного сканирования рельефа свариваемых поверхностей, что обеспечивается применением современных компьютеризованных электроприводов и датчиков расстояния до свариваемой поверхности.

Следующим примером комплексной автоматизации и роботизации процессов сварки, наплавки и резки с применением продукции производства ПАО «ИЗМСО» являются разработки холдинга «Белфингрупп». Данная компания специализируется на проектировании и создании роботизированных технологий и занимается промышленной роботизацией. Специалисты «Белфингрупп» разработали и внедрили роботизированный комплекс (РТК), который решает такие задачи, как резка труб различных диаметров и длин по сложным 3D траекториям. Данный РТК не только обеспечивает высокоточное вырезание отверстий, но также обрезку и торцевание труб. Оборудование позволяет осуществлять резку труб длиной до 12 м и диаметром до 1,2 м (рис. 2, а).

РТК (рис. 2, б) решает более универсальные задачи по дуговой сварке. Наличие в составе РТК двух разнотипных манипуляторов производства ПАО «ИЗМСО» гарантирует возможность сварки большой и разнообразной номенклатуры изделий. В настоящее время оба РТК введены в эксплуатацию и задействованы в серийном производстве.

Существует большое количество реализованных проектов комплексной автоматизации и механизации процессов сварки и наплавки, предложенных специалистами ПАО «ИЗМСО» с использованием специального МСО собственной разработки.

К числу таких относится комплекс для сварки железнодорожных цистерн (рис. 3, а) для ПАО

«Крюковский вагоностроительный завод», состоящий из колонны велосипедного типа КВТ-05 и роликового вращателя. Для АО «НИКИМТ-Атомстрой» разработан и изготовлен комплекс (рис. 3, б) механизированной сварки трубопроводов диаметром до 0,3 м, длиной до 6 м и массой до 2000 кг, используемых на объектах атомной энергетики, а также комплекс (рис. 3, в) для сварки элементов диаметром до 2 м, массой до 3000 кг активной зоны атомных реакторов. В случае, представленном на рис. 3, б, комплекс состоял из специального двухстоечного горизонтального вращателя, включая колонну для сварочного автомата, а на рис. 3, в — универсального манипулятора, роликового стэнда и колонны. Последний комплекс (рис. 3, в), был укомплектован специальной системой слежения за стыком, которая позволяла для получения постоянной скорости сварки вести корректировку скорости вращения приводных роликов стэнда. Для ООО «МПВФ «Энергетик» был разработан уникальный сварочный комплекс (рис. 3, в), включающий специальную колонну Т-31060 с ходом рабочего органа по горизонтали и вертикали более 3 м и тандемный роликовый стэнд грузоподъемностью до 5000 кг, которые программно были связаны между собой. Комплекс осуществляет двустороннюю автоматическую сварку под флюсом продольных и кольцевых швов барабанов паровых котлов, обечаек емкостей больших диаметров и толщин.

Кроме этого, для ООО «МПВФ «Энергетик» на ПАО «ИЗМСО» были разработаны и изготовлены уникальные образцы МСО, среди которых передвижной портал (рис. 4, б) для сварки изделий длиной до 7 м и установка (рис. 4, в) для полуавтоматической сварки под флюсом кольцевых и продольных внутренних швов емкостей длиной до 3 м и диаметром от 0,4 м. Установка (рис. 4, в) состоит из колонны с неподвижной стрелой. На конце стрелы установлен бункер для флюса, сварочная горелка и элементы системы наблюдения за процессом сварки. Портал и колонна (рис. 4, б, в) имеют возможность перемещаться по рель-





Рис. 3. Комплексы автоматизации и механизации сварочных процессов с использованием специального МСО

совому пути со сварочной скоростью. Также, для осуществления механизации сварки и родственных процессов, были разработаны и изготовлены универсальный манипулятор грузоподъемностью 7000 кг (рис. 4, а) и балансирный вращатель гру-

зоподъемностью 40000кг (рис. 4, г) для Мариупольского МК им. Ильича.

Особенности манипулятора — увеличенные габаритные характеристики планшайбы (диаметр 1,4 м) и наличие водяного охлаждения шпин-



Рис. 4. Уникальные образцы МСО: универсальный манипулятор грузоподъемностью 7000 кг (а), передвижной портал (б), установка для полуавтоматической сварки под флюсом кольцевых и продольных внутренних швов (в), балансирный вращатель грузоподъемностью 40000 кг (г)





Рис. 5. Некоторые другие варианты применения МСО: разматыватель для погружения и поднятия сварочного автомата (а), демонстрационный вращающийся подиум (б)

деля и подшипниковых узлов стола. А балансирный вращатель имеет возможность перемещаться по рельсовому пути и, в зависимости от диаметра изделий, изменять расстояние между роlikоопорами.

Следует заметить, что кроме серийного оборудования, предприятие решает задачи создания уникального оборудования с высокими эксплуатационными характеристиками. Механизированное сварочное оборудование или его отдельные узлы и механизмы могут применяться и для изготовления других изделий. В качестве примера можно отметить разработку и изготовление разного рода разматывателей (рис. 5, а) или демонстрационного оборудования (рис. 5, б).

Плавный пуск, обеспечение стабильной частоты вращения шпинделя и крутящего момента на

протяжении длительного периода времени, возможность плавно регулировать частоту вращения шпинделя, возможность регулировать скорость набора нужной частоты его вращения и высокая надежность узлов вращателя как нельзя кстати подошли при решении технического задания по разработке комплекса для автоматической подводной сварки [7] и обеспечения погружения и поднятия сварочного автомата с глубины порядка 200 м, а также при разработке и изготовлении разматывателя для кабельных сборок комплекса глубоководной сварки, описанного в работе [8]. В свою очередь, конструкционная схема вертикального вращателя подходит для демонстрационного вращающегося подиума, используемого, например, на автомобильных выставках.

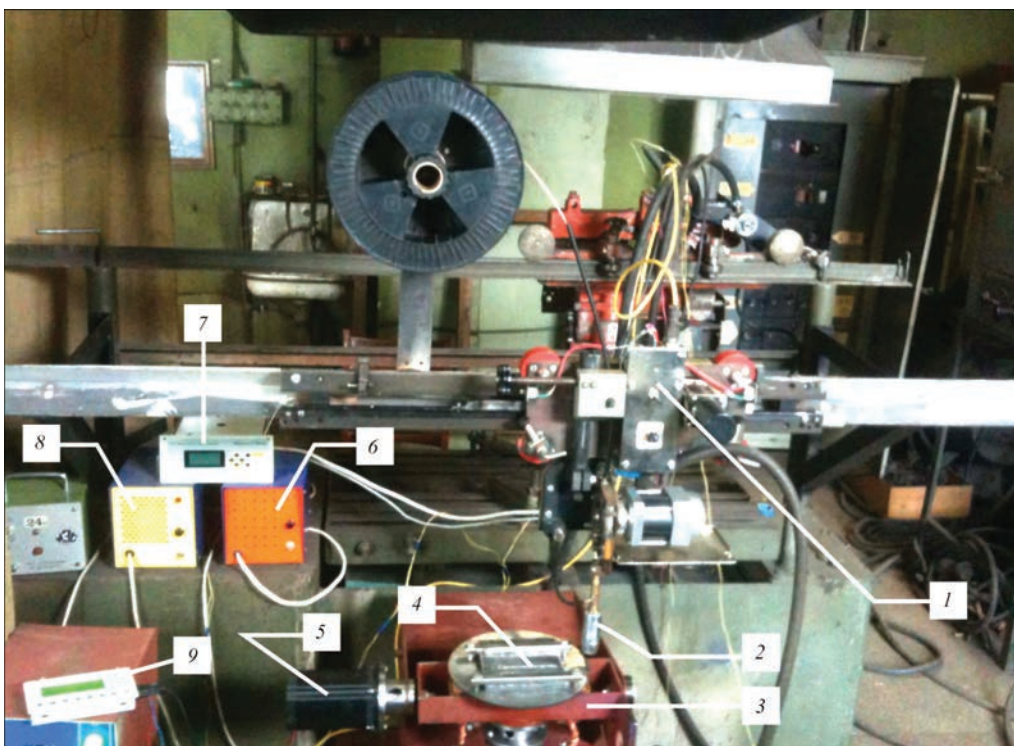


Рис. 6. Схема установки для наплавки с подвижной станиной: 1 — пульт управления перемещения горелки; 2 — горелка; 3 — станина; 4 — наплавляемая деталь; 5 — двигатель, сообщающий колебания изделию; 6 — блок питания пульта управления поз. 1; 7 — индикатор скорости перемещения горелки; 8 — блок питания двигателя поз. 5; 9 — программируемый пульт управления режимом работы двигателя поз. 5

Разрабатывается оборудование для новых технологий сварки и наплавки, в которых используются вибрационные процессы, позволяющие совершенствовать процесс наплавки с увеличением его производительности и получением мелкодисперсной структуры наплавленного слоя [9]. На рис. 6 приведена установка с управляемыми колебаниями наплавляемого изделия, разработанная и изготовленная на ПАО «ИЗМСО» за техническим заданием ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

### Выводы

1. Как и прежде, МСО остается одним из востребованных видов оборудования, необходимого для обеспечения автоматизации и механизации сварочных и родственных процессов, которое способствует увеличению производительности труда и обеспечению заданного качества.

2. Применение современных безредукторных систем подачи электродной проволоки на базе безколлекторных электродвигателей с управлением от компьютеризованных регуляторов обеспечивает работу управляемой импульсной подачей электродной проволоки и наделяет МСО новыми технологическими возможностями.

3. Использование современных шаговых и вентильных электроприводов, преобразователей частоты вращения вала асинхронных двигателей и другой электроники существенно облегчает интегрирование отдельного МСО в сварочно-наплавочные комплексы, установки и роботизированные центры под общим управлением.

4. Современное производство МСО имеет возможность изготавливать широкий спектр и модельную линейку серийного МСО, а также готово вести разработку и изготовление специального МСО, учитывая индивидуальные пожелания заказчиков.

*Авторы, благодарны главному конструктору В. И. Ленделу и всему коллективу ПАО «ИЗМСО» за предоставленную для данной статьи информацию.*

### Список литературы

1. Патон Б. Е. (ред.) (1974) *Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением*. Москва, Машиностроение.

2. Потапьевский А. Г., Сараев Ю. Н., Чинахов Д. А. (2012) *Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего*: монография. Томск, Изд-во Томского политехнического университета.
3. Pires J. Norberto, Loureiro Altino, Bölmsjö Gunnar. (2006) *Welding Robots. Technology, System Issues and Application*. Springer-Verlag London.
4. Sudnik W. (ed.) (2011) *Arc Welding*.
5. Low Kin Huat (ed.) (2006) *Industrial Robotics: Programming, Simulation and Application*, Pro Literatur Verlag, Germany/ARS, Austria.
6. ГОСТ 30295–96 *Кантователи сварочные. Типы, основные параметры и размеры*.
7. Максимов С. Ю., Лебедев В. А., Лендел И. В. (2015) Герметизация труб теплообменников «мокрой» сваркой на глубине 200 м. *Вопросы материаловедения*, 1, 199–204.
8. Лебедев В. А. (2015) Мехатронные и другие основные электротехнические системы механизированного оборудования для подводной сварки мокрым способом. *Электротехнические и компьютерные системы*, 17, 42–47.
9. Сараев Ю. Н., Лебедев В. А., Новиков С. В. (2016) Анализ существующих методов управления структурой металла сварного шва. *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*, 4, 1, 16–26.

И. В. Лендел<sup>1</sup>, В. О. Лебедев<sup>2</sup>, С. Ю. Максимов<sup>1</sup>, Г. В. Жук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН України.  
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ДКТБ ІЕС ім. Є. О. Патона НАН України.  
03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 15.  
E-mail: dktbpaton@gmail.com

### АВТОМАТИЗАЦІЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕХАНІЧНОГО ЗВАРЮВАЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ

У статті наведені приклади роботизації, автоматизації та механізації зварювальних та споріднених процесів на базі механічного зварювального устаткування (МЗУ). До складу комплексів і установок, що застосовуються для процесів зварювання або наплавлення, входять як серійні зразки МЗУ, так і спеціально створені, що враховують індивідуальність конструкції виробу і технологічні особливості його виготовлення. Показано широту вирішуваних завдань і можливість вітчизняного виробника МЗУ здійснювати розробку і створювати сучасні високотехнологічні комплекси та установки для зварювання і наплавлення. Відзначено можливість розробки спеціального МЗУ для нових технологій зварювання і наплавлення в складі роботизованих комплексів і автоматичних установок. Бібліогр. 9, рис. 5.

*Ключові слова:* дугове зварювання, наплавлення, механічне зварювальне обладнання, автоматизація, механізація

Поступила в редакцію 11.05.2017

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТЕЙЛОРОВСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В РЕЗОНАНСНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ

И. В. ВЕРТЕЦКАЯ, А. Е. КОРОТЫНСКИЙ

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

С целью моделирования электрических процессов в источниках для дуговой сварки резонансного типа предложено использовать дифференциально-тейлоровское преобразование, которое существенно упрощает вычислительные процедуры для анализа режимов и определения основных параметров вторичного контура. Суть этого метода заключается в преобразовании временной непрерывной функции оригинала в функцию изображения от дискретного аргумента, коэффициенты которой именуются дискретами. Точность полученных результатов определяется количеством дискрет, используемых на этапе анализа изображений. Библиогр. 6, рис. 1.

*Ключевые слова:* оригинал, изображение, дифференциально-тейлоровское преобразование, ДТ-модель, резонансный источник

Известно [1], что дифференциально-тейлоровское преобразование (ДТП), предложенное и изученное Г. Е. Пуховым, получило в последние годы широкое применение в задачах математического моделирования нелинейных электрических цепей, к которым относятся и источники для дуговой сварки. Суть метода ДТП заключается в преобразовании функции оригинала некоторого непрерывного аргумента, например, времени, в функцию изображения дискретного аргумента, коэффициенты которой именуются дискретами. Таким образом, осуществляется переход от дифференциальных уравнений электрических цепей к алгебраическим, что существенно упрощает вопросы моделирования и анализа полученных результатов.

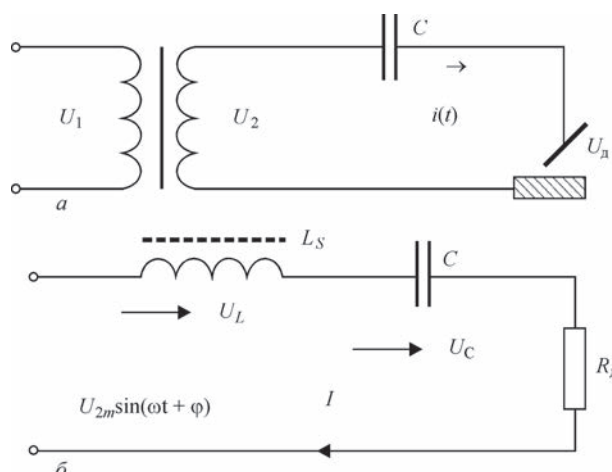
При этом осуществляется прямое и обратное преобразование функции  $x(t)$  непрерывного аргумента  $t$  в дискретную функцию  $X(k) = C_k$  дискретного аргумента  $k = 0, 1, 2 \dots n$ . Обычно указанная пара преобразований представляется в виде следующих выражений:

$$X(k) = \frac{H^k}{k!} \left[ \frac{d^k x(t)}{dt^k} \right]_{t=0} \leftrightarrow x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left( \frac{1}{H} \right)^k X(k),$$

где слева стоит прямое преобразование оригинала  $x(t)$  в преобразование  $X(k)$ , а справа обратное преобразование  $X(k)$  в  $x(t)$ .

Значения функции  $X(k)$  при конкретных значениях аргумента  $k$  называется дискретами ( $X(0)$  — нулевая дискрета,  $X(1)$  — первая дискрета и т. д.).

Используя предложенный Г. Е. Пуховым метод анализа и синтеза нелинейных электрических цепей, проведем исследование режимов работы сварочных источников  $LC$ -типа. В линейном приближении их работа описана достаточно подробно в работах [2, 3]. В предлагаемом сообщении ставится задача анализа работы этих устройств с учетом нелинейного характера реактивных и активных сопротивлений, образующих вторичный контур. Упрощенное схематическое изображение рассматриваемого устройства показано на рис. 1, а, а эквивалентная схема вторичного контура — рис. 1, б. Здесь приняты следующие обозначения:  $L_S$  — индуктивность рассеивания;  $C$  — электрическая емкость конденсаторного блока;  $R_d$  — нелинейное сопротивление дугового промежутка и соответственно падения напряжения на этих элементах  $U_L$ ,  $U_C$  и  $U_d$ .



Схематическое изображение устройства (а) и эквивалентная схема вторичного контура (б)



Уравнение, описывающее состояние такой схемы, как известно [4], имеет вид:

$$U_2(t) = U_L + U_C + U_d, \quad (1)$$

где

$$U_L = \frac{d\psi}{dt} = L_S(I) \frac{dI}{dt}, \quad U_C = \frac{1}{C} \left[ g_0 + \int_0^t I(t) dt \right],$$

$$U_d = R_d(I)I(t).$$

Если подходить строго и в уравнении (1) все три слагаемые рассматривать нелинейными относительно сварочного тока  $I(t)$ , получим нелинейное дифференциальное уравнение в следующем представлении:

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + k_1 \left( \frac{dI}{dt} \right) + k_2 I = 0, \quad (2)$$

где

$$k_1 = \frac{R_d}{L_S(I)}, \quad k_2 = \frac{1}{CL_S(I)}.$$

Как известно [5], анализ вынужденных колебаний в таких нелинейных  $RCL$ -цепях проводится методами хаотической динамики. В зависимости от выбора параметров цепи здесь возможны проявления детерминированного хаоса, однако это выходит за рамки данного сообщения.

Поскольку, как показывает опыт, значение электрической емкости  $C$  практически не зависит от тока в диапазоне рабочих режимов, то эту нелинейность из дальнейшего анализа исключим. Следовательно, с учетом того, что начальный заряд по условию равен нулю ( $g_0 = 0$ ), то напряжение на  $C$  определится выражением:

$$U_C = x_c I(t) = \frac{I(t)}{314C}.$$

Значение индуктивности рассеивания можно получить экспериментальным путем и задать ее таблично либо аппроксимировать квадратичным полиномом:

$$L_S(I) = k_0 + k_1 I + k_2 I^2.$$

Что же касается сопротивления дугового промежутка, то его также можно получить экспериментальным путем для конкретного исполнения сварочного источника, либо из известного соотношения  $U = U_0 + 0,04I(t)$  (ГОСТ 95–77), где  $U_0 = 20$  В для ручной дуговой сварки. Разделив правую и левую части на  $I(t)$ , получим  $R_d(I) = U_0 / I(t) + 0,04$ .

Таким образом, нелинейное уравнение сварочного контура может быть приведено к виду:

$$\frac{dI}{dt} (k_0 + k_1 I + k_2 I^2) + I \left( 0,04 + \frac{1}{314C} \right) + U_0 = U_{2m} \sin(\omega t + \varphi). \quad (3)$$

Решать это нелинейное дифференциальное уравнение будем методом ДТП [1].

Перевод уравнения цепи с учетом специфики работы сварочного источника в область Т-изображений по переменной времени  $t$  на отрезке  $0 \leq t \leq H$  дает следующую ДТ-модель:

$$\frac{k+1}{H} I(k+1) \left( k_0 \varphi(k) + k_1 I(k) + k_2 \sum_{l=0}^{l=k} I(k-l) I(l) \right) +$$

$$+ I(k) \left( 0,04 + \frac{1}{314C} \right) + U_0 \varphi(k) =$$

$$= \frac{(\omega H)^k}{k!} U_{2m} \left( \cos \varphi \sin \frac{\pi k}{2} + \sin \varphi \cos \frac{\pi k}{2} \right),$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, \infty,$$

где  $\varphi(k)$  — тейлоровская единица.

Зная начальную дискрету  $I(0) = i(0)$ , по этой формуле можно последовательно найти дискреты  $I(1), I(2), \dots, I(n)$ , затем представить решение в форме конечного отрезка степенного ряда:

$$i(t) = \sum_{k=0}^{k=n} \left( \frac{t}{H} \right)^2 I(k).$$

Точность результата будет зависеть от числа учитываемых дискрет, от параметров  $RLC$ -цепи, а также от начальной фазы  $\varphi$ , приложенного напряжения.

Необходимо отметить, что при переводе исходных уравнений в область изображений была использована таблица Г. Е. Пухова [1], а также ее уточнения, полученные в диссертационной работе Е. Д. Головина [6].

Таким образом, описанный метод может быть использован на завершающем этапе схемотехнического проектирования резонансных источников для дуговой сварки, когда по результатам схемного анализа выбираются и рассчитываются элементы  $LC$ -контура, обеспечивающие требования технического задания. Достоинством рассмотренного метода является то, что он дает возможность разработчику сварочного оборудования создавать алгебраические модели той же точности, что и исходные модели-оригиналы.

## Список литературы

1. Пухов Г. Е. (1986) *Дифференциальные преобразования и математическое моделирование физических процессов*. Киев, Наукова думка.
2. Лебедев В. К., Нарущквичус И. Р. (1971) Устойчивость горения дуги переменного тока в цепи с конденсатором. *Автоматическая сварка*, 4, 3–5.
3. Лебедев В. К., Коротынский А. Е. (1994) Дуга переменного тока в цепи с последовательно соединенными индуктивностью и емкостью. *Автоматическая сварка*, 12, 47–48.
4. Атабеков Г. И., Купаля С. Д., Тимофеев А. Б., Хухриков С. С. (1979) *Нелинейные электрические цепи*. Москва, Энергия.
5. Мун Ф. (1990) *Хаотические колебания*. Москва, Мир.

6. Головин Е. Д. (2004) *Математическое и численное моделирование нелинейных устройств и устройств с переменными параметрами*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск.

І. В. Вертецька, О. Є. Коротинський

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

ВИКОРИСТАННЯ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО  
ТЕЙЛОРІВСЬКОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ  
ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ  
В РЕЗОНАНСНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЖИВЛЕННЯ

З ціллю моделювання електричних процесів в джерелах для дугового зварювання резонансного типу запропоновано використовувати диференціально-тейлорівське перетворення, яке істотно спрощує обчислювальні процедури для аналізу режимів і визначення основних параметрів вторинного контуру. Суть цього методу полягає в перетворенні тимчасової безперервної функції оригіналу у функцію зображення від дискретного аргументу, коефіцієнти якої іменуються дискретами. Точність отриманих результатів визначається кількістю дискрет, використаних на етапі аналізу зображень. Бібліогр. 6, рис. 1.

*Ключові слова*: оригінал, зображення, диференціально-тейлорівське перетворення, ДТ-модель, резонансне джерело

Поступила в редакцию 26.04.2017

## ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

**Д. В. Степанов (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»)** защитил в специализированном совете НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского» 16 января 2017 г. кандидатскую диссертацию на тему «Дуговая наплавка износостойкого металла с использованием нанопорошков оксидов».

Диссертация посвящена поиску путей увеличения износостойкости и ресурса работы изделий, работающих в условиях трения металла по металлу и абразивного износа.

Разработаны схемы введения нанокomпонентов в сварочную ванну, приспособленные для условий наплавки и которые отличаются по форме и способу введения, в частности, в виде предварительно изготовленных спеченных стержней в виде смесей нанопорошков оксидов с железным порошком и непосредственно только нанопорошков. Скреплены предварительно грунтовкой смеси или только нанопорошки наносятся на пластину тонким слоем на ширину валика по длине наплавки.

Разработаны рациональные режимы механохимической обработки для получения гомогенной порошковой смеси с нано- и микрочастиц с помощью планетарной шаровой мельницы с дополнительным вакуумированием рабочих емкостей.

При наплавке высокохромистых композиций с повышенным содержанием углерода подтверждено положительное влияние на износостойкость объемных соотношений нанопорошков оксидов алюминия и титана, при которых износостойкость увеличивается в 2 раза, но применительно к этим композициям более эффективен диоксид кремния. Увеличение износостойкости более чем в 3 раза в этом случае может быть связано с формированием мартенситной структуры как более твердой по отношению к бейнитно-мартенситной.

При наплавке среднелегированных композиций установлено, что диоксид кремния более эф-

фективен по отношению к нанопорошкам  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$ , обеспечивая повышение износостойкости более чем в 4 раза, что связано с изменением бейнитной структуры на чисто мартенситную, что и определяет повышение износостойкости.

Установлено, что при наплавке высоколегированной композиции введение в сварочную ванну нанопорошковых материалов приводит к увеличению количества неметаллических включений в структуре наплавленного металла и формированию цепочек включений по границам зерен.

Установлено, что при наплавке среднелегированной композиции распределение неметаллических включений по размеру делится на три группы: включения размерами до 0,3, от 0,3 до 0,8 и более 0,8 мкм. Показано, что в исходном состоянии их объемная доля составляет 0,31 % и соответствует, в основном, соразмерному диапазону 0,07...0,85 мкм, существенно увеличивается при введении в сварочную ванну нанопорошка диоксида кремния и составляет в металле валика 0,56 %, с несколько меньшим размерным диапазоном (0,07...0,61 мкм).

По результатам анализа морфологии и химического состава включений для условий наплавки среднелегированной композиции установлено, что в исходном состоянии ядро включения содержит, в основном, алюмосиликат марганца, а при введении диоксида кремния рядом с ними находятся и включения оксида алюминия (корунда), что при увеличении их объемной доли, как более твердых составляющих структуры, и объясняет более эффективное воздействие нанопорошков оксидов кремния на износостойкость наплавленного металла.

Разработаны технологические рекомендации, учитывающие специфику введения нанокomпонентов в сварочную ванну и особенности технологий наплавки.

## ВЫСТАВКА «СВАРКА И РЕЗКА-2017»

4 апреля 2017 г. в Минске на Футбольном манеже состоялось открытие сразу четырех выставок: 17-й международной специализированной выставки «Сварка и резка-2017», 16-й международной специализированной выставки «Порошковая металлургия-2017», а также выставок «Металлообработка» и «Защита от коррозии. Покрытия». Организатор выставок — ЗАО «МинскЭкспо». Выставки открывали: первый заместитель министра промышленности Республики Беларусь Г. Б. Свидерский, руководитель аппарата НАН Беларуси П. А. Витязь, Генеральный директор ГНПО порошковой металлургии А. Ф. Ильющенко, заместитель председателя Постоянной комиссии по промышленности, топливно-энергетическому комплексу, транспорту, связи и предпринимательству Палаты представителей Национального собрания Республики Беларусь П. А. Соловьев, первый заместитель Председателя Государственного комитета по науке и технологиям А. А. Косовский, первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси С. А. Чижик.

Сварка и родственные ей процессы (наплавка, пайка, резка, напыление) широко используются всеми предприятиями машиностроения, энергетики, нефтехимии и строительства. Сварка незаменима при изготовлении сложных изделий из заготовок, выполненных прокаткой, ковкой или штамповкой, при использовании в конструкциях современных материалов: высокопрочных сталей, сплавов цветных металлов, пластмасс, керамики. Массовое применение сварочных технологий оказывает весомое влияние на экономику всех стран. Порошковая металлургия на протяжении многих лет была и остается эффективной технологией производства материалов, отвечающих требованиям развивающейся техники и производства. Эти материалы на основе тугоплавких, твердых и композиционных сплавов невозможно получить другими методами. Сегодня с развитием аддитивных технологий и востребованностью специальных порошковых материалов для них отрасль расширила свои возможности и успешно решает актуальные задачи. Этим объясняется популярность проводимых выставок, на которых была представлена возможность ознакомиться с последними достижениями в области сварки и родственных технологий, порошковой металлургии и защитных покрытий.

Проводимые выставки уникальны по своей тематике и составу участников, среди которых компании из Беларуси, России, Украины, Литвы, Турции, Франции, Чехии, Германии и Китая.

В ходе выставок участники получили уникальную возможность представить информацию о



своих достижениях, ознакомиться с новейшими разработками, расширить деловые контакты, обсудить возможность проведения совместных исследований, найти потенциальных потребителей научно-технической продукции.

Посетители выставки смогли познакомиться с масштабной экспозицией украинских производителей сварочных материалов, организованной Международной Ассоциацией «Сварка» (г. Киев), среди которых компании ООО «Витаполис», ООО «Сумы-Электрод» и ООО «ТМ. Велтек».

ООО «Витаполис» производит сварочные проволоки торговой марки ХОРДА, применяя современные технологии и оборудование. Изготавливаются проволоки для сварки углеродистых и низколегированных сталей, нержавеющей и жаростойких сталей, броневых сталей. Проволоки ХОРДА поставляются в соответствии со стандартами EN, ISO, AWS. Проволоки сплошного сечения диаметром 0,8...4,0 мм имеют маркировку СС, намотаны на катушки BS200, BS300, K415 с



Директор МАС А. Т. Зельниченко знакомит первого заместителя министра промышленности Республики Беларусь Г. Б. Свидерского с номенклатурой сварочных материалов украинских компаний





прецизионной намоткой, а также картонные бочки массой 250 и 500 кг. Система менеджмента качества соответствует ISO 9001.

ООО «Сумы-электрод» — производитель сварочных электродов специального и общего назначения для сварки ответственных конструкций, история которого начинается с 1930 г. Номенклатура изготавливаемых электродов насчитывает 175 марок для сварки различных сталей и сплавов, в том числе углеродистых и легированных, высокопрочных и теплоустойчивых, высоколегированных сталей и сплавов, никелевых сплавов, чугуна, а также для наплавки и резки. Предприятие оснащено швейцарским оборудованием замкнутого технологического цикла и современной лабораторно-исследовательской базой, позволяющей проводить весь комплекс исследований и испытаний в соответствии с требованиями на выпускаемую продукцию.

ОО «ТМ.ВЕЛТЕК» основано в 2001 г. как независимое производственное подразделение ООО «СП «ТМ.ВЕЛДТЕК» (1993 г.) и входит в группу компаний «Weldtech Group». Является крупнейшим специализированным производителем порошковых проволок для сварки, наплавки и напыления в Украине и входит в тройку наиболее крупных изготовителей в СНГ. Продукция ООО «ТМ.ВЕЛТЕК» сертифицирована в системе «УкрСЕПРО». Сегодня ООО «ТМ.ВЕЛТЕК» осуществляет регулярные поставки широкого спектра продукции (более 98 сертифицированных марок проволок диаметром 1,2...6,0 мм) на предприятиях металлургической и горнодобывающей отрасли, судостроения, машино- и вагоностроения и др. Качество продукции и надежность компании подтвержда-

ются многочисленными наградами национальных и международных выставок и рейтингов.

Интересные экспозиции представили ряд компаний. Отметим некоторые из них.

ООО «ТехПроинжиниринг» — официальный представитель в Республике Беларусь компании «Messer Eutectic Castolin» (Польша). Материалы, оборудование и технологии «Messer Eutectic Castolin» предназначены для ремонта, восстановления, повышения долговечности и износостойкости частей технологического оборудования, деталей машин и механизмов.

ООО «Оливер» (г. Минск) — многопрофильная компания, крупнейший в Беларуси производитель и поставщик сварочных материалов и сварочного оборудования.

ПАО «КЗЭСО» (Каховский завод электросварочного оборудования, г. Каховка, Украина) — производитель современного электросварочного оборудования, а также рельсосварочных машин и комплексов, путевой техники для строительства и ремонта железных дорог. ПАО «КЗЭСО» по производству оборудования для контактной стыковой сварки рельсов является мировым лидером.

ООО «Светлогорский завод сварочных электродов» (Беларусь) — лидер белорусского производства сварочных электродов. Последние находят постоянных покупателей в России, Украине, Казахстане и др. странах.

Участники и посетители выставок «Сварка и резка-2017», «Порошковая металлургия 2017», «Металлообработка» и «Защита от коррозии. Покрытия» получили дополнительный импульс для реализации в будущем самых смелых и новых проектов.

В. А. Дыбань, инж.

## ОЛІМПІАДА СТУДЕНТІВ ЗІ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСІВ І ТЕХНОЛОГІЙ

Згідно Наказу Міністерства освіти і науки України № 1495 «Про проведення Всеукраїнської студентської олімпіади...» 19–21 квітня 2017 р. в Центральноукраїнському національному технічному університеті (Кіровоградський національний технічний університет), м. Кропивницький, був проведений II етап Олімпіади «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій». Наведений етап проходив у два тури: теоретичний та технологічний. Для участі в Олімпіаді прибуло 105 студентів з 24 вузів України, які проходять підготовку за напрямом зварювання та за спорідненими спеціальностями.

20 квітня 2017 р. о 9.00 відбулося урочисте відкриття Олімпіади. З вступною річчю виступив проф. О. М. Левченко — проректор з наукової роботи, голова організаційного комітету II етапу Олімпіади. Він відмітив важливість проведення Олімпіади в справі підготовки кваліфікованих фахівців зварювального профілю і побажав всім її учасникам успішної роботи. Голова журі Олімпіади проф. В. В. Аулін розповів учасникам Олімпіади про виконання конкурсних завдань, а також про критерії оцінювання знань та навичок учасників Олімпіади.

Тривалість виконання тестових і практичних завдань складала по дві години. Відповіді на тестові завдання заносили в спеціально розроблену програму і до бланку відповідей. Перший тур включав письмове виконання творчого завдання стосовно використання відповідної зварювальної технології, що вимагало поглиблених знань за фахом. Для його виконання студенти повинні були обґрунтувати і запропонувати оптимальну технологію відновлення зношених деталей шляхом використання зварювання та споріднених процесів. Студентам надавалася можливість користуватися довідковою літературою, а також програмним забезпеченням Auto CAD, MS Office, «Компас», «Inventor» і Internet. Робота кожного студента кодувалася. Після проведення I теоретичного туру був проведений II практичний тур, що полягав у виконанні студентами зварювання горизонтальних, вертикальних та інших швів. У другому турі прийняли участь майже всі учасники Олімпіади. При визначенні переможців члени журі виявляли вміння використовувати практичні навички зі зварювання, що оцінювалося за рівнем якості виконання швів. Переможці Олімпіади визначалися за сумою отриманих ними балів. При підведенні підсумків враховувалась оригінальність вирішення конкретних задач, аргументованість і повнота їх обґрунтування, а також наявність елементів винахідництва.



В процесі проведення Олімпіади були впроваджені наступні новації: тематика тестових завдань узгоджувалася з провідними спеціалістами зварювальних виробництв; зміст завдань та обробка даних при підведенні підсумків виконували за допомогою комп'ютерів; у другому турі Олімпіади студентам була надана можливість практично реалізувати свої вміння та навички.

Перше місце II етапу Олімпіади зайняли наступні студенти: В. Ю. Мірний (Кіровоградський національний технічний університет); Т. О. Акритова (Запорізький національний технічний університет); Д. Р. Балянда (Хмельницький національний університет); М. В. Волков (Тернопільський національний університет ім. Івана Пулюя). Друге місце: В. О. Івлєв (Харківський національний університет сільського господарства ім. Петра Василенка); О. М. Панченко (Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»); М. М. Іванків (Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу). Третє місце дісталось: К. В. Бучковському (Вінницький національний технічний університет); Р. В. Матвійчуку (Житомирський національний аграрний університет); Є. І. Омельченко (Одеський національний політехнічний університет); А. Е. Репашевському (Приазовський державний технічний університет); О. В. Лопаті (Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»); В. Д. Тульчій (Миколаївський національний аграрний університет).

В цілому організаційний рівень Олімпіади в порівнянні з минулим роком був вищим, а кількість студентів-учасників була більшою. Проведення Олімпіади значною мірою сприяло підвищенню рівня підготовки кадрів зварювального профілю, що доцільно для підприємств і організацій України.

В. В. Дмитрик, д-р техн. наук

# ХVI МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ – 2017

## МЕЖДУНАРОДНЫЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВЫСТАВКИ



**МЕТАЛЛО-  
ОБРАБОТКА**



**УКРСВАРКА**



**УКРПРОМ  
ТІТЕХ**



**УКРПРОМ  
АВТОМАТИЗАЦІЯ**



**БЕЗОПАСНОСТЬ  
ПРОИЗВОДСТВА**



**ГИДРАВЛИКА  
ПНЕВМАТИКА**



**ПОДШИПНИКИ**



**УКРУТІБЬ**



**ОБРАЗЦЫ, СТАНДАРТЫ,  
ЭТАЛОНЫ, ПРИБОРЫ**



**ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОЕ  
СКЛАДСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

**ufi**  
Approved  
Event



**ОРГАНИЗАТОР:**

**Международный выставочный центр**

Генеральный  
информационный партнер:

**ОБОРУДОВАНИЕ  
И ПРИБОРЫ**  
для промышленности

Технический  
партнер:

**RentMedia**

**21-24  
НОЯБРЯ**



+38 044 201-11-65, 201-11-56, 201-11-58  
e-mail: [maria@iec-expo.com.ua](mailto:maria@iec-expo.com.ua)  
[www.iec-expo.com.ua](http://www.iec-expo.com.ua), [www.мвц.укр](http://www.мвц.укр)  
[www.tech-expo.com.ua](http://www.tech-expo.com.ua)

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



## TPS/i Robotics — идеальная сварочная система для роботизированного применения\*

Компания ООО «Фрониус Украина» представляет на украинском рынке принципиально новую сварочную платформу TPS/i Robotics для решения различных сварочных задач, которая взаимодействует с пользователем на интеллектуальном уровне, оказывает надежную поддержку при настройке параметров, выборе подходящих опций и гарантирует непревзойденные возможности для дуговой сварки.

TPS/i Robotics — это веха в автоматизированном сварочном производстве. Каждый автоматизированный процесс сварки начинается с правильного программирования параметров процесса и системы управления роботом. Даже малейшие неточности могут вызвать значительное снижение качества, что, в свою очередь, приводит к повышению расходов на гарантийное обслуживание, особенно в автомобилестроении. Автоматические процессы сварки предоставляют очевидные преимущества — возможность установки уровня качества, затрат и длительности процессов, а также высокую степень воспроизводимости результатов. Множество внешних факторов могут повысить уровень брака или длительность простоев и, как следствие, снизить общую прибыльность производства. Если неполадку не выявить и не устранить немедленно, она будет повторяться снова и снова. Сложность заключается в том,



Новый эталон эффективности, качества и надежности. TPS/i Robotics взаимодействует с пользователем на интеллектуальном уровне и оказывает надежную поддержку при настраивании параметров, выборе подходящих опций

что роботы не обладают когнитивными возможностями человека, чтобы самим оценить проблему. Серия TPS/i Robotics, в которой реализованы интуитивные средства управления с помощью текстового дисплея, предварительно заданные характеристики для каждой области применения и индивидуальное программирование посредством графического пользовательского интерфейса, устанавливает новые стандарты взаимодействия между человеком и машиной.

Инновационная система TPS/i Robotics обеспечивает усовершенствование процесса сварки во всей производственной среде. Она предоставляет уникальные преимущества в плане эффективности, качества и надежности автоматических сварочных производственных линий и гарантирует недостижимый ранее уровень продуктивности.

Программная настройка, скорость сварки и возможности технического обслуживания обеспечивают высочайшие уровни конкурентоспособности и рентабельности в современном серийном производстве. Программирование новых процессов, переналадка системы и переход от одной стадии процесса к другой могут потребовать много времени. Что касается настройки, технического обслуживания, управления и переналадки, система TPS/i Robotics предлагает множество усовершенствований, позволяющих свести к минимуму дорогостоящие простои.

Идеальное взаимодействие сварочных процессов (LSC и PMC) в сочетании с интеллектуальными стабилизаторами проплавления и длины дуги обеспечивают более быструю и качественную работу, а также низкие уровни брака. Функция стабилизации проплавления обеспечивает равномерное проплавление и постоянную малую длину дуги, а значит, высокую скорость сварки. Благодаря всем перечисленным преимуществам TPS/i Robotics является самой эффективной сварочной системой для автоматизированного производства.

Одним из новых достижений фирмы Fronius является



Система TPS/i Robotics доступна для укомплектовки любой модели сварочного робота

\* Статья на правах рекламы.



Компания Fronius расширяет возможности сварочной системы TPS/i Robotics за счет нового дополнительного пакета для поддержки чрезвычайно стабильного процесса сварки Cold Metal Transfer (CMT)

ся реализация инновационного сварочного процесса CMT на базе системы TPS/i Robotics. Система, которая специально предназначена для роботизированной сварки, теперь может быть переоборудована для поддержки чрезвычайно стабильного процесса сварки Cold Metal Transfer (CMT) при помощи нового дополнительного пакета. Благодаря новому процессу CMT, пользователи смогут оценить сочетание высочайшего и воспроизводимого качества сварных швов, максимальную скорость сварки и множество областей применения.

В модели TPS/i CMT Robotics компании Fronius объединяются преимущества новейшей сварочной платформы MIG/MAG с достижением стабильной дуги. Сварочный процесс Cold Metal Transfer обеспечивает выдающиеся результаты при сварке различных металлов, а инновационная сварочная платформа TPS/i MIG/MAG впечатляет широким набором настроек и возможностей применения. Интеллектуальная модульная система состоит из взаимосвязанных и полностью синхронизированных компонентов, которые специально разработаны с учетом требований роботизированной сварки. Сварочные системы TPS/i с установленными пакетами Standard и Pulse можно легко модернизировать для поддержки процесса CMT. По сравнению с другими сварочными процессами MIG/MAG процесс CMT характеризуется значительно меньшим тепловым воздействием и обеспечивает непрерывную регулировку температуры от низких до высоких значений. Это гарантирует очень высокую стабильность дуги и значительно меньшее образование брызг даже при высоких скоростях сварки. Этот процесс имеет широкий диапазон применений, включая сварку тонких металлических листов и листов средней толщины (от 0,5 до 4 мм), корневые проходы, сварку оцинкованной стали и специальные соединения из таких металлов, как медь, цинк, титан и сталь с алюминием. В сочетании с интеллектуальной системой TPS/i процесс CMT еще больше расширяет возможности применения системы. Многочисленные настройки позволяют точно регулировать тепловое воздействие во время сварки, а также оптимизировать перекрытие зазоров и профиль проплавления.

Сварочные системы Fronius всегда считались отраслевым стандартом высочайшего качества. Главная цель — выполнять кажущиеся невозможными сварные соединения между металлами. Кроме набора функций, улучшающих параметры сварочной дуги, TPS/i Robotics обеспечивает полное документирование процесса. Обновления системы и новые характеристики можно устанавливать непосредственно по сети или через интерфейс USB. Благодаря использованию устройства WeldCube, которое объединяет все источники тока на производственной линии и записывает нужные данные, можно реализовать возможности оптимизации и выявить ошибки в производственном процессе. Контроль и проверка качества — важные составляющие анализа производственного процесса.



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

## Оборудование для автоматической дуговой сварки\*

Предприятие ООО «НАВКО-ТЕХ» (г. Киев, Украина) производит автоматические установки и робототехнологические комплексы для дуговой МИГ, МАГ и ТИГ-сварки и наплавки по индивидуальным проектам.

На сегодня более трехсот единиц оборудования, разработанного и поставленного предприятием, успешно эксплуатируется на производствах, серийно выпускающих разнообразные сварные конструкции, среди которых:

- корпуса огнетушителей, насосов, бойлеров, двигателей, гидроцилиндров;
- детали ж/д стрелочных переводов;
- диски автомобильных колес;
- трубы для вентиляции и дымоходов.

Оборудование, производимое фирмой «НАВКО-ТЕХ», по своим техническим характеристикам и надежности не уступает лучшим зарубежным аналогам, при этом выгодно отличаясь от них ценой, а также стоимостью наладки и обслуживания.

*Наша главная цель:* производство сверхнадежного оборудования, которое отвечает всем пожеланиям наших клиентов, а также передовым мировым технологиям. Это достигается благодаря выбору оптимального уровня автоматизации, что позволяет обеспечить рациональную конфигурацию и приемлемую для заказчика стоимость оборудования.

Наши сотрудники имеют более чем 25-летний опыт работы в области технологии и оборудования дуговой сварки, его монтажа и технического обслуживания на крупнейших предприятиях Украины, России, Беларуси, Казахстана, Молдовы и стран Балтии.

Сварочные автоматы, выпускаемые фирмой, можно условно разделить на три типа:

к **первому типу** относятся однокоординатные сварочные установки, в которых взаимное перемещение рабочего инструмента (горелки) и изделия выполняется по прямолинейной или круговой траектории. Изделие при этом может быть неподвижным, а сварка выполняется горелкой, которая вращается или перемещается прямолинейно, или наоборот — вращается или перемещается изделие. В таких установках автоматически, по заданной контроллером программе, выполняется включение вращения или перемещения механизмов, включение сварки, контроль их состояния и пр. Примеры таких установок представлены на рис. 1 и 2.

Автоматы **второго типа** (рис. 3, 4) имеют от двух до четырех степеней подвижности, одна из которых обеспечивает вращение или кантовку ( $V$ ) изделия, а остальные — транспортные перемещения горелки по одной ( $X$ ), двум ( $X$  и  $Y$ ) или трем ( $X$ ,  $Y$  и  $Z$ ) осям. В таких установках обеспечивается контурное управление перемещением горелки по линейной или криволинейной траектории с заданием требуемой относительной скорости, а также параметров колебаний горелки.



Рис. 1. Установка **АС360** для автоматической дуговой МИГ-сварки бобышек гидроцилиндров



Рис. 2. Установка **АС305-1М** для автоматической дуговой МИГ-сварки гидроцилиндров

\* Статья на правах рекламы.



Способ программирования траектории такой же, как и в роботах — «от точки к точке», при котором оператор установки перемещает горелку с помощью переносного пульта в начало и конец свариваемого или наплавляемого участка, записывает координаты этих точек (X, Y, Z, V) в память контроллера, выбирает параметры сварки или наплавки и включает программу работы установки. С целью повышения производительности сварка или наплавка может выполняться двумя горелками.

**Третий тип** — робототехнологические комплексы. Их применение целесообразно для сварки серийно выпускаемых однотипных изделий со швами, различным образом ориентированными в пространстве.

В зависимости от конструкции изделия робототехнологические комплексы оснащаются кантователями, вращателями, линейными расширителями зоны обслуживания робота, поворотными столами и др. Примеры комплексов представлены на рис. 5 и 6.

Уже более 10 лет предприятие «НАВКО-ТЕХ» в своих робототехнологических комплексах применяет промышленные роботы Fanuc, Япония — мирового лидера роботостроения.

Также, как установки, наши комплексы безотказно работают на многих предприятиях Украины, России и Казахстана.

*С более подробной информацией  
о предприятии «НАВКО-ТЕХ»  
и описанием выпускаемых им установок  
и робототехнологических комплексов  
можно ознакомиться на сайте:  
<http://www.navko-teh.kiev.ua>*

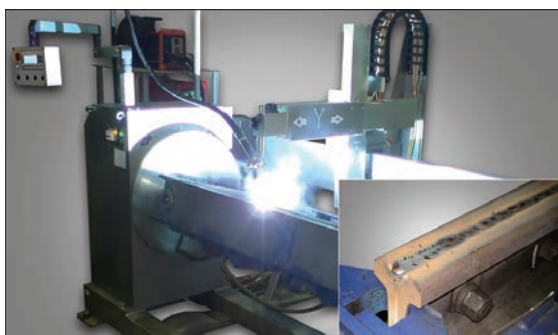


Рис. 3. Установка **AC364** для автоматической дуговой сварки продольного шва рельсовой части сварной крестовины

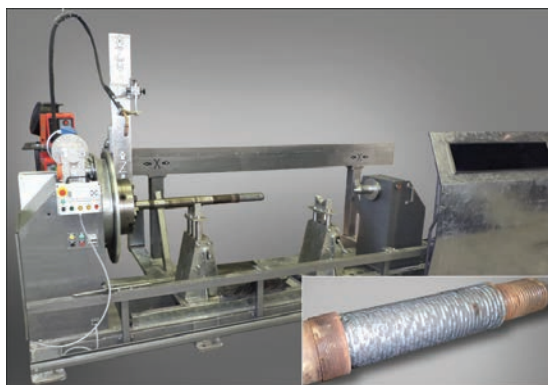


Рис. 4. Установка **AC354** для автоматической восстановительной МИГ/МАГ-наплавки роторов двигателей и насосов



Рис. 5. Робототехнологический комплекс **PK754** для МИГ-сварки кронштейнов и опор с баками гидроаккумуляторов

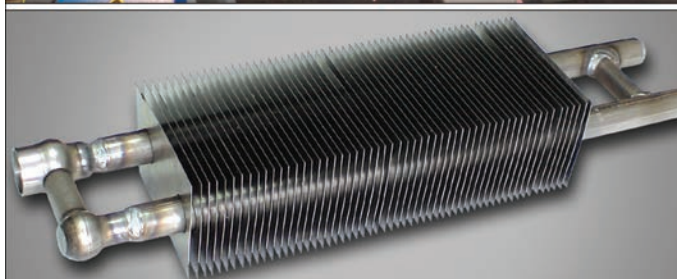


Рис. 6. Робототехнологический комплекс **PK754-3** для МИГ/МАГ-сварки нагревателей

## Гибкое производство сварных корпусов легкобронированных боевых машин из укрупненных узлов

В настоящее время в мире наблюдается тенденция увеличения применения в региональных вооруженных конфликтах легкобронированных боевых машин. В то же время в Украине до сих пор отсутствует централизованное производство, способное удовлетворить потребность в сварных корпусах легкобронированных колесных и гусеничных машин, что отрицательно влияет на обороноспособность страны и снижает привлекательность Украины на мировом рынке этого вида военной техники.

Сварной корпус современной легкобронированной машины — это сложная объемная конструкция весом до 5 т, состоящая из более чем 2 тыс. деталей. Общая длина сварных швов более 800 м. Серийное изготовление такого изделия представляет сложную техническую и производственную задачу. Опыт использования новых броневых материалов, производимых в Украине и других странах для изготовления корпусов отечественной легкобронированной техники, подтверждает их высокие служебные качества. Вместе с тем сварка этих сталей в реальных производственных условиях выявила ряд серьезных вопросов, требующих проведения всесторонних исследований. Основные трудности, возникающие при сварке таких сталей, связаны с их склонностью к образованию горячих и холодных трещин. Кроме того, технологический процесс сварки (сварочные материалы, режимы сварки, условия подогрева соединений и их термической обработки после сварки) должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить не только высокую технологическую прочность сварных соединений, но и необходимый комплекс их последующих служебных свойств.

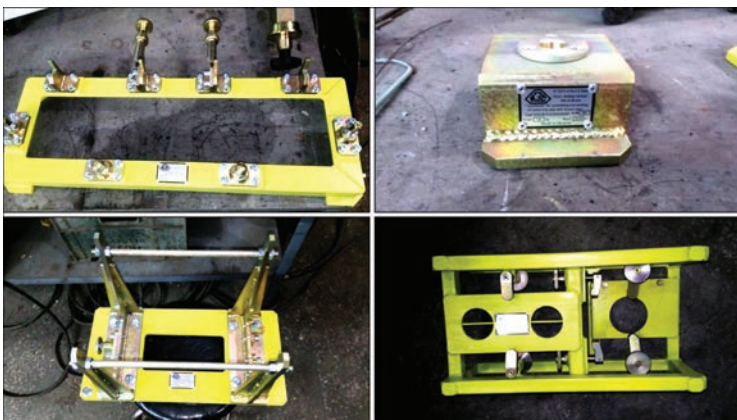
Согласно ныне действующей технологии корпус сваривается последовательно, подетально на стационарном стенде, представляющем собой стапель с большим количеством вспомогательных технологических приспособлений, которые существенно затрудняют работу сварщиков. При этом 80...85 % сварных швов приходится выполнять на крутонаклонных, вертикальных и потолочных плоскостях. Выполнение таких швов достаточно трудоемко и сложно для исполнения и может качественно выполняться только сварщиками высокой квалификации. При этом производительность одного стенда составляет примерно один корпус в месяц. При необходимости выпуска корпусов другого типа стационарные стенды требуют полного переоснащения.



Легкобронированная колесная машина

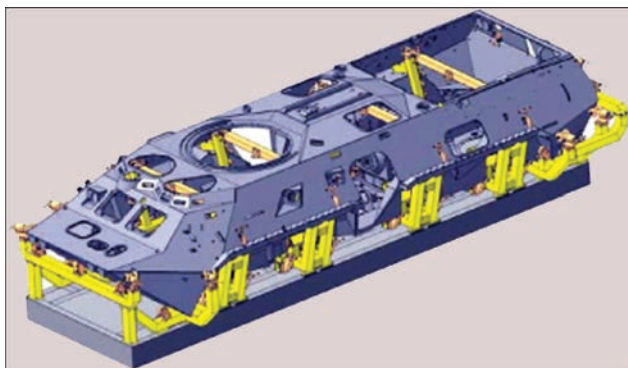


Установка для сборки и сварки навесных баков



Стенды для создания промежуточных составных частей легкобронированных колесных машин





Стапель общей сборки и сварки корпуса из укрупненных узлов



Установка для сборки и сварки элементов моторного отсека



Пример сварочного участка для создания укрупненного узла сварного корпуса

Специалистами ГП «ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона» разработана технология, позволяющая создать переналаживаемое, поточно-позиционное промышленное производство сварных корпусов легкобронированных колесных и гусеничных машин.

Разделение сварного корпуса на отдельные составные части (секции) производится с учетом трудоемкости изготовления секций, имея в виду достижение сбалансированности этого показателя между отдельными секциями. Технология создания сварного корпуса из укрупненных составных частей (секций), которые изготавливаются

на отдельных производственных участках, позволяет более рационально использовать производственные площади, обеспечивать равномерную загрузку рабочих мест и операторов (сварщиков) и, соответственно, повышать производительность труда, экономить энергоресурсы и сварочные материалы, а также обеспечивать ритмичность работы всего сварочного производства корпусов. Использование такой технологии позволяет увеличить производительность изготовления корпусов до 20 шт. в месяц (при двухсменной работе), значительно снизить требования к квалификации сварщиков и повысить качество сварных соединений.

Также предлагаемая технология позволяет быстро (за сутки) переходить к выпуску корпусов другой модификации (модели). Для этого нужно в специальном технологическом оборудовании произвести смену сборочно-сварочных устройств, а все остальное оборудование, стоимость которого составляет 85...90 % общей стоимости производственных участков, остается неизменным. Кроме того, в зависимости от потребностей производства, элементы линии могут изготавливаться как с ручным управлением, так и с автоматизированным, в том числе с использованием роботов.

ГП «ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ» выполняет работы по договорам с ГП «Укрспецэкспорт» по разработке и изготовлению установок для создания отдельных составных частей корпуса легкобронированной колесной машины по технологии, разработанной в ГП «ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона». В рамках данных договоров ГП «ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ» совместно с ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона разработало, изготовило и поставило Заказчику элементы поточно-позиционной линии для сварки укрупненных узлов легкобронированной колесной машины. Создание установок для этих укрупненных узлов лишь малая часть возможностей разработанной технологии.

Г. В. Жук, А. В. Семененко, И. И. Комашня  
(ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона),  
А. В. Степахно (ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона)

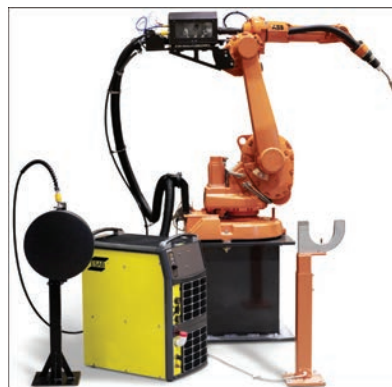


## Комплексные решения компании ESAB для роботизированной сварки и резки металлов

Роботизация производства не обязательно должна быть долгим и дорогостоящим процессом с множеством препятствий. Этот процесс не будет сложным, если обеспечено хорошее планирование и выбран правильный партнер с правильными решениями. Подтверждая звание одного из лидеров отрасли, ESAB предлагает комплексные решения по роботизации процессов сварки и резки для применения во всех отраслях промышленности.

### За и против

Для принятия положительного решения о внедрении роботизированной сварки на предприятии требуется наличие четырех ключевых факторов: высокий объем выпускаемых деталей; повторяющиеся задачи сварки; наличие эксперта в области программирования на предприятии, чтобы работать с программным обеспечением робота; знания в области сварки для точной настройки роботизированного процесса.



Хотя роботизированные сварочные решения выгодны для предприятий, производящих большой объем деталей, зачастую у них имеется только часть вышеперечисленных параметров для того, чтобы сделать процесс роботизированной сварки эффективным и прибыльным.

Мелкие производители часто говорят, что программирование сварочных роботов занимает больше времени, чем время, необходимое для производства деталей. Автоматизация сварки деталей низкого объема не обязательно дает наилучшую немедленную отдачу от инвестиций, но это становится решающим фактором, когда производители смотрят на промышленные и трудовые тенденции.

Так и случилось с одним из заказчиков роботизированного решения компании ESAB.

### Пример из практики

Компания является крупным производителем техники для сельскохозяйственных нужд.

Несколько фактов о процессе сварки до внедрения роботизированного комплекса на предприятии:

- ♦ нехватка опытных сварщиков являлась серьезной проблемой для промышленного производства. И это правда — большое количество производственных компаний вынуждены отказываться от новых контрактов по увеличению производимых изделий только потому, что у них не хватает квалифицированных рабочих;
- ♦ отсутствие должного уровня автоматизации операций производства — более 90 % всех операций выполнялись вручную, из-за этого страдала эффективность производства;
- ♦ стоимость квалифицированных кадров достаточно высока, что по мере роста затрат на рабочую силу и подталкивало предприятие к принятию решения об инвестициях в роботизацию сварочных процессов;
- ♦ не всегда корректная сборка деталей под сварку (разные зазоры, неравномерная кромка деталей, полученные после операции резки).

Каждый раз, когда предприятию нужно было поменять катушку, впустую расходовалось драгоценное рабочее время роботизированной системы. Но не только сама замена отбирала время. Зачастую новую катушку необходимо было доставить с другого конца цеха. Это означало, что 10 мин простоя оборачивались 20 или более минутами. Вы можете представить эффективное производство, скажем, автомобильного завода с планом выпуска автомобилей 100 ед/ч, который позволяет себе подобную потерю времени? Конечно, нет!

Проведя анализ основных факторов, ESAB предложил предприятию роботизированный комплекс на основе 6-ти осевого робота с полкой кистью, датчиком слежения за сварочным стыком, мощной, выдерживающей токи до 500 А, сварочной горелкой серии ESAB RT 82W с водяным охлаждением и надежным механизмом подачи сварочной проволоки ESAB Aristo Robofeed 3004HW. Комплекс также оснащен многофункциональным источником сварочного тока ESAB Aristo 5000iW с водяным охлаждением, панелью ESAB U8\_2 с расширенными возможностями по выбору синергетических линий и эффективной в использовании бескаркасной упаковке сварочной проволоки из углеродистой стали ESAB Marathon Pac, позволившей дополнительно сократить временные затраты на смену катушек. Суммируя итоги внедрения одного роботизированного комплекса по сварке, отметим, что предприятие получило систему, позволившую выполнять работу четырех человек в смену, сократить фонд заработной платы и фонд социальных выплат, существенно снизить затраты на сварочную проволоку, решить проблемы с качеством выпускаемой продукции, повысить свой рейтинг среди заказчиков — все это было достигнуто благодаря внедрению совместно с компанией ESAB самых передовых технологий и оборудования в сварочном производстве.

Обратитесь к нашим специалистам и узнайте, как ESAB может помочь вашему предприятию снизить затраты и увеличить производительность.

Василий Кузьминов,  
руководитель направления «Робототехника»



ООО «ЭСАБ Украина»  
04073 Киев, просп. С. Бандеры, д. 9, оф. 3-202  
тел.: (38044) 568 51 66; факс: 583 55 67  
E-mail: info@esab.com.ua; www.esab.com

# ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

www.patonpublishinghouse.com

Журналы  
Труды конференций  
Сборники  
Книги

## ЖУРНАЛЫ



**Журнал «Автоматическая сварка»**, 12 выпусков в год, издается с 1948 г. Тематика: сварка, термическая резка, наплавка, пайка, нанесение защитных покрытий и другие родственные процессы.



**Журнал «The Paton Welding Journal»**, 12 выпусков в год, издается с 2000 г. (полный перевод журнала «Автоматическая сварка» на английский язык).



**Журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»**, 4 выпуска в год, издается с 1989 г. Тематика: методы и разработки в области технической диагностики и неразрушающего контроля.



**Журнал «Современная электрометаллургия»**, 4 выпуска в год, издается с 1985 г. Тематика: специальные процессы переплава – ЭШТ, ЭЛП, ПДТ, ВДТ, ВИП.

## СБОРНИКИ



**ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО.** – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2017. – 254 с. Выпуск четвертый.



**ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО.** – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2014. – 270 с. Выпуск третий.



**ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО.** – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2011. – 324 с. Выпуск второй.



**НАПЛАВКА. ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ** / Составители: И.А. Рябцев, И.А. Кондратьев, Е.Ф. Переплетчиков, Ю.М. Кусков. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 2015. – 402 с.



**СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.** – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2014. – 168 с.



**СВАРКА И НАПЛАВКА МЕДИ И СПЛАВОВ НА ЕЕ ОСНОВЕ** / Составители: В.М. Илюшенко, Е.П. Лукьянченко. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2013. – 396 с.



**МЕТАЛЛУРГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ И СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ** / Составители: И.К. Походня, А.С. Котельчук. – Киев: Академперіодика, 2012. – 526 с.



**СТЫКОВАЯ СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ.** – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2011. – 132 с.

## КНИГИ



**ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ ХАОС В НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ.** В.Н. Сидорец, И.В. Пентегов. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2013. – 272 с.



**ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНА РЕНТГЕНОГРАФІЯ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ У МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛАХ.** О.В. Білоцький. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2012. – 224 с. (укр. яз.).

## ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИЙ



**I–VIII Международные конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»** (2002–2016 гг.). (Восемь выпусков).



**Труды Международной конференции «Сварочные материалы»**, 16–18 июня 2014, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона; журнал «Автоматическая сварка», № 6–7, 2014. – 204 с.



**I–VII Международные конференции «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов»** (2003–2015 гг.). (Семь выпусков).



**Труды Международной конференции «Наплавка. – Наука. Производство. Перспективы»**, 15–17 июня 2015, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона; журнал «Автоматическая сварка», № 5–6, 2015. – 160 с.



**Труды Международной конференции «Современные технологии сварки»**, 13–15 июня 2016, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона; журнал «Автоматическая сварка», № 5–6, 2016. – 184 с.

Заказы просьба направлять в редакцию журнала  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
Тел./факс: +38(044) 200-82-77, 200-54-84



Подписка на журнал «Автоматическая сварка» [www.patonpublishinghouse.com/ru/journals/as](http://www.patonpublishinghouse.com/ru/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](http://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](mailto:journal@paton.kiev.ua)).



**Правила для авторов, лицензионные соглашения, архивные выпуски журналов на сайте издательства [www.patonpublishinghouse.com](http://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 18.05.2017. Формат 60×84/8. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 17,02. Усл.-отт. 20,00. Уч.-изд. л. 20,08 + 4 цв. вклейки.  
Печать ООО «Фирма «Эссе».  
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.