

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

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

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

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

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

ИЗДАТЕЛЬ:

Международная ассоциация
«Сварка»

Адрес редакции:

03680, Украина, Киев-150,
ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАНУ
Тел.: (38044) 287 6302, 529 2623
Факс: (38044) 528 3484, 529 2623
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Редакторы:

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

Свидетельство о государственной
регистрации КВ 4788
от 09.01.2001

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

За содержание рекламных
материалов редакция журнала
ответственности не несет
Цена договорная

СОДЕРЖАНИЕ

НОВОСТИ 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Махненко В. И., Романова И. Ю. Расчетное прогнозирование долговечности боковой рамы грузового железнодорожного вагона при переменных циклических нагрузках 5
Фальченко Ю. В., Муравейник А. Н., Харченко Г. К., Федорчук В. Е., Гордань Г. Н. Сварка давлением микродисперсного композиционного материала $AMg5 + 27\% Al_2O_3$ с применением быстрозакристаллизованной прослойки эвтектического состава $Al + 33\% Cu$ 10
Цыбулькин Г. А. Оценка качества процесса саморегулирования дуги 15
Черная Т. И., Царюк А. К., Сиора А. В., Шелягин В. Д., Хаскин В. Ю. Лазерная сварка корневых швов соединений толстого металла теплоустойчивой стали 19
Долиненко В. В., Скуба Т. Г., Коляда В. А., Шаповалов Е. В. Оптимальное управление формированием усиления сварного шва 23

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Кучук-Яценко С. И., Нейло Ю. С., Гавриш В. С., Гуцин К. В. Перспективы повышения энергетических показателей при контактной стыковой сварке (Обзор) 30
Руденко П. М., Гавриш В. С. Портативная система контроля и управления процессом контактной точечной сварки 36
Жудра А. П., Кривчигов С. Ю., Петров В. В. Технология широкослойной наплавки крупногабаритных коленчатых валов 41
Роянов В. А., Коросташевский П. В. Определение дополнительных сопротивлений перемещению листовых полотнищ по неподвижному роликовому полю линий сборки и сварки 46

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Арктическая премьера СМТ процесса 52
По страницам журнала «Welding Journal», 2009, № 4 54

ХРОНИКА

XIII Республиканская научно-техническая конференция сварщиков Казахстана 57
Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин (итоговая научная конференция в ИЭС им. Е. О. Патона) 58
Ю. Н. Ланкину — 75 61

ИНФОРМАЦИЯ

Программа лояльности ООО «Фрониус Украина» в кризисный период и ее итоги 63

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B. E. PATON

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

THE INTERNATIONAL
EDITORIAL COUNCIL:

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

FOUNDERS:

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

PUBLISHER:

International Association «Welding»

Address of Editorial Board:

11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine

Tel.: (38044) 287 63 02, 529 26 23

Fax: (38044) 528 04 86

E-mail: journal@paton.kiev.ua

http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:

E. N. Kazarova, T. V. Yushchina

Electron galley:

A. I. Sulima,

I. R. Naumova,

I. V. Petushkov

State Registration Certificate

KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved

This publication and each of the articles

contained here in are protected

by copyright

Permission to reproduce material

contained in this journal must be obtained

in writing from the Publisher

CONTENTS

NEWS 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Makhnenko V. I., Romanova I. Yu. Calculation prediction of service life of lateral frame of freight railway car at alternating cyclic loads 5
Falchenko Yu. V., Muraveinik A. N., Kharchenko G. K., Fedorchuk V. E., Gordan G. N. Pressure welding of micro-dispersed composite material AMg5 + 27 % Al₂O₃ with application of rapidly solidified interlayer of eutectic composition Al + 33 % Cu 10
Tsybulkin G. A. Evaluation of quality of a self-adjusting arc process 15
Chyornaya T. I., Tsaryuk A. K., Siora A. V., Shelyagin V. D., Khaskin V. Yu. Laser welding of root welds of joints of heat-resistant steel thick metal 19
Dolinenko V. V., Skuba T. G., Kolyada V. A., Shapovalov E. V. Optimum control of weld reinforcement formation 23

INDUSTRIAL

Kuchuk-Yatsenko S. I., Nejlo Yu. S., Gavrish V. S., Gushchin K. V. Prospects of increasing the power characteristics in flash-butt welding (Review) 30
Rudenko P. M., Gavrish V. S. Portable system of monitoring and control of process of resistance spot welding 36
Zhudra A. P., Krivchikov S. Yu., Petrov V. V. Technology of wide-layer hard-facing of large-sized crankshafts 41
Royanov V. A., Korostashevsky P. V. Determination of additional resistances against movement of sheet panels along the undriven roller field of assembly and welding lines 46

BRIEF INFORMATION

Arctic presentation of CMT process 52
Review of «Welding Journal», № 4, 2009 54

NEWS

XIII Republican Scientific-Technical Conference of welders of Kazakhstan 57
Problems of life and safety in service of structures, constructions and machines (resultant Scientific-Technical Conference at the E. O. Paton Electric Welding Institute) 58
Yu. N. Lankin is 75 61

INFORMATION

Program of loyalty from «Fronius Ukraine Ltd.» in the crisis period and its results 63

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

НКМЗ ВНОВЬ ПОДТВЕРДИЛ ЗВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА

На состоявшейся 15-18 декабря в Москве XXII Международной выставке «Всероссийская марка Знака качества XXI века» золотые знаки качества присвоены еще 11 видам продукции Новокраматорского машиностроительного завода (г. Краматорск, Донецкой обл.). Это стальные кованые валки для станов горячей и холодной прокатки, универсальные гидравлические моталки для смотки полосы, дуговая сталеплавильная печь ДСП-50, автоматизированные транспортные системы складирования и подачи сыпучих материалов производительностью до 250 т в час, литейные краны грузоподъемностью до 500 т, мостовые перегружатели грузоподъемностью до 40 т, ковочные краны грузоподъемностью до 500 т, мельницы полусамозмельчения и самоизмельчения с диаметром барабана до 10 м, стационарные миксеры для хранения жидкого чугуна вместимостью до 2500 т, шнекозубчатые дробилки, кривошипные горячештамповочные прессы усилием до 8000 т.

Столь значительного комплекта наград не удавалось получить ни одному из участвовавших в выставке предприятий.

Сегодня к применению на российском рынке рекомендованы 45 видов продукции НКМЗ, 24 вида маркируется платиновым Знаком качества «Всероссийская марка».

На этой выставке НКМЗ в четвертый раз подтвердил также свое право на владе-

ние Паспортом предприятия высокого качества.

ОБУЧЕНИЕ В ВИРТУАЛЬНОМ КАБИНЕТЕ

Начинающие сварщики, а также те, у кого какое-то время не было практики, должны приобрести или возобновить навыки работы со сварочной горелкой в ходе многих часов практических занятий. К тому моменту, когда они, наконец, добьются требуемого качества сварки, они потратят значительное количество электричества, газа, листового металла, присадочных материалов, а также других производственных ресурсов. В компании «Fronius»



предугадали существующую потребность в эффективных и экологически безопасных методах преподавания и обучения и разработали альтернативную программу под названием Virtual Welding (виртуальная сварка). Теперь учебное место сварщика состоит из горелки и сварочной заготовки, полностью соответствующих настоящим, а также ПК и монитора. Виртуальными являются как дуга, так и сварной шов, возникающий с характерным шумом. Этот метод значительно сокращает объем учебных занятий на традиционном, реальном сварочном оборудовании, которое требует большого расхода материалов. С марта 2010 г. данный продукт станет доступен на рынке.

Магнитная система слежения переносит движения руки в виртуальную реальность, отображаемую на экране или в 3D-очках. На шлеме сварщика находится дополнительный датчик, обеспечивающий комфортный, близкий к реальному визуальный контроль за выполнением сварочного задания. В зависимости от установленных параметров сварки убедительно имитируется внешний вид швов различных типов. При этом обучаемый в режиме реального времени слышит характерный звук выполняемой операции. Его рука реагирует на него, и у обучаемого формируется требуемое ощущение того, какое напряжение и сила тока необходимы в данный момент. После прохождения курса по программе Virtual Welding, включающего 60 учебных часов, начинающий сварщик достигает навыков, необходимых от него в практической деятельности. По сравнению с традиционным обучением потребность в материальных ресурсах снижается на четверть. Кроме того, это создает для профессии сварщика более привлекательный имидж, особенно среди молодых.

Возможность использования данной программы по сети в принципе позволяет расширить «аудиторию» до размеров всемирной сети (World Wide Web). Возможность задавать условия для групп, состоящих из подключенных к сети участников, а также неизменно объективная система оценки способствуют мотивации и желанию добиваться результатов. Инструктор привозит виртуальную «учебную мастерскую», не связанную с конкретной отрас-

лью или моделью либо в передвижном чемодане-футляре на колесиках, либо она состоит из терминала, для которого требуется менее 1м² свободного места.

Дидактическая концепция включает этапы обучения и моделирования. На этапе обучения молодой сварщик нарабатывает скорость перемещения горелки. На последующих ступенях предлагается отработка оптимального расстояния, а также правильного угла между горелкой и заготовкой. С помощью модулей и регулировки параметров Virtual Welding имитирует самые разнообразные технологические условия. Результаты обучения индивидуально документируются и оцениваются. При необходимости пользователь может использовать модули расширения и заказные адаптационные решения.

**МАНИПУЛЯТОР
СВАРОЧНЫЙ MS-101**

ОАО «Электромашиностроительный завод «Фирма СЭЛМА» освоило производство сварочного манипулятора MS-101, предназначенного для наклона и вращения изделий в положении, удобном для сварки (резки) с заданной скоростью при



автоматической, полуавтоматической и ручной электродуговой сварке.

Система управления манипулятором обеспечивает плавную регулировку скорости вращения изделия в широком диапазоне, высокую точность, стабильность работы и функцию самозащиты. С помощью пульта управления можно устанавливать требуемую скорость вращения, осуществлять вращение детали в двух направлениях.

В комплект поставки манипулятора MS-101 входит манипулятор, блок управления, пульт управления.

*Технические
характеристики*

Максимальная грузоподъемность100 кг
Скорость вращения планшайбы1...5 об/мин
Диапазон угла наклона планшайбы0...120°
Диаметр планшайбы ..350 мм
Сварочный ток при ПВ 60 %500 А
Напряжение питания, блока управления2х380 В, 50 Гц
Масса (без блока и пульта управления)47 кг

**Arcair Slice – ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ПОЖАРНЫХ
И СЛУЖБ СПАСЕНИЯ**

Оборудование для экзотермической резки от компании «Arcair» использует экзотермическую химическую реакцию для сжигания, расплавления или испарения большинства существующих материалов. Оно состоит из держателя-резака Arcair Slice, соединенного с источником подачи кислорода, и стального полого стержня, который вставляется в держатель. Электрическую энергию от аккумулятора или сварочного источника питания исполь-



зуют для поджига стержня, который будет гореть, пока через него подается кислород. В процессе горения температура сгорания стержня достигает более 5500°С, что позволяет с легкостью разрезать практически любой материал.

Этот инструмент является незаменимым для пожарных и спасательных служб, так как позволяет быстро разрезать дверные



петли, засовы, замки и сами двери, обеспечивает спасателям быстрый доступ к заблокированным людям.

Комплекты Slice поставляются в удобном для переноски ящике, содержащем держатель-резака, устройство поджига, аккумуляторную батарею и комплект режущих стержней.

Более подробную информацию можно найти на сайте www.arcairslice.com, где также можно увидеть видеofilm о работе системы.



РАСЧЕТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БОКОВОЙ РАМЫ ГРУЗОВОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ВАГОНА ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **И. Ю. РОМАНОВА**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрен пример расчетного прогнозирования роста усталостных трещин в боковой раме грузового вагона при заданном спектре случайных циклических нагрузок. Изучена связь превышения проектных условий эксплуатации вагона с вероятными причинами его разрушения.

Ключевые слова: усталостная трещина, случайное циклическое нагружение, боковая рама, железнодорожный грузовой вагон, литейный дефект, расчетное прогнозирование долговечности

В связи с увеличением грузовых железнодорожных перевозок усиливается внимание к «живучести» различных деталей и узлов несущих элементов грузовых вагонов. Опыт эксплуатации конструкций, созданных в Украине и России, свидетельствовал о недостаточной циклической прочности отдельных узлов, вследствие чего происходит разрушение вагонов, не прослуживших проектный срок эксплуатации [1].

Рассмотрим реальный случай разрушения литейной боковой рамы грузового вагона (станция Кабаклы, Западно-Сибирская железная дорога, РФ, 2009 г.), спроектированной в соответствии с [2] и изготовленной на ОАО «Азовмаш» (г. Мариуполь, Украина). Разрушение произошло в результате роста усталостной трещины от технологического дефекта.

Исходная информация по разрушенной боковой раме следующая: материал — сталь типа 20ГФЛ; пробег вагона до разрушения $L = 108482$ км; проектная средняя техническая скорость движения вагона $\bar{v} = 22,4$ м/с; среднесуточный пробег вагона в груженом состоянии $L_{сут} = 210$ км/сут; эффективная частота вертикальных колебаний вагона $f_3 = 2,23$ Гц; коэффициент пробега в груженом состоянии $K = 0,6$; среднесуточное количество циклов под нагрузкой $N_{сут} = (L_{сут}/\bar{v}) 10^3 f_3 = 20906$ цикл/сут; количество циклов под нагрузкой за время пробега L до разрушения $N = (LK/\bar{v}) 10^3 f_3 = 6,48 \cdot 10^6$ цикл; текущий оценочный ремонт производили при $N_{рем} = N - N_{сут} \cdot 9,5 \cdot 30K = 2,91 \cdot 10^6$ цикл.

На рис. 1 показан излом разрушенной рамы, стрелками указаны очаги зарождения усталост-

ного разрушения [3]. Согласно этой работе очагом зарождения первичной усталостной трещины (№ 1 на рис. 1) послужил литейный дефект — поверхностная раковина, имеющая в сечении излома длину 2,6 мм, глубину 1,8 мм и расположенная на расстоянии 31 мм от поверхности наружной вертикальной стенки боковой рамы. Дефект не был выявлен средствами неразрушающего контроля. Очагом зарождения вторичных усталостных трещин послужили литейные раковины, находящиеся на расстоянии 66, 104 и 125 мм от поверхности наружной вертикальной стенки и имеющие в сечении излома размеры 2,0×1,5 мм (№ 2), 4,3×2,3 мм (№ 4) и 4,0×1,3 мм (№ 5). Кроме того, имеется дефект поверхности размером 3,0×2,0 мм (№ 3 на рис. 1), непредусмотренный чертежом технологического ребра, который в работе [3] рассматривается как очаг образования вторичных усталостных трещин.

Таким образом, в сечение излома на поверхности с максимальными эксплуатационными продольными напряжениями расположено пять очагов усталостного разрушения, которые достаточно консервативно можно описать полуэллиптическими трещинами размером $2ca$, где $2c$ — длина трещины вдоль свободной поверхности; a — глубина трещины.

В табл. 1 приведены начальные размеры таких дефектов и указано расстояние центров дефектов от свободной вертикальной поверхности, а также расстояние между кромками соседних дефектов (слева L_{n-1} , справа L_{n+1}) в начальном состоянии и характерный параметр b взаимодействия с соседними дефектами

$$b = c + \min \begin{cases} L_{n-1, n} \\ L_{n+1, n} \end{cases}$$

либо свободной кромкой (вертикальной свободной поверхностью). В [3] отмечается, что описанные литейные дефекты засорения оценивали с позиции их допустимости (недопустимости) на

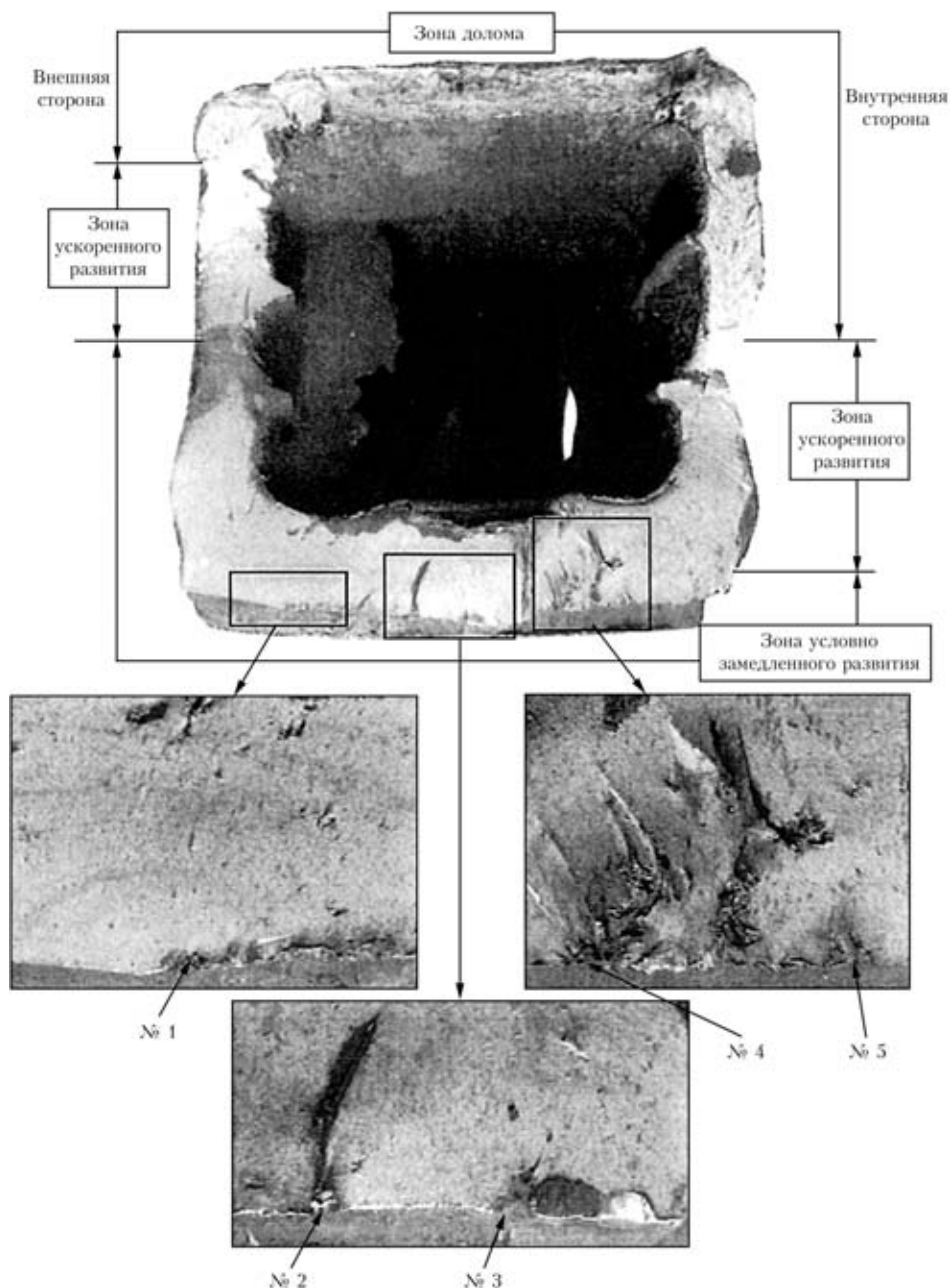


Рис. 1. Излом боковой рамы грузового железнодорожного вагона (№ 1–5 — очаги зарождения усталостной трещины)

основе принципов (подходов) механики разрушения твердых тел с трещинами, описанными применительно к рассматриваемому в работе [4] случаю. Из этой оценки следует, что описанные литейные дефекты являются недопустимыми, поскольку при проектных условиях эксплуатации в течение трех лет они подрастают по усталостному механизму до размеров, при которых начинается их прогрессирующий рост, приводящий к разрушению приблизительно после 2,9 мес эксплуатации. К сожалению, отсутствие подробного обоснования после оценки, выполненной в [3], обусловленное проектными условиями нагружения рамы, вызывает определенное сомнение относительно определения основной причины ее разрушения, поэтому в ИЭС им. Е. О. Патона

выполнено исследование, суть которого заключается в следующем.

Для описанных выше дефектов (табл. 1) рассматривали их нагружение по спектру случайных циклических нагрузок, описанных в [2] для средней скорости движения вагона $\bar{v} = 22,4$ м/с при статических напряжениях в зоне дефектов в пределах от $\sigma_{st} = 105,2$ МПа (№ 1) до $\sigma_{st} = 93,2$ МПа (№ 2–5), что хорошо согласуется с данными работы [4], где значения указанной величины составляют 80...90 МПа.

Расчет коэффициентов динамичности K_d в зависимости от вариации скорости движения v выполняется по [2] при статическом прогибе рессорного подвешивания $f_{ст} = 0,049$ м (табл. 2).



Амплитуду динамических (циклических) напряжений определяли из выражения

$$\sigma_a = \sigma_{st} K_d \quad (1)$$

в зависимости от скорости движения вагона v_i , значение которой определяется в пределах, указанных в табл. 2 при вероятности P_i в базовом цикле нагружения N_6 , т. е. N_i для i -го элемента спектра нагрузки в виде

$$N_i = N_6 P_i \quad (2)$$

Принимается, что в каждом элементе спектра $\sigma_{max} = \sigma_{st}$, т. е. коэффициент асимметрии R_i для i -го элемента спектра нагружения составляет

$$R_i = (1 \dots 2) K_{di} \quad (3)$$

Скорость роста размеров исходной трещины $l = a, c$ при заданной нагрузке определяется диаграммой циклической трещиностойкости стали, участок которой для рассматриваемого материала боковой рамы приведен на рис. 2, т. е. определяется размахом значений коэффициентов интенсивности напряжений ΔK_I и асимметрии нагружения R .

Для широкого класса среднеуглеродистых сталей такая диаграмма мало зависит от химического состава материала и его микроструктуры, для консервативных оценок используют различные зависимости. Так, по рекомендациям работы [5] целесообразно применять следующую зависимость:

$$\frac{dl}{dN} = \frac{C_0 \Delta K_I^m}{(1-R) - \frac{\Delta K_I}{K_c}} \quad \text{при } \Delta K_I > \frac{\Delta K_{th}(R)}{\gamma_m};$$

$$\frac{dl}{dN} = 0 \quad \text{при } \Delta K_I < \frac{\Delta K_{th}(R)}{\gamma_m}, \quad (4)$$

где $C_0 = 5 \cdot 10^{-13} \text{ мм}/(\text{МПа} \cdot \text{мм}^{1/2})^m$, $m = 3$; ΔK_{th} — пороговое значение размаха коэффициента интенсивности напряжений, зависящее от R :

$$\Delta K_{th} = (190 \dots 144)R, \quad (5)$$

но не менее $62 \text{ МПа} \cdot \text{мм}^{1/2}$; K_c — вязкость разрушения материала (принималась при температуре $-30 \text{ }^\circ\text{C}$), равная 2065 МПа ; γ_m — фактор безопасности по [5], равный $1,25$ для первичной трещины № 1 и $1,20$ для вторичных трещин № 2–5.

Зависимость (4) по сравнению с данными на рис. 2 дает несколько более высокие значения скорости рос-

Таблица 1. Начальные размеры дефекта и расстояние центров дефектов от свободной вертикальной поверхности по [3]

№ дефекта	Параметр дефекта, мм					
	2c	a	L ₁	L _{n-1}	L _{n+1}	b
1	2,6	1,8	31	29,7	22,7	24,0
2	2,0	1,5	66	22,7	22,5	23,5
3	3,0	2,0	86	22,5	14,4	15,9
4	4,3	2,3	104	14,4	16,6	15,5
5	4,0	1,3	125	16,6	23,0	18,6

Таблица 2. Коэффициенты динамичности K_d для проектных условий нагружения боковой рамы грузового вагона

i	v_p , м/с	K_{di}	P_i
1	6,25	0,063	0,03
2	13,75	0,138	0,07
3	16,25	0,159	0,09
4	18,75	0,177	0,12
5	21,25	0,196	0,16
6	23,75	0,214	0,19
7	26,25	0,232	0,16
8	28,75	0,250	0,10
9	31,25	0,269	0,06
10	33,75	0,287	0,02

та, что вполне приемлемо для консервативных оценок.

Параметр ΔK_I определяется для полуэллиптической трещины, согласно [5], в виде

$$\Delta K_I = 2\sigma_a \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F, \quad (6)$$

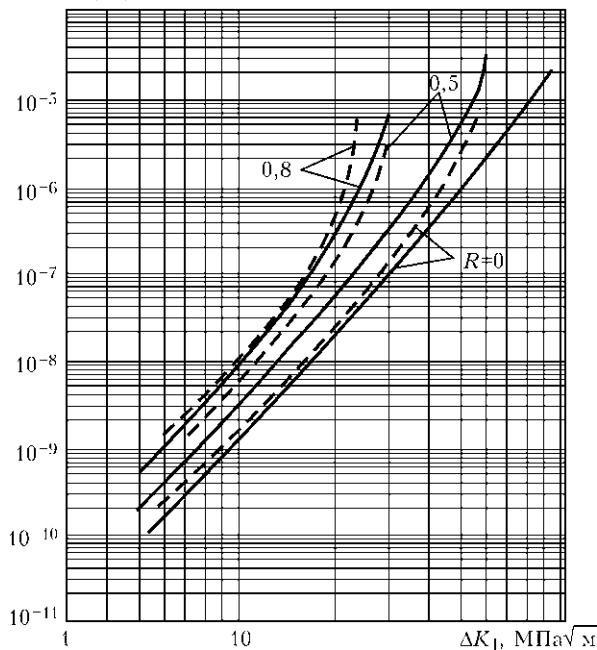
где Q и F рассчитывают по следующим зависимостям:

Таблица 3. Расчет ΔK и фактора безопасности γ_m для первичной трещины № 1 (табл. 1)

v_p , м/с	K_{di}	$\Delta K_{th}^{1/2}$, МПа·мм ^{1/2}	$\Delta\sigma$, МПа	$\Delta K_I(a)$	$\gamma_m(a)$	$\Delta K_I(c)$	$\gamma_m(c)$
6,25	0,063	64,1	13,25	17,2	3,73	22,3	2,88
13,75	0,138	85,7	29,03	37,7	2,27	48,8	1,75
16,25	0,159	91,8	33,45	43,4	2,11	56,3	1,63
18,75	0,177	97,0	37,24	48,3	2,00	62,6	1,55
21,25	0,196	102,4	41,24	53,5	1,91	69,3	1,48
23,75	0,214	107,6	45,02	58,4	1,84	75,7	1,42
26,25	0,232	112,8	48,81	63,3	1,78	82,1	1,37
28,75	0,250	118,0	52,60	68,3	1,73	88,5	1,33
31,25	0,269	123,5	56,60	73,4	1,68	95,2	1,29
33,75	0,287	128,6	60,40	78,4	1,64	101,5	1,27



dl/dN , м/цикл



$$F = \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{\delta} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{\delta} \right)^4 \right] g f_w f_b,$$

где δ — толщина стенки в зоне дефекта (принималась $\delta = 25$ мм).

При $a < c$

$$Q = 1 + 1,464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1,65}; \quad M_1 = 1,13 - 0,09 \left(\frac{a}{c} \right);$$

$$M_2 = -0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \frac{a}{c}}; \quad M_3 = 0,5 - \frac{1}{0,65 + \frac{a}{c}} + 14 \left(1 - \frac{a}{c} \right)^{24}.$$

Для параметра a $g = 1, f_b = 1$.

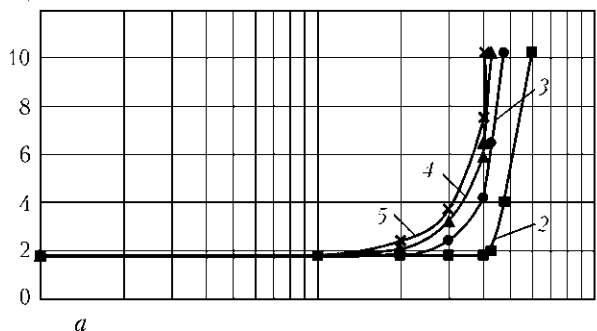
Для параметра c

$$g = 1 + \left[0,1 + 0,35 \left(\frac{a}{\delta} \right)^2 \right], \quad f_b = \sqrt{a/c}.$$

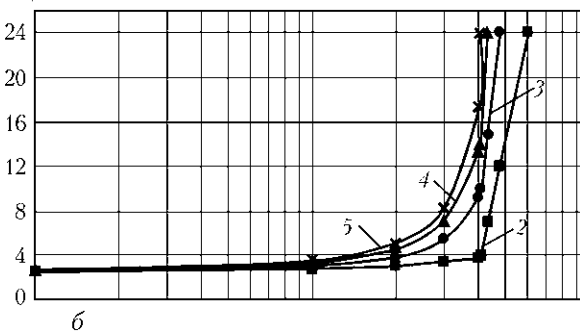
При $a > c$

Рис. 2. Диаграмма усталостного разрушения стали при различных значениях коэффициента асимметрии нагружения R [4]

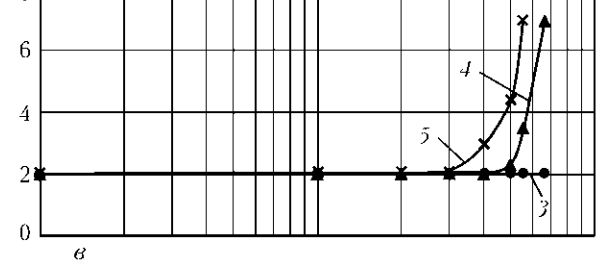
a , мм



$2c$, мм



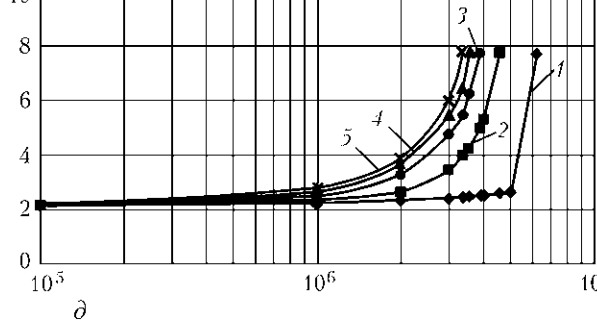
a



b



a



z

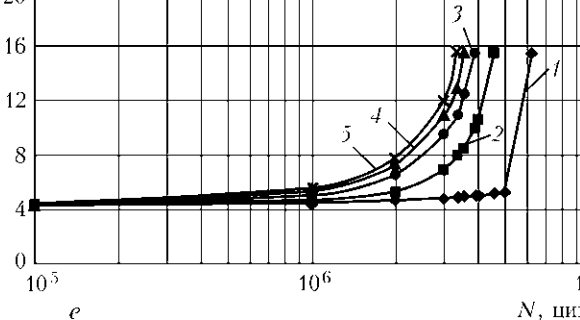


Рис. 3. Кинетика роста размеров дефектов № 1 (a , b), 3 (v , z) и 4 (d , e) при движении вагона с повышенной скоростью в зависимости от фактора безопасности γ_m : a , v , d — рост глубины трещины a ; b , z , e — рост $2c$; 1 — $\gamma_m = 1,20$; 2 — 1,25; 3 — 1,30; 4 — 1,35; 5 — 1,40



$$Q = 1 + 1,464 \left(\frac{c}{a}\right)^{1,65}; M_1 = (1 + 0,04 \frac{c}{a}) \sqrt{\frac{c}{a}};$$

$$M_2 = 0,2 \left(\frac{c}{a}\right)^4; M_3 = -0,11 \left(\frac{c}{a}\right)^4.$$

Для параметра a $g = 1, f_b = \sqrt{c/a}$.

Для параметра c $g = 1 + \left[0,1 + 0,35 \left(\frac{a}{\delta}\right)^2 \left(\frac{c}{a}\right)\right], f_b = 1$.

Все остальное, как для $a/c < 1$.

С помощью зависимостей (1)–(6) прослеживается развитие рассматриваемых в табл. 1 дефектов (трещин) при проектном спектре скорости движения вагона при $N_6 = 6,47 \cdot 10^6$ цикл, т. е. на базе реального пробега до разрушения. Частота элементов спектра определяет зависимость (2). Случайность элементов спектра реализовывалась с помощью генератора случайных чисел $0 \leq D \leq 1$. Использовали также более консервативный подход прослеживания по спектру, начиная с высоких амплитуд нагрузок и заканчивая малыми, т. е. начиная с $i = 10$ и заканчивая $i = 1$.

Результаты расчета кинетики изменения размеров a и c исходного дефекта (трещины) № 1 при проектном спектре нагружения на базе реальной долговечности рассматриваемой боковой балки показали, что за весь период эксплуатации вагона ($N_6 = 6,47 \cdot 10^6$ цикл) исходные размеры дефекта не изменились, что обусловлено неравенством $\Delta K_I < \Delta K_{th}/\gamma_m$ (как показано в табл. 3) для каждого элемента спектра нагружения.

Аналогичное положение имеет место и для дефектов № 2–5, от которых развиваются вторичные трещины, т. е. при проектных условиях эксплуатации вагона рассматриваемые дефекты являются допустимыми, тем не менее разрушение имело место. Докажем, что причиной рассматриваемого разрушения может стать включение в спектр нагрузки более высокой скорости движения вагона. С этой целью был рассмотрен спектр скорости по [2], соответствующий проектной средней технической скорости 24,7 м/с. На рис. 3 приведены расчетные данные по кинетике изменения размеров дефектов № 1, 3, 4 при повышенной (по сравнению с проектной) скорости движения, из которых видно, что появление в спектре скорости $v = 36,25$ м/с, $P = 0,05$ и $v = 38,75$ м/с, $P = 0,02$ заметно меняет кинетику изменения размеров a и c исходных дефектов (трещин). При этом расчеты показали, что дефекты № 2, 5 не дают роста

при данных входных параметрах. Практически при $N = 5 \cdot 10^6$ цикл указанные дефекты сливаются, образуя вдоль базовой поверхности единую трещину глубиной около 10 мм, при которой ресурс работы боковой балки весьма ограничен. Характерно, что при $N = 3 \cdot 10^6$ цикл нагружения (примерно соответствует моменту отцепного ремонта за 9,5 мес до разрушения) дефекты заметно подрастают и их можно обнаружить неразрушающими методами контроля. Естественно, рассматриваемый вариант эксплуатации при повышенной скорости является достаточно гипотетическим он показывает, что причиной разрушения вполне могли быть накопленные повреждения, связанные с эксплуатацией вагона на режимах, не предусмотренных проектом.

Таким образом, расчеты свидетельствуют, что усталостное разрушение боковой рамы железнодорожного вагона произошло от литейных дефектов-раковин, обнаруженных в изломе. Эти дефекты по своим геометрическим размерам являются допустимыми при проектных условиях эксплуатации вагона. Однако превышение проектных условий эксплуатации вагона, в частности скорость его движения, может стать причиной перехода рассмотренных дефектов в разряд недопустимых.

Приведенные расчетные алгоритмы позволяют прогнозировать влияние переменных циклических нагрузок, приложенных случайным образом, на рост усталостных трещин в элементах конструкций железнодорожных вагонов и прогнозировать их долговечность.

1. *Махненко В. И., Сапрыкина Г. Ю.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений железнодорожных платформ // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. тр. Четвертой междунар. конф., 27–30 мая 2008 г., пос. Кацивели, Крым, Украина. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2009. — С. 103–108.
2. *Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных).* — Введ. 07.02.96.
3. *Техническое заключение по результатам экспертной работы по определению причин разрушения боковой рамы № 36213-143-06 на 2903 км ПК7 участка Барабинск–Татарская за стрелочным переводом № 6 станции Кабаклы Новосибирского отделения Западно-Сибирской железной дороги ОАО «ВНИИЖТ»* — Утверждено 27.02.2009. — М., 2009. — 20 с.
4. *Северинова Т. П.* Расчетно-теоретическое обоснование живучести боковых рам и наддрессорных балок с допустимыми дефектами // Вест. ВНИИЖТ. — 2002. — № 5. — С. 40–45.
5. *Recommendation for fatigue design of welded joints and components.* — S. I., [1996]. — 117 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1539-96/XV-845-96).

An example of calculation prediction of growth of fatigue cracks in a side frame of freight cars at a preset range of random cyclic loads is considered. Relationship between exceeding design conditions of operation of the car and probable causes of its fracture was investigated.

Поступила в редакцию 18.06.2009



СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ МИКРОДИСПЕРСНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА $AMg5 + 27\% Al_2O_3$ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЫСТРОЗАКРИСТАЛЛИЗОВАННОЙ ПРОСЛОЙКИ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СОСТАВА $Al + 33\% Cu$

Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, А. Н. МУРАВЕЙНИК, инж., Г. К. ХАРЧЕНКО, д-р техн. наук, В. Е. ФЕДОРЧУК, инж., Г. Н. ГОРДАНЬ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследована свариваемость в твердой фазе микродисперсного композиционного материала $AMg5 + 27\% Al_2O_3$ с применением быстрокристаллизованной прослойки из сплава эвтектического состава $Al + 33\% Cu$. Установлено, что использование быстрокристаллизованной ленты в качестве промежуточной прослойки активизирует свариваемые поверхности и позволяет снизить температуру и время диффузионной сварки $AMg5 + 27\% Al_2O_3$. Использование технологических приемов, ускоряющих диффузионные процессы в стыке (принудительное деформирование, термоциклирование), позволило уменьшить толщину прослойки практически до полного ее растворения и повысить прочность на срез сварных соединений до уровня прочности основного материала.

Ключевые слова: сварка давлением в вакууме, микродисперсный композиционный материал, промежуточная прослойка, быстрокристаллизованная лента, пластическая деформация, температура сварки, прочность соединений

В современном машиностроении при разработке и практической эксплуатации различных видов техники актуальной задачей является уменьшение потерь на трение и изнашивание в подвижных сочленениях узлов и механизмов. В этой связи большой интерес представляют композиционные материалы (КМ) на основе алюминиевых сплавов, упрочненных дисперсными керамическими частицами оксида алюминия Al_2O_3 или карбида кремния SiC. Эти КМ отличаются высоким удельным модулем упругости, повышенной жаропрочностью и жесткостью при комнатной и повышенных температурах, низкими значениями коэффициентов термического линейного расширения и трения, высокой износостойкостью. Однако успешная реализация потенциальных возможностей этих материалов и их широкое распространение сдерживается трудностями, связанными с их свариваемостью.

При сварке плавлением КМ возникает ряд проблем — значительная вязкость сварочной ванны, распад либо агломерация армирующих частиц, сложность качественного формирования швов вследствие плохого смачивания алюминием поверхности упрочняющих частиц, пористость швов. Кроме того, при сварке с использованием присадочной проволоки перемешивание основного материала и присадки затрудняется и, как следствие, имеет место пониженная по сравнению с композитом прочность металла сварных швов [1, 2].

При сварке алюмокомпозитов в твердой фазе, например при диффузионной сварке, все процессы происходят при более низких температурах (по сравнению со сваркой плавлением) и эффект повышенной вязкости, пористость швов, сегрегация упрочнителя в сварочной ванне отсутствуют. Поэтому при сварке алюмокомпозитов, упрочненных дисперсными частицами Al_2O_3 (SiC), предпочтение отдается твердофазным способам соединения [3].

Основные трудности при сварке давлением дисперсно-упрочненных алюмокомпозитов связаны с присутствием плотной оксидной пленки на поверхности и большой жесткостью материала, затрудняющей деформацию его приповерхностных слоев.

Удалить оксидную пленку и соединить алюминиевые сплавы по «чистым» поверхностям практически невозможно. Поэтому тонкую оксидную пленку, оставшуюся на поверхности после травления и зачистки, стремятся разрушить и диспергировать.

Цель настоящего исследования — разработка технологического процесса сварки давлением в вакууме микродисперсного алюмокомпозита, позволяющего получить сварные соединения с прочностью на уровне основного материала.

Исследовали свариваемость КМ на основе алюминиевого сплава $AMg5$, армированного дисперсными частицами Al_2O_3 ($AMg5 + 27\% Al_2O_3$). Толщина слоя композита составляла 6 мм, твердость $HRB\ 96...99$ при нагрузке $F = 600\ Н$. Этот материал классифицируют как трудносвариваемый и труднообрабатываемый.

Композит изготовлен литейным способом — замешиванием дисперсно-упрочняющих частиц

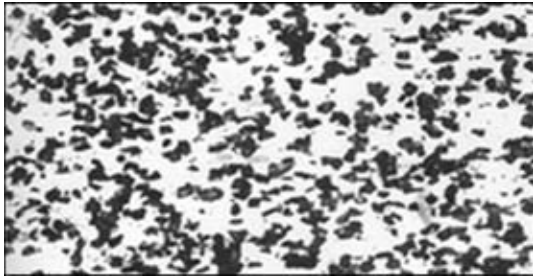


Рис. 1. Микроструктура ($\times 400$) КМ АМг5 + 27 % Al_2O_3 в исходном состоянии

Al_2O_3 в расплав материала матрицы с последующим прессованием. В исходном состоянии структура композита состоит из α -твердого раствора алюминия, интерметаллидных включений, присущих матричному алюминиевому сплаву АМг5, и армирующих частиц оксида алюминия темно-серого, почти черного цвета, имеющих Al_2O_3 угловатую форму и размер 3...15 мкм. Они достаточно равномерно распределены в объеме матрицы с расстоянием 3...20 мкм (рис. 1). Основным дефектом КМ является скопление частиц, куда при кристаллизации не проникает расплав алюминия и где образуются поры, несплошности, которые оказывают отрицательное влияние на свойства материала. Подобные дефекты основного металла в меньшей степени влияют на качество швов при сварке в твердой фазе по сравнению со сваркой плавлением.

Сварку образцов КМ выполняли без промежуточной прослойки и с прослойкой. Применяли прослойку из алюминиевого сплава АД1 и прослойку в виде быстрозакристаллизованной ленты эвтектического состава $\text{Al} + 33\% \text{Cu}$.

Для отработки технологии и выбора оптимальных параметров процесса сварки образцы изготавливали размером $15 \times 15 \times 4$ мм. Подготовка образцов под сварку состояла в снятии нагартованного слоя толщиной около 0,2...0,3 мм и зачистке поверхности шабером. Для оценки прочности сварных соединений проводили испытания образцов на срез. Раскрой полученных после сварки образцов проводили на электроэрозионном станке ЭХ-1331П. Микроструктурные исследования выполняли методом оптической микроскопии на микроскопах МИМ-8, «Neophot-32», определение элементного состава — на рентгеновском микроанализаторе «САМЕВАХ», измерение твердости образцов — на приборе «Роквелл» при $F = 600$ Н (шарик), микротвердости — на приборе ПМТ-3 при $F = 0,2$ Н.

При сварке давлением высокопрочных, трудносвариваемых металлических и особенно металлокерамических материалов получение соединений с высокой прочностью и трещиностойкостью является трудной задачей. При сварке таких материалов развитие совместной пластической деформации свариваемых поверхностей затруднено

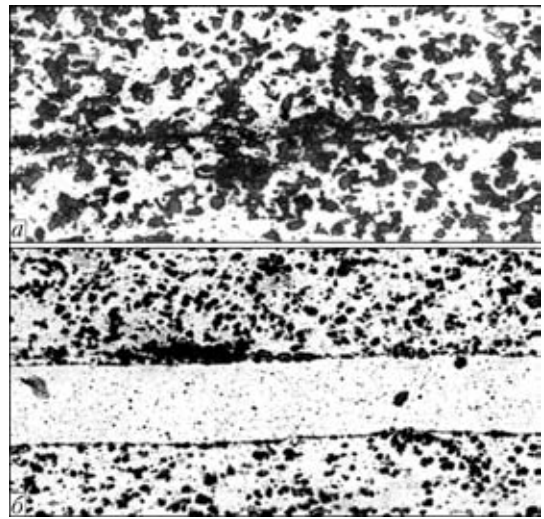


Рис. 2. Микроструктура сварного соединения КМ АМг5 + 27 % Al_2O_3 , полученного сваркой давлением в вакууме без прослойки (а, $\times 400$) и с алюминиевой прослойкой толщиной 0,15 мм в условиях свободного деформирования (б, $\times 250$)

вследствие значительной неравномерности процесса активации и физико-химического взаимодействия на площади контакта [4]. Как следует из работ [5, 6] и результатов наших исследований, при сварке КМ с КМ сварные соединения дисперсно-упрочненного КМ имеют низкую прочность в связи со значительной его жесткостью. Прочность на срез таких соединений составляет $\sigma_{\text{ср}} = 8...9$ МПа. Металлографические исследования показали, что армирующие частицы, интерметаллиды матрицы и оксиды концентрируются на линии соединения. Четко выявляется граница раздела, особенно в местах скопления армирующих частиц, где имеют место поры и несплошности (рис. 2, а).

Известно, что для активации пластической деформации широко применяют промежуточные прослойки в виде материалов сплошного сечения [7, 8] из пластичных сплавов — алюминия, меди, никеля, серебра. Использование при сварке дисперсно-упрочненного КМ пластичной промежуточной прослойки устраняет такой тип контакта, как частица-частица, ослабляющий соединение, и заменяет его на более прочный — металл-частица. Кроме того, размещенная в стыке мягкая сплошная прослойка за счет пластического течения в процессе сварки обеспечивает разрушение оксидной пленки на контактирующих поверхностях композита, а также улучшает процесс пластической деформации приконтактных объемов свариваемого металла.

Для отработки технологии и выбора оптимальных параметров процесса сварки образцы дисперсно-упрочненного КМ АМг5 + 27 % Al_2O_3 сваривали с применением прослойки из чистого алюминия (алюминиевый сплав АД1) толщиной 0,15 мм в условиях свободного деформирования. При этом использовали оптимальный режим свар-



ки: температура $T = 560\text{ }^{\circ}\text{C}$, время $t = 20\text{ мин}$, давление осадки $P = 40\text{ МПа}$, вакуум в рабочей камере $B = 1,3 \cdot 10^{-3}\text{ МПа}$. Общую пластическую деформацию образцов в условиях свободного деформирования задавали (на уровне $\varepsilon = 25\%$) путем применения стальных вкладышей, ограничивающих деформацию.

Результаты металлографических исследований показали, что в условиях свободного деформирования при сварке давлением в вакууме с использованием прослойки из чистого алюминия толщиной $0,15\text{ мм}$ в сварном соединении наблюдается удовлетворительное схватывание металла прослойки с матричным алюминием композита. Скопления армирующих частиц на границе не происходило, но на отдельных участках встречались микропоры и протяженные оксиды (см. рис. 2, б). Толщина алюминиевой прослойки в сварном соединении уменьшилась от $150\text{ до }100 \dots 120\text{ мкм}$. Прочность на срез соединений составляла $\sigma_{\text{ср}} = 40\text{ МПа}$.

Как показали исследования [4], при схеме сварки в свободном состоянии деформация сплошных прослоек происходит лишь в краевой области малой протяженности, что согласуется с результатами наших исследований. Для получения более прочного соединения авторы работ [4, 9] рекомендуют использовать технологические приемы и режимы сварки давлением, при которых материал зоны соединения подвергается пластической деформации по схеме давление + сдвиг. Данный процесс назвали сваркой с принудительным деформированием [9], который применяют при холодной сварке, сварке трением, контактной стыковой и др.

В наших исследованиях для активации пластической деформации в зоне соединения использовали схему сварки с принудительным деформированием. Для этой цели использовали формирующее устройство, обеспечивающее направленную сдвиговую пластическую деформацию металла в стыке и заданную деформацию свариваемых образцов в целом.

Формирующее устройство состоит из двух матриц и направляющей втулки. Степень пластической деформации соединений на уровне $\varepsilon = 15 \dots 25\%$ задавали глубиной каналов.

Металлографический анализ сварных соединений, полученных в формирующих матрицах с использованием алюминиевой промежуточной прослойки, показал, что дефекты, которые имеют место при сварке в свободном состоянии (оксидные включения, поры), отсутствуют (рис. 3).

Алюминиевая прослойка имела неравномерную по длине образца толщину. При сварке со сплошной прослойкой толщина алюминия составляет $80 \dots 100\text{ мкм}$ в центральной части стыка и $30 \dots 60\text{ мкм}$ по его краям, т. е. по краям сварного соединения она меньше, чем в его центральной части. Это связано с тем, что на периферии стыка деформационные процессы проходят более длительное, чем в центральной части, более продолжительное время и интенсивнее действуют сдвиговые (касательные) деформации [10]. Микротвердость алюминиевой прослойки в сварных соединениях составляет $650 \dots 750\text{ МПа}$. Одним из отличий сварных соединений, полученных в формирующих матрицах, от полученных в свободном состоянии, является наличие грата толщиной не более 1 мм , в который при сварке удаляется не только мягкая прослойка алюминия, но и прилегающие к ней слои КМ.

В сварных соединениях композита характер распределения армирующих частиц в зоне сварки, их морфология и дисперсность не изменяются как в условиях свободного деформирования, так и при использовании формирующих матриц. Прочность на срез соединений, полученных при сварке в формирующих матрицах с использованием промежуточной алюминиевой прослойки толщиной 150 мкм , составляет $\sigma_{\text{ср}} = 91\text{ МПа}$, это около 50% прочности на срез композита в исходном состоянии.

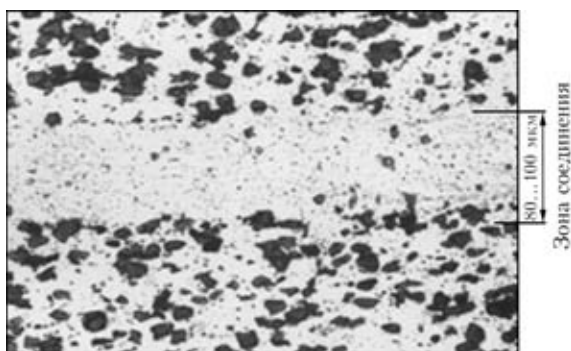


Рис. 3. Микроструктура ($\times 400$) сварного соединения КМ, полученного сваркой давлением в вакууме с применением алюминиевой прослойки толщиной $0,15\text{ мм}$ в условиях принудительного деформирования

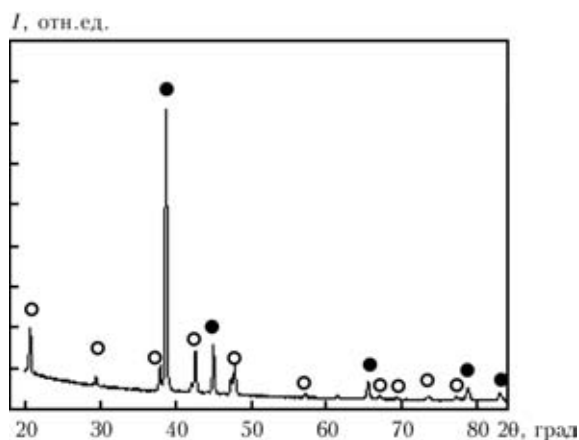


Рис. 4. Спектр рентгеновской дифракции быстрозакристаллизованной ленты $\text{Al} + 33\% \text{ Cu}$: ● — Al; ○ — Al_2Cu

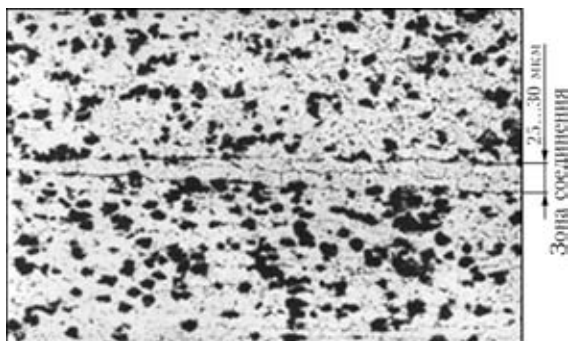


Рис. 5. Микроструктура (X300) зоны соединения КМ, полученного сваркой давлением в вакууме с применением быстрозакристаллизованной ленты (Al + 33 % Cu) толщиной 0,07 мм в условиях свободного деформирования

При сварке давлением в вакууме получить соединения с достаточно высокими прочностными характеристиками возможно при условии, если граница раздела между свариваемыми поверхностями перестает существовать как отдельный структурный элемент [11]. Этого можно достичь при использовании тонких прослоек, способных интенсифицировать диффузионные процессы в стыке, диспергировать и перераспределять остатки оксидной пленки. При этом в ходе процесса сварки следует активизировать диффузионные процессы в стыке и добиться максимального растворения прослойки, что, по нашему мнению, должно способствовать существенному повышению прочности соединения. С этой целью можно использовать легкоплавкие прослойки с алюминием эвтектического состава, в том числе быстрозакристаллизованные, которые активизируют свариваемые поверхности и легко диффундируют в основной металл в процессе сварки [12].

Известно также, что при измельчении зерна, т. е. при увеличении протяженности границ зерен, диффузионные процессы значительно ускоряются, поскольку коэффициент диффузии по границам зерен на несколько порядков больше, чем внутри зерна [13].

В связи с этим для сварки КМ АМг5 + 27 % Al_2O_3 применяли быстрозакристаллизованную ленту системы алюминий–медь эвтектического состава (Al + 33 % Cu) толщиной 0,07 мм и шириной 10 мм, которая разработана и изготовлена в ИПМ И. Н. Францевича НАН Украины. Структура ленты представлена α -твердым раствором алюминия и дисперсными частицами интерметаллидной фазы Al_2Cu , равномерно распределенными в объеме матрицы. На рис. 4 показана рентгеновская дифракционная картина быстрозакристаллизованной ленты системы Al/Cu эвтектического состава Al + 33 % Cu, на которой присутствуют только пики Al и Al_2Cu .

Оптимальная температура при сварке давлением в вакууме КМ АМг5 + 27 % Al_2O_3 с применением в качестве промежуточной прослойки

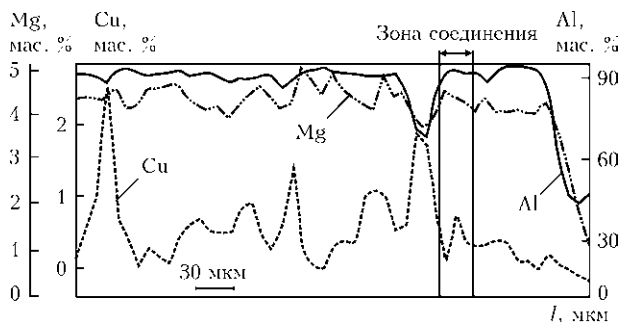


Рис. 6. Характер распределения меди, магния и алюминия в зоне соединения КМ при сварке в условиях свободного деформирования

быстрозакристаллизованной ленты системы Al/Cu эвтектического состава Al + 33 % Cu составляла $T_{св} = 500\text{ }^\circ\text{C}$ ($t = 10$ мин, $P = 40$ МПа) как в условиях свободного, так и принудительного деформирования. Снижение температуры сварки на $60\text{ }^\circ\text{C}$ по сравнению со сваркой с применением сплошной алюминиевой прослойки, по-видимому, связано с повышенной активностью быстрозакристаллизованной ленты.

Результаты металлографических исследований показали, что при сварке давлением в вакууме ($T_{св} = 500\text{ }^\circ\text{C}$) в условиях свободного деформирования толщина прослойки в стыке уменьшается с 70 до 20...30 мкм (рис. 5). По данным микрорентгеноспектрального анализа прослойка содержит 4,35 мас. % Mg, 2,3 мас. % Cu, 93,4 мас. % Al (рис. 6). В процессе сварки свыше 4 мас. % Mg переходит в прослойку из алюмокомпозита АМг5 + 27 % Al_2O_3 . Твердость прослойки находится практически на уровне твердости матрицы композита.

Сварка в формирующих устройствах позволила уменьшить толщину прослойки до 8...10 мкм (рис. 7, а). Последующая термическая обработка

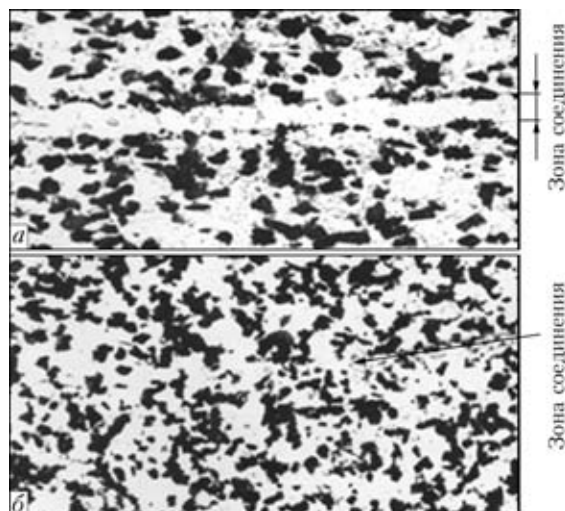


Рис. 7. Микроструктура зоны соединения КМ ($\delta = 8...10$ мкм), полученного сваркой давлением в вакууме с применением быстрозакристаллизованной ленты (Al + 33 % Cu) в условиях принудительного деформирования (а, X600) и с последующим термоциклированием (б, X400)

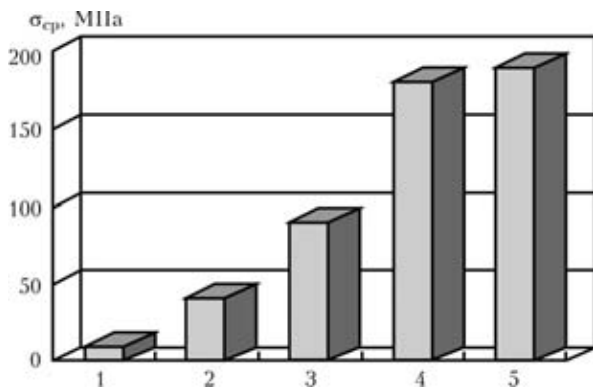


Рис. 8. Диаграмма изменения прочности на срез $\sigma_{ср}$ сварных соединений КМ АМг5 + 27 % Al_2O_3 в зависимости от технологических особенностей сварки давлением в вакууме (1–4) и в исходном состоянии (5): 1 — свободное состояние без применения промежуточной прослойки ($\sigma_{ср} = 8.9$ МПа); 2 — то же с применением прослойки алюминия $\delta = 150$ мкм ($\sigma_{ср} = 40$ МПа); 3 — формирующая матрица с применением прослойки алюминия $\delta = 150$ мкм ($\sigma_{ср} = 91$ МПа); 4 — то же с применением быстрозакристаллизованной ленты Al + 33 % Cu $\delta = 70$ мкм ($\sigma_{ср} = 180$ МПа); 5 — $\sigma_{ср} = 190$ МПа

(термоциклирование), состоящая из пяти циклов нагрева до 500 °С под давлением и охлаждения до 200 °С, способствовала практически полному растворению прослойки (рис. 7, б). Прочность на срез сварного соединения после сварки и термообработки составила $\sigma_{ср} = 180$ МПа.

Таким образом, применение при сварке давлением в вакууме композита АМг5 + 27 % Al_2O_3 быстрозакристаллизованной ленты системы Al/Cu эвтектического состава Al + 33 % Cu и технологических приемов, направленных на ускорение диффузионных процессов в стыке, позволило уменьшить температуру сварки и толщину прослойки в сварном соединении практически до полного ее растворения. При этом прочность на срез сварного соединения достигает 180 МПа (рис. 8, поз. 5), что соответствует уровню прочности композита в исходном состоянии.

Выводы

1. При сварке давлением в вакууме замена промежуточной прослойки из чистого алюминия на прослойку из быстрозакристаллизованной ленты системы Al/Cu эвтектического состава Al + 33 % Cu позволила получить качественные сварные соединения композита АМг5 + 27 % Al_2O_3 при

более низкой температуре и меньшем времени сварки.

2. Использование быстрозакристаллизованной ленты системы Al/Cu эвтектического состава обеспечивает прочность соединений на уровне прочности основного металла.

1. Влияние электромагнитного перемешивания на свойства сварных соединений композитов / В. Р. Рябов, В. П. Будник, А. Н. Муравейник и др. // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов — 21 век: Тр. Междунар. конф., г. Москва, 30 янв.–2 февр. 2001 г. — М.: МГУ, 2001. — С. 352–359.
2. Исследование структуры сварных соединений дисперсно-упрочненного алюминиевого сплава / В. Р. Рябов, А. Н. Муравейник, А. А. Бондарев и др. // Технология легких сплавов. — 1999. — № 1/2. — С. 139–144.
3. Diffusion bonding of dispersion strengthened composite materials / V. R. Ryabov, A. N. Muraveinik, E. N. Cherepivskaya et al. // Joining of Materials. — 2002. — **14**, № 1/2. — P. 6–11.
4. Лямин Я. В., Мусин Р. А. Пластическая деформация при диффузионной сварке разнородных материалов // Свароч. пр-во. — 2002. — № 5. — С. 24–29.
5. Bushby R. S., Scott V. D. Joining of particulate silicon carbide reinforced 2124 aluminium alloys by diffusion bonding // Materials Sci. and Techn. — 1995. — **11**, № 8. — P. 753–758.
6. Escalera M. D., Urena A., Gomes de Salazar J. M. Solid state diffusion A 6061 matrix composites reinforced with aluminium particles // The ASM International European conf. «Welding and joining science and technology», Madrid, Spain, March 10–12, 1997. — Madrid, 1997. — P. 380–389.
7. Твердофазное соединение в вакууме дисперсно-упрочненных композиционных материалов / А. Я. Ищенко, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко и др. // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. — 2006. — **4**, № 3. — С. 747–756.
8. Особенности формирования структуры сварного соединения дисперсно-упрочненного композита Al + 4 % С при диффузионной сварке / В. Р. Рябов, А. Н. Муравейник, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко // Автомат. сварка. — 2003. — № 12. — С. 7–10.
9. Терновский А. П. Диффузионная сварка с принудительным деформированием (Аналитический обзор) // Свароч. пр-во. — 1988. — № 9. — С. 76–83.
10. Суворов И. К. Обработка металлов давлением. — М.: Высш. шк., 1973. — 381 с.
11. Сергеев А. В., Чудин В. М., Сыропаева Е. С. Диффузионная сварка алюминиевых сплавов в состоянии сверхпластичности // Автомат. сварка. — 1991. — № 7. — С. 40–43.
12. Особенности диффузионной сварки алюминиевых сплавов / Ю. Я. Ищенко, А. Д. Стретович, А. В. Лозовская, В. С. Несмих // Там же. — 1991. — № 6. — С. 34–35.
13. Бокштейн С. З. Строение и свойства металлических сплавов. — М.: Металлургия, 1971. — 195 с.

Solid-phase weldability of micro-dispersed composite material AMg5 + 27 % Al_2O_3 with application of rapidly-solidified interlayer from Al + 33 % Cu eutectic alloy was studied. It is established that application of rapidly-solidified strip as an interlayer activates the surfaces being welded and allows lowering the temperature and time in diffusion welding of AMg5 + 27 % Al_2O_3 composite. Use of techniques which accelerate the diffusion processes in the butt joint (forced deformation, thermal cycling), allowed reducing the interlayer thickness to its practically complete dissolution and improving the shear strength of welded joints to the level of base metal strength.

Поступила в редакцию 14.07.2009



ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ДУГИ

Г. А. ЦЫБУЛЬКИН, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены установившиеся режимы в сварочной цепи при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитного газа. Предложен подход к оценке качества процесса саморегулирования дуги, основанный на применении метода коэффициентов ошибок.

Ключевые слова: дуговая сварка, плавящийся электрод, переходные и установившиеся процессы, точность саморегулирования

Эффективность алгоритмов управления роботизированной дуговой сваркой плавящимся электродом существенным образом зависит от того, насколько при их разработке учитывается характер динамических процессов, протекающих в сварочном контуре. Особенность этих процессов обусловлена явлением саморегулирования дуги, которое, как известно, было обнаружено и всесторонне исследовано еще в начале 40-х годов прошлого столетия [1]. Хотя изучению указанного явления посвящено огромное количество работ, вопросы качества саморегулирования дуги все же недостаточно отражены в литературе. Можно указать лишь на недавно опубликованную работу [2], в которой использован интегральный критерий качества, позволяющий сравнивать близкие по структуре системы (лучшая из них имеет меньшую интегральную оценку). В работе [2] не рассмотрены вопросы точности в установившихся режимах, которая наряду со временем протекания переходного процесса является, как известно [3–7], одним из основных показателей качества процесса.

Между тем для анализа точности в установившихся режимах в условиях постоянных медленно изменяющихся внешних воздействий в свое время был предложен весьма изящный метод, описанный впервые, по-видимому, в работе [7] и получивший позже известность как метод коэффициентов ошибок. Этот метод позволяет довольно просто получить представление об установившихся процессах в линейных системах с обратной связью произвольной структуры непосредственно по коэффициентам передаточных функций в зависимости от внешних воздействий и их производных. В работе [8] показано, что упомянутый метод в принципе распространяется и на определенные классы нелинейных систем, в которых

нелинейные элементы не охвачены цепью обратной связи.

В настоящей работе ставится задача исследовать установившийся процесс в сварочной цепи при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитного газа и на основе метода коэффициентов ошибок построить оценку точности процесса саморегулирования дуги.

Рассмотрим дифференциальное уравнение

$$(T_e T_s D^2 + T_s D + 1)v_m = v_e - DH + \frac{1}{E} Du_s, \quad (1)$$

описывающее, согласно [9], динамические процессы, которые протекают в сварочной цепи.

В уравнение (1) введены следующие обозначения: $v_e = v_e(t)$ — скорость подачи плавящегося электрода относительно сопла горелки; $v_m = v_m(t)$ — скорость плавления электрода; $H = H(t)$ — расстояние между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны; $u_s = u_s(t)$ — напряжение на выходных клеммах источника сварочного тока; $E \equiv \partial u_a / \partial l$ — напряженность электрического поля в столбе дуги; $u_a = u_a(t)$ — напряжение на дуге; l — длина дуги; t — текущее время; $D = d/dt$ — оператор дифференцирования; T_e, T_s — постоянные времени:

$$T_e = \frac{L}{R_*}; \quad T_s = \frac{R_*}{EM} \quad (2)$$

Здесь L — индуктивность сварочного контура; $M \equiv \partial v_m / \partial i$ — крутизна характеристики плавления электрода при номинальных значениях сварочного тока i и вылета электрода

$$R_* = R + S_a - S_s, \quad (3)$$

где R — суммарное сопротивление подводящих проводов, вылета электрода и скользящего контакта в мундштуке горелки; $S_a \equiv \partial u_a / \partial i$; $S_s \equiv \partial u_s / \partial i$ — крутизна вольт-амперных характеристик дуги и источника сварочного тока при номинальном значении сварочного тока i .



В качестве меры точности саморегулирования примем величину

$$\varepsilon(t) = v_e(t) - v_m(t), \quad (4)$$

представляющую собой отклонение скорости плавления электрода $v_m(t)$ от скорости подачи электрода $v_e(t)$.

На основании (4) и (1) можно записать

$$\begin{aligned} (T_e T_s D^2 + T_s D + 1)\varepsilon(t) = \\ = (T_e T_s D^2 + T_s D)v_e(t) + DH(t) - \frac{1}{E}Du_s(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Применив к (5) преобразование Лапласа, получим

$$\varepsilon(p) = W_1(p)v_e(p) + W_2(p)H(p) - W_3(p)u_s(p), \quad (6)$$

где p — комплексная переменная; $W_1(p)$, $W_2(p)$, $W_3(p)$ — передаточные функции:

$$\begin{aligned} W_1(p) = \frac{T_e T_s p^2 + T_s p}{T_e T_s p^2 + T_s p + 1}; \quad W_2(p) = \frac{p}{T_e T_s p^2 + T_s p + 1}; \\ W_3(p) = \frac{E^{-1}p}{T_e T_s p^2 + T_s p + 1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Поскольку передаточные функции $W_1(p)$, $W_2(p)$, $W_3(p)$ не имеют полюсов в начале координат, то, согласно [7], они могут быть разложены в степенные ряды относительно p . Следовательно, установившееся отклонение $\varepsilon_\infty(t)$ по каждому входному воздействию $v_e(t)$, $H(t)$, $u_s(t)$ можно представить как сумму соответствующих разложений

$$\varepsilon_\infty(t) = \varepsilon_{1\infty}(t) + \varepsilon_{2\infty}(t) + \varepsilon_{3\infty}(t), \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} \varepsilon_{1\infty}(t) = A_0 v_e(t) + A_1 Dv_e(t) + A_2 D^2 v_e(t) + \dots; \\ \varepsilon_{2\infty}(t) = B_0 H(t) + B_1 DH(t) + B_2 D^2 H(t) + \dots; \\ \varepsilon_{3\infty}(t) = C_0 u_s(t) + C_1 Du_s(t) + C_2 D^2 u_s(t) + \dots \end{aligned} \quad (9)$$

В этих выражениях

$$\begin{aligned} A_n = \frac{1}{n!} \left[\frac{d^n W_1}{dp^n} \right]_{p=0}; \quad B_n = \frac{1}{n!} \left[\frac{d^n W_2}{dp^n} \right]_{p=0}; \\ C_n = \frac{1}{n!} \left[\frac{d^n W_3}{dp^n} \right]_{p=0}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (10)$$

— постоянные коэффициенты.

Итак, подставив в разложения (9) найденные по формулам (10) коэффициенты A_n , B_n , C_n и просуммировав затем результат, согласно (8), получим оценку точности саморегулирования дуги $\varepsilon_\infty(t)$.

Если в выражениях (9) ограничиться, например, двумя первыми членами ряда, что вполне

приемлемо в нашем случае, то приближенная оценка точности $\varepsilon_\infty^*(t)$ примет достаточно простой вид, а именно

$$\varepsilon_\infty^*(t) = T_s Dv_e + DH - \frac{1}{E}Du_s. \quad (11)$$

Зная числовые значения параметров T_s и E , а также скорость изменения входных воздействий $v_e(t)$, $H(t)$, $u_s(t)$, по формуле (11) можно легко вычислить отклонение $\varepsilon_\infty^*(t)$, т. е. получить в каждом конкретном случае оценку точности саморегулирования дуги без проведения каких-либо дополнительных теоретических или экспериментальных исследований.

Из выражения (11) непосредственно видно, что если $v_e = \text{const}$, $H = \text{const}$, $u_s = \text{const}$, то отклонение $\varepsilon_\infty(t)$ в установившемся режиме равно нулю. Очевидно, что при $v_e(t) \neq \text{const}$ отклонение $\varepsilon_\infty(t)$ будет тем меньше, чем меньше постоянная времени T_s , зависящая, согласно (2), (3), от крутизны вольт-амперных характеристик дуги $S_a \equiv \partial u_a / \partial i$, источника сварочного тока $S_s \equiv \partial u_s / \partial i$, крутизны характеристики плавления электрода $M \equiv \partial v_m / \partial i$ и напряженности электрического поля в столбе дуги $E \equiv \partial u_d / \partial l$. Из (11), (2), (3) нетрудно увидеть, что, чем меньше $R_* = R + S_a - S_s$ и больше EM , тем меньше в установившемся режиме отклонение $\varepsilon_\infty(t)$, т. е. тем выше точность саморегулирования дуги.

Что касается времени переходного процесса τ , являющегося еще одной из основных характеристик качества саморегулирования дуги, то, поскольку в сварочном контуре $T_s \gg T_e$, это время можно оценить по простой формуле

$$\tau^* = T_s \ln(k), \quad (12)$$

где k — число, определяющее степень уменьшения начального отклонения ε_0 за искомое время τ , т. е. $k = \varepsilon_0 / \varepsilon(t)$.

Из формул (12), (2), (3), в частности, следует, что с уменьшением R_* и увеличением EM время переходного процесса τ уменьшается.

Таким образом, формулы (11) и (12) весьма удобны для числовой оценки качества процесса саморегулирования дуги, от которого в известной степени зависит и само качество дуговой сварки.

На рис. 1, 2 представлены результаты компьютерного моделирования процессов, описываемых дифференциальным уравнением (1). Взятые следующие числовые значения параметров сварочного контура и режима дуговой сварки: $L = 4 \cdot 10^{-4}$ Гн; $R = 0,015$ Ом; $E = 2$ В/мм; $M = 0,31$ мм/(А·с); $S_a = 0,005$ В/А.

Переходные и установившиеся процессы $\varepsilon(t)$, полученные при изменении скорости подачи элект-



трода $v_e(t)$ и постоянных значениях $H = 17$ мм, $u_s = 30$ В, показаны на рис. 1. Для простоты проверки формулы (11) закон изменения $v_e(t)$ задавали зависимостью

$$v_e(t) = \begin{cases} 45, & t < 0,5 \\ 45 + 20(t - 0,5), & t \geq 0,5 \end{cases} \quad [\text{мм/с}].$$

Сравнивая кривые 1 и 2 на рис. 1, видим, что точность саморегулирования дуги, характеризующая отклонением $\varepsilon(t)$, повышается при уменьшении крутизны S_s вольт-амперной характеристики источника сварочного тока.

На рис. 2 показан переходной процесс $\varepsilon(t)$, вызванный ступенчатым изменением расстояния $H(t)$ между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны:

$$H(t) = \begin{cases} 17, & t < 0,5 \\ 20, & t \geq 0,5 \end{cases} \quad [\text{мм}].$$

При этом задавали напряжение $u_s = 30$ В и скорость $v_e = 45$ мм/с.

Из рис. 2 видно, что время переходного процесса сокращается с уменьшением крутизны S_s вольт-амперной характеристики источника сварочного тока.

Чтобы проиллюстрировать эффективность применения формул (11) и (12) для числовой оценки качества саморегулирования дуги, проведем расчет по этим формулам установившегося отклонения $\varepsilon_{\infty}^*(t)$ и времени переходного процесса τ в рассмотренных выше случаях.

В случае линейного изменения скорости подачи электрода $v_e(t)$ (рис. 1)

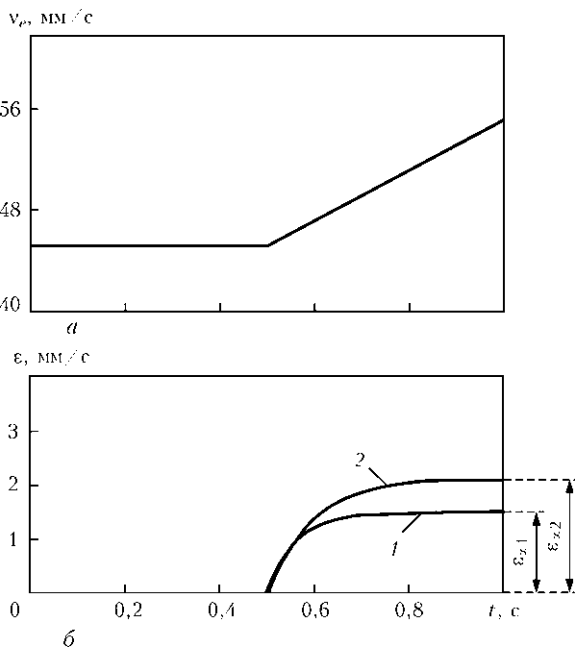


Рис. 1. Линейное изменение скорости v_e подачи электрода (а) и реакция отклонения $\varepsilon(t)$ на это изменение (б): 1 — $S_s = -0,025$; 2 — $-0,045$ В/А

$$\varepsilon_{\infty 1}^*(t) = T_s D v_e = \frac{0,015 + 0,005 + 0,025}{2 \cdot 0,31} \cdot 20 = 1,45 \text{ мм/с} \quad (\text{кривая 1});$$

$$\varepsilon_{\infty 2}^*(t) = \frac{0,015 + 0,005 + 0,045}{2 \cdot 0,31} \cdot 20 = 2,1 \text{ мм/с} \quad (\text{кривая 2}).$$

В случае ступенчатого изменения расстояния $H(t)$ между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны (рис. 2)

$$\tau_1^* = T_s \ln(k) = \frac{0,015 + 0,005 + 0,015}{2 \cdot 0,31} \cdot 3 = 0,17 \text{ с} \quad (\text{кривая 1});$$

$$\tau_2^* = \frac{0,015 + 0,005 + 0,045}{2 \cdot 0,31} \cdot 3 = 0,31 \text{ с} \quad (\text{кривая 2}).$$

Сравнивая значения ε_{∞}^* и τ^* , вычисленные по формулам (11) и (12), с соответствующими значениями ε_{∞} и τ , полученными при моделировании (рис. 1, 2), $\varepsilon_{\infty 1}(t) = 1,45$ мм/с, $\varepsilon_{\infty 2}(t) = 2,09$ мм/с, $\tau_1 = 0,16$ с, $\tau_2 = 0,32$ с, нетрудно убедиться, что они практически совпадают.

Таким образом, компьютерное моделирование и приведенные расчеты показывают, что предложенные в настоящей работе оценки (11) и (12) позволяют получить четкое представление о точности и времени переходных процессов саморегулирования дуги. Зная параметры сварочной це-

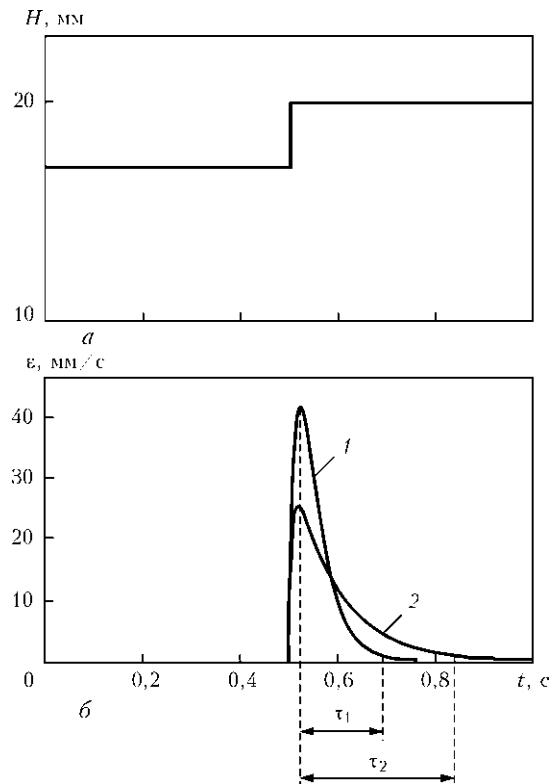


Рис. 2. Ступенчатое изменение расстояния H между мундштуком и сварочной ванной (а) и реакция отклонения $\varepsilon(t)$ на это изменение (б): 1 — $S_s = -0,015$; 2 — $-0,045$ В/А



пи, по формулам (11), (12) легко рассчитать числовые значения ε_{∞}^* и τ^* . Более того, располагая указанными формулами, путем выбора определенных соотношений между параметрами сварочной цепи можно обеспечить желаемые показатели качества саморегулирования дуги. Такая необходимость, в частности, возникает при использовании импульсных способов дуговой сварки [10].

Оценки (11) и (12) были использованы нами в [11] при разработке адаптивного дугового сенсора Arc Sensor для корректирующего управления роботизированной дуговой сваркой.

1. Патон Б. Е. Избранные труды. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2008. — 893 с.
2. Дюргеров Н. Г. Интегральный критерий качества саморегулирования сварочной дуги // Свароч. пр-во. — 2001. — № 8. — С. 8–10.
3. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. — М.: Наука, 1987. — 256 с.

4. Кинг Л. Г. Снижение установившейся динамической ошибки в замкнутых следящих системах // Прикл. механика и машиностроение. — 1954. — № 2. — С. 3–14.
5. Лукас В. А. Теория автоматического управления. — М.: Недра, 1990. — 416 с.
6. Туманов М. П. Теория управления. Теория линейных систем автоматического управления. — М.: МГИЭМ, 2005. — 80 с.
7. Теория следящих систем / Под ред. Х. Джеймса и др. — М.: Изд-во иностр. лит., 1951. — 484 с.
8. Цыбулькин Г. А. Анализ установившихся режимов некоторых классов нелинейных динамических систем на основе процедур рекуррентного оценивания // Кибернетика и вычисл. техника. — 1994. — Вып. 101. — С. 74–80.
9. Цыбулькин Г. А. Стабилизация скорости плавления электрода при роботизированной дуговой сварке // Автомат. сварка. — 2008. — № 12. — С. 13–16.
10. Разработка высокоэффективных способов дуговой сварки и их применение / Н. Кидзи, К. Кобаяси, Д. Исии, Х. Ямаока // Там же. — 2003. — № 10/11. — С. 59–63.
11. Цыбулькин Г. А. Робастный цифровой сенсор для дуговой сварки // Там же. — 2001. — № 11. — С. 55–56.

Steady-state modes in the welding circuit during gas metal arc welding are considered. An approach is offered to evaluate quality of the self-adjusting arc process based on the use of the error index method.

Поступила в редакцию 26.06.2009

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ НАУЧНОГО, РЕСУРСНОГО И ПРОМЫШЛЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА

Промышленная конференция + блиц-выставка

18–22 февраля 2010

Славское, Карпаты

В рамках конференции состоятся семинары:

- ◆ Оборудование. Инструменты. Оснастка. Перспективные металлические и неметаллические материалы. Технологии. Наноматериалы и нанотехнологии. Научный руководитель — Коваленко В. С., НТУУ «КПИ», г. Киев
- ◆ Современные технологии ремонтно-восстановительных работ в промышленности. Научный руководитель — Лобанов Л. М., ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев
- ◆ Перспективы развития автодорожной отрасли. Строительные материалы. Научный руководитель — Богомолов В. А., Харьковский НАДУ (ХАДИ)
- ◆ Теоретические и прикладные проблемы трибологии. Защита материалов от коррозии. Научные руководители — Похмурский В. И., Широков В. В., ФМИ НАН Украины, г. Львов
- ◆ Горнодобывающая промышленность: технология, оборудование, безопасность и экология. Научные руководители — Красник В. Г., МУП, Кулиш В. А., УкрНИИпроект, г. Киев

Круглый стол:

- ◆ Приборы неразрушающего контроля и средства обеспечения надежности и безопасности в отраслях промышленности в транспорте. Научный руководитель — Духовский А. Ю., директор НПП «ИНТРОН-СЭТ», г. Донецк

**Контакты: тел./факс: +38(044) 573-30-40,
моб.: +38-067-708-93-95
E-mail: office@conference.kiev.ua,
www.conference.kiev.ua**



ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА КОРНЕВЫХ ШВОВ СОЕДИНЕНИЙ ТОЛСТОГО МЕТАЛЛА ТЕПЛОУСТОЙЧИВОЙ СТАЛИ

Т. И. ЧЕРНАЯ, инж., А. К. ЦАРЮК, канд. техн. наук, А. В. СИОРА, инж.,
В. Д. ШЕЛЯГИН, В. Ю. ХАСКИН, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описана технология лазерной сварки корневых швов теплоустойчивой стали. Определены оптимальные условия сварки для хорошего формирования корневых швов с полным проваром и плавным переходом обратного валика к основному металлу.

Ключевые слова: лазерная сварка, теплоустойчивая сталь, мощность, луч, присадочная проволока, сварное соединение, корневой проход, шов

Обеспечение надежности и эксплуатационной работоспособности ответственных компонентов турбоагрегатов, например, роторов мощных паровых турбин, является серьезной проблемой. При этом одной из наиболее актуальных задач является качественное выполнение корневых швов соединений ротора. Учитывая особенности конструкции, сварка выполняется в сложных условиях и проведение неразрушающего контроля качества затруднительно. В то же время от сварки корневых швов зависит геометрия изделия, его ресурс и надежность в целом. В настоящее время корневые швы роторов цилиндра низкого давления (ЦНД) выполняют аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом навесу либо на остающейся стальной подкладке (для ЦНД тихоходных турбин). Однако при таком способе сварки сложно обеспечить стабильный 100%-й провар корня шва по всему периметру соединения, особенно при изготовлении крупногабаритных роторов турбин большой мощности. Существенным недостатком сварки корневых швов на подкладном кольце является образование конструктивно-технологического непровара, который, являясь потенциальным концентратором напряжений, способствует снижению уровня усталостной прочности и повышению склонности к хрупкому разрушению. Поэтому изыскание способа сварки корневого шва со 100%-м проваром и обеспечением обратного формирования является первоочередной технологической задачей.

Целью настоящей работы являлось исследование и определение оптимальных условий для получения качественных корневых швов с обратным формированием при соединении толстого металла теплоустойчивой стали лазерным лучом. Для этого необходимо было решить ряд методических и технологических задач, относящихся к

выбору типа лазера, определению его оптимальной мощности, выбору защитного газа и формы разделки кромок, установлению параметров лазерной сварки и отработки техники сварки.

Методика исследований предусматривала использование в качестве основного материала роторной стали 25X2НМФА толщиной 30 мм, а также стали 20 толщиной 5 мм — для предварительных опытов по отработке отдельных параметров режима сварки притупления стыкового соединения из стали 25X2НМФА (рис. 1). Толщина притупления, равная 5 мм, была выбрана из соображений технологичности при сборке и минимального сечения корневого шва, отвечающего условиям прочности.

В качестве источника излучения выбран твердотельный лазер типа DY 044 (производства «Rofin Sinar», Германия). Как известно, мощность излучения оказывает существенное влияние на проплавленную способность и характер формирования шва [1]. Увеличение мощности излучения повышает как эффективность действия луча, так и глубину проплавления и ширину шва. Эксперименты по установлению параметров режимов сварки проводили на стыках размером 300×150×5 мм из стали 20 (0,196 С; 0,2 Si; 0,49 Mn; 0,019 S; 0,017 Р мас. %) без разделки кромок при различных мощностях излучения от 2,5 до 4,0 кВт. Излучение фокусировали линзой с фокусным расстоянием 200 мм. Сварку вели с по-

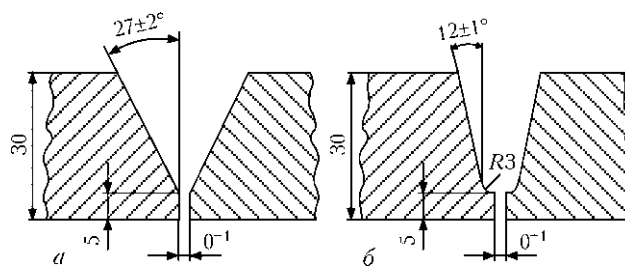


Рис. 1. Схема кромок для лазерной сварки V- (а) и U-образной (б) разделки



мощью трехкоординатного манипулятора [2]. Как правило, при лазерной сварке применяют защиту струей газа, направленной в зону воздействия лазерного излучения на металл. Защищая металл шва от окисления, газовая струя отклоняет поток паров и брызги с оси распространения лазерного излучения и снижает экранирующее действие плазмы, существующей в кратере и над облучаемой поверхностью. В качестве защитных газов использовали углекислый газ CO_2 и смесь 82 % CO_2 + 18 % Ar.

Основным критерием для установления оптимальных условий и параметров лазерной сварки являлось качество сварного соединения. Контроль качества осуществляли путем изучения макроструктуры в поперечном сечении темплетов, вырезанных из сварных соединений. Качество соединения считалось удовлетворительным при отсутствии пор, трещин, несплавлений, шлаковых включений, а также при соответствии норм вогнутости и выпуклости корня шва с обратной стороны.

Из табл. 1 видно, что лучшую защиту металла шва обеспечивает углекислый газ. При сварке в смеси на выбранной скорости сварки образовывались поры.

В табл. 2 приведены данные по влиянию расфокусировки излучения на геометрию проплавления при защите углекислым газом и смесью (CO_2 + Ar). При этом поверхность свариваемых деталей располагали выше или ниже фокальной плоскости объектива, где сфокусированный пучок

имеет наименьший диаметр. Диаметр сфокусированного луча оказывает непосредственное влияние на плотность мощности и соответственно на геометрию проплавления. Наилучшие результаты достигаются при заглублинии фокуса под поверхность образца на 2,0 мм. Во всех вариантах зону излучения целесообразно защищать углекислым газом. При использовании смеси газов и выбранной скорости сварки практически во всех случаях образовывались поры. Поэтому в дальнейших экспериментах основную защиту осуществляли углекислым газом (подача в голову ванны). Для дополнительной защиты кристаллизующегося металла шва в хвост ванны подавали аргон.

Основными особенностями сварки теплоустойчивых сталей перлитного класса являются высокая чувствительность их к скорости охлаждения ниже температур аустенизации и необходимость сохранения стабильности структуры, а также механических свойств, уровень которых в значительной мере достигается путем термического упрочнения стали до сварки [3]. Учитывая высокую склонность этих сталей к образованию хрупких закалочных структур в металле ЗТВ, сварку необходимо проводить с предварительным и сопутствующим подогревом, а сварные соединения подвергать высокому отпуску. Кроме того, при многопроходной сварке металла толщиной более 20 мм для уменьшения риска образования холодных трещин корень шва рекомендуется выполнять

Таблица 1. Влияние мощности излучения и защитного газа на макроструктуру и геометрию сварного соединения стали 20 толщиной 5 мм

Мощность, кВт	CO_2	Смесь (82 % CO_2 + 18 % Ar)
4		
3,5		
3		
2,8		
2,5		



Таблица 2. Влияние расфокусировки излучения и защитного газа на макроструктуру и геометрию сварного соединения стали 20 толщиной 5 мм

Заглубление	CO ₂	Смесь (82 % CO ₂ + 18% Ar)
+5		
+3		
+2		
+1		
0		
-1		
-2		
-3		
-5		

более пластичным материалом, чем при заполнении разделки (при аргодуговой сварке неплавящимся электродом используется проволока Св-08Г2С или Св-08ГС). В связи с этим последующие эксперименты по сварке корневых швов соединений роторной стали 25Х2НМФА (0,220 С; 0,3 Si; 0,44 Mn; 1,87 Cr; 1,38 Ni; 0,36 Мо; 0,04 V; 0,009 S; 0,008 Р мас. %) проводили с предварительным подогревом до 250...300 °С и с использованием пластичной присадочной проволоки.

Отработку технологии лазерной сварки корневых швов стыковых соединений из стали 25Х2НМФА толщиной 30 мм проводили на жестких пробах (рис. 2) с подачей и без подачи присадочной проволоки. В качестве присадочного материала использовали проволоку Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Для сварки корневых швов исследовали несколько конструкций разделки кро-

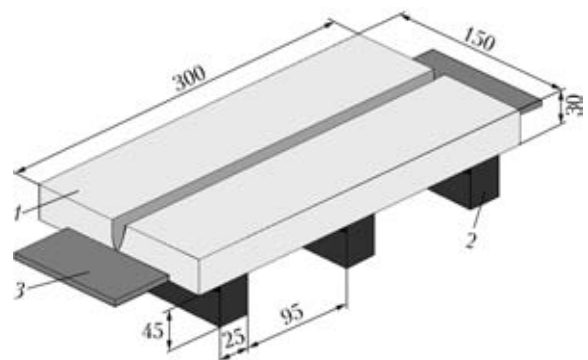


Рис. 2. Схема жесткой пробы из стали 25Х2НМФА: 1 — пластина; 2 — ребро жесткости; 3 — выводная планка

мок жестких стыков (см. рис. 1). Наилучшей формой оказалась U-образная разделка (рис. 1, б). Притупление во всех случаях составляло 5 мм.

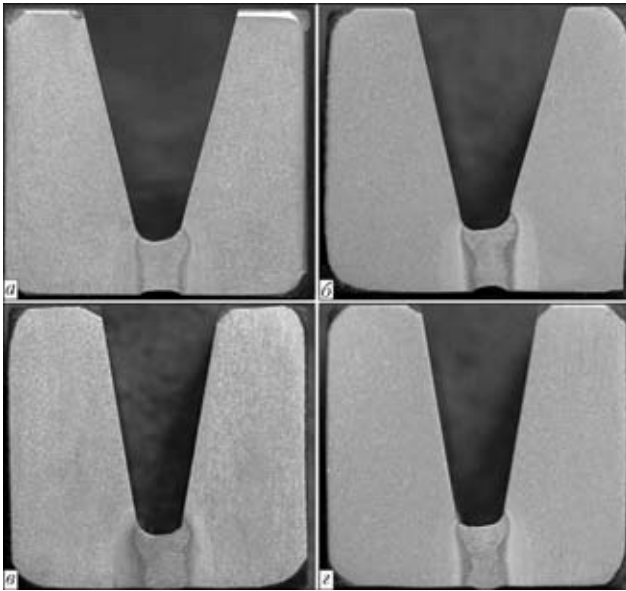


Рис. 3. Макрошлифы корневого шва, выполненного лазерной сваркой с V- (а, б) и U-образной (в, з) разделкой и притуплением 5 мм

При выборе типа разделки стремились получить сварное соединение с хорошим проваром корня шва при минимальном расходе наплавленного металла и в то же время простую в изготовлении форму кромок. U-образная подготовка кромок по сравнению с V-образной требует меньшего количества наплавленного металла, а также благодаря более широкому зазору в корне шва облегчает ведение процесса при наложении первого корневого шва. При сварке с V-образной разделкой без присадочной проволоки шов имеет ослабленное сечение, втянут внутрь с обратной стороны разделки (рис. 3, а), и вероятность разрушения такого шва достаточно высока. При сварке V-образной разделки с применением присадочной проволоки (рис. 3, б) получается несколько боль-

шее сечение, но обратное формирование ввиду отсутствия своеобразного концентратора (канавка вместо корневого валика) является неприемлемым.

Обработка и обобщение результатов исследования качества сварных соединений показали, что путем выбора параметров лазерной сварки и скорости подачи присадочной проволоки можно достичь оптимальной геометрии, удовлетворительного формирования и требуемого усиления корневого шва.

Проведенные исследования показали, что излучение Nd:YAG лазера мощностью 4,4 кВт при скорости сварки 16 м/ч позволяет получить в стыковом соединении корневой шов с полным проплавлением и хорошим обратным формированием.

Оптимальный режим сварки корневых швов соединений стали 25Х2НМФА с U-образной разделкой (рис. 3, в, з) следующий: мощность излучения 4 кВт; скорость сварки 16 м/ч; фокусное расстояние 200 мм; заглубление фокуса 2 мм; расход газа: CO_2 — 20 л/мин (в голову ванны); Ar — 10 л/мин (в хвост ванны); скорость подачи проволоки диаметром 1,2 мм — 38,4 м/ч.

Таким образом, результаты опытов по лазерной сварке корневых швов в нижнем положении показали, что при надлежащей сборке и соблюдении режимов сварки обеспечивается полное проплавление корня шва без дефектов (пор и трещин) с хорошим обратным формированием.

1. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н. Лазерная сварка металлов. — М.: Высш. шк., 1988. — 208 с.
2. Лазерная сварка тонколистовых сталей с использованием специальных приемов / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, А. В. Сиора и др. // Автомат. сварка. — 2003. — № 1. — С. 41–44.
3. *Машиностроение: Технология сварки, пайки и резки* / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 2006. — Т. 3. — 768 с.

Technology of laser welding of root welds from heat-resistant steel is described. Optimum conditions of welding for sound formation of root welds with complete penetration and smooth transition from the back bead to the base metal were determined.

Поступила в редакцию 19.05.2008



ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ УСИЛЕНИЯ СВАРНОГО ШВА

В. В. ДОЛИНЕНКО, канд. техн. наук, **Т. Г. СКУБА**, **В. А. КОЛЯДА**, инженеры,
Е. В. ШАПОВАЛОВ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложен подход к построению оптимальной системы автоматического управления формированием усиления сварного шва с транспортным запаздыванием в контуре обратной связи в условиях сварки МАГ. Для построения оптимального регулятора создана динамическая модель формирования усиления сварного шва. Математическое моделирование проводили с использованием пакета MATLAB. Разработанная система управления обеспечивает минимальную продолжительность процесса при заданных ограничениях динамики регулирующих воздействий.

Ключевые слова: сварка МАГ, динамическая модель, формирование усиления сварного шва, математическое моделирование, оптимальная система управления, транспортное запаздывание

Обеспечение оптимальной формы шва является одной из основных задач при производстве сварных конструкций. Это связано с тем, что при оптимальной форме усиления шва возможно уменьшение значений коэффициента концентрации напряжений и повышение работоспособности сварных конструкций. Кроме того, обеспечение необходимых размеров шва позволяет минимизировать перерасход сварочных материалов в условиях массового производства. До настоящего времени управление формированием сварного шва в основном реализуется по разомкнутой схеме путем формирования технологических установок на параметры режима сварки. Особенности построения разомкнутых систем управления формированием шва, основанных на регрессионных моделях, рассмотрены в работе [1]. Для управления формой шва применяют также механические колебания сварочного инструмента и магнитное управление сварочной ванной [2]. Все разомкнутые способы управления формированием шва имеют один общий недостаток, связанный с отсутствием механизма компенсации внешних возмущений, которые воздействуют на изделие в процессе дуговой сварки и могут привести к отклонениям геометрических параметров сварного шва от заданных значений. К таким возмущениям можно отнести, например, параметры окружающей среды, состояние поверхности и отклонения в геометрических параметрах объекта сварки. Одним из способов компенсации внешних возмущений является применение систем автоматического управления формированием сварного шва с замкнутой обратной связью. Перспективным направлением дальнейшего развития систем управления дуговой сваркой является разработка

и исследование оптимальных и адаптивных систем, основные преимущества которых показаны в работах [3–5]. Необходимость применения методов теории оптимального управления в сварке связана с высокими требованиями к надежности и долговечности сварных конструкций [6].

Целью настоящей работы является создание системы управления формированием сварного шва при сварке МАГ с использованием в цепи обратной связи лазерно-телевизионного сенсора (ЛТС), который предназначен для измерения геометрических параметров валика усиления сварного шва.

Формализуем задачу управления, т. е. заменим объект управления математической моделью, которая описывает существенные особенности задач и целей управления. Процесс формирования валика сварного шва представляет собой многомерный связанный объект управления, поведение которого в первом приближении можно описать системой дифференциальных уравнений первого порядка. В пространстве состояний уравнения объекта имеют вид

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{V}_0, \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{V}_n, \quad (2)$$

где \mathbf{x} — вектор переменных состояния процесса формирования валика $(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$; \mathbf{u} — вектор управляющих воздействий процесса сварки $(u_1, u_2, \dots, u_m)^T$; \mathbf{y} — вектор наблюдений геометрических параметров валика $(y_1, y_2, \dots, y_l)^T$; \mathbf{A} — матрица состояний системы размером $n \times n$; \mathbf{B} — матрица управлений $(n \times m)$; \mathbf{C} — матрица наблюдений $(l \times n)$; $\mathbf{V}_0(t)$ — матрица коэффициентов входных возмущений; $\mathbf{V}_n(t)$ — матрица коэффициентов шумов наблюдений; t — время.

Матрицы $\mathbf{V}_0(t)$, $\mathbf{V}_n(t)$ представляют собой белые шумы с вероятностными характеристиками:



$$M[\mathbf{x}_0] = \bar{\mathbf{x}}_0 \text{ (среднее значение);}$$

$$M[(\mathbf{x}_0 - \bar{\mathbf{x}}_0)(\mathbf{x}_0 - \bar{\mathbf{x}}_0)^T] = \mathbf{P}_0;$$

$$M[(V_0(t) - V_0^T(t'))] = \mathbf{Q}_0 \delta(t - t');$$

$$M[(V_H(t) - V_H^T(t'))] = \mathbf{R}_0 \delta(t - t');$$

$$M[V_0(t)] = 0; M[V_H(t)] = 0; M[(V_0(t) V_H^T(t'))] = 0,$$

где $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(t_0)$; $\mathbf{Q}_0, \mathbf{P}_0$ — положительно полуопределенные матрицы; \mathbf{R}_0 — положительно определенная матрица; $\delta(t - t')$ — функция Кронекера; t' — момент времени.

Критерий оптимальности, который необходимо минимизировать, задается в виде функционала

$$J = M[\mathbf{x}^T(t_f) \mathbf{F} \mathbf{x}(t_f) + \int_0^{t_f} [\mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t)] dt], \quad (3)$$

где M — математическое ожидание; \mathbf{F} — матрица граничных условий; \mathbf{Q}, \mathbf{R} — матрицы весовых коэффициентов.

Задача оптимального управления формулируется следующим образом [7]: при заданных уравнениях объекта (1) и (2), ограничениях на управление $\mathbf{u}(t) \in U, U_t \subseteq \mathcal{R}^m$ (где \mathcal{R}^m — m -мерное линейное пространство), краевых условиях $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$ и $\mathbf{x}(t_f) = 0$ необходимо определить такое управление с обратной связью $\mathbf{u} = \mathbf{u}\{y(\tau), t_0 \leq t \leq t_f\}$, где $t_0 \leq \tau \leq t_f$, при котором критерий оптимальности (3) принимает минимальное значение.

Для решения поставленной задачи представим модель объекта управления (ОУ), которым является процесс формирования сварного шва, в виде связанной системы динамических звеньев. Переходные функции звеньев должны максимально точно описывать переходные процессы на выходе ОУ. Для исследования характера этих процессов и получения в результате априорной информации о динамических характеристиках ОУ подготовлены и проведены непосредственно сварочные эксперименты.

При проведении экспериментов регулирующие воздействия формировались в виде отклонений по напряжению U_d и току сварки $I_{св}$; скорость сварки $v_{св}$ поддерживали постоянной. Сварку проводили на токе обратной полярности в нижнем положении в смеси защитных газов (85 % Ar + 15 % CO₂). Использовали источник питания дуги «Fronius Trans Puls Synergic-5000» и механизм подачи проволоки «Fronius VR 2000». Объектом сварки была пластина углеродистой стали толщиной 8 мм. При сварке использовали электродную проволоку Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Номинальные параметры режима сварки: $I_{св0} = 160$ А; $U_{д0} = 19$ В; $v_{св0} = 7$ мм/с. Амплитуда отклонений регулирующих воздей-

ствий составляла для тока $\Delta I_{св \max} = 15$ А, для напряжения $\Delta U_{д \max} = 2$ В.

В ходе экспериментов установлено, что скачкообразные изменения регулирующих сигналов приводят к паразитным колебаниям поверхности валика и формированию подрезов. С целью предотвращения возникновения дефектов в сварном шве скорость нарастания/спада регулирующих сигналов была ограничена для напряжения 1 В/с и тока сварки 10 А/с. Результаты экспериментов показали, что для процесса формирования сварного валика характерно как динамическое поведение, так и наличие двух различных транспортных запаздываний при формировании ширины и высоты валика.

Введем следующие обозначения: e, g — ширина и высота валика сварного шва; $\Delta e, \Delta g$ — конечные приращения ширины и высоты валика относительно номинальных значений e_0 и g_0 ; $\Delta U_d, \Delta I_{св}$ — конечные приращения регулирующих воздействий; $U_d, I_{св}$ — фактические значения регулирующих воздействий. Таким образом, справедливы следующие уравнения:

$$U_d(t) = U_{д0} + \Delta U_d(t); I_{св}(t) = I_{св0} + \Delta I_{св}(t); \quad (4)$$

$$e(t) = e_0 + \Delta e(t); g(t) = g_0 + \Delta g(t), \quad (5)$$

где $\Delta U_d(t) < \Delta U_{д \max}$; $\Delta I_{св}(t) < \Delta I_{св \max}$.

Представим модель формирования валика шва для установившегося режима сварки в виде статической связанной системы, линеаризованной в окрестности рабочей точки ($U_{д0}, I_{св0}$).

В матричной форме запишем

$$\begin{bmatrix} \Delta e(t) \\ \Delta g(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{21} \\ k_{12} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_d(t) \\ \Delta I_{св}(t) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}$ — коэффициенты усиления выход-вход, значения которых требуется определить.

Для оценки статических и динамических характеристик линеаризованной модели процесса формирования валика проведены сварочные эксперименты, в которых использовали импульсные регулирующие воздействия U_d и $I_{св}$ с ограниченной скоростью нарастания/спада. Отметим, что при этом фактически были определены постоянные времени динамической системы источник питания–дуга–сварочная ванна–валик. Поэтому при изменении номенклатуры сварочного оборудования или технологического процесса значения постоянных времени требуется уточнить. Измерение геометрических параметров валика выполняли после сварки с помощью ЛТС [8] с шагом дискретизации 1 мм. Из полученных массивов данных геометрических параметров валиков вычтены средние значения $e_0 = 7,85$ мм и $g_0 = 2,2$ мм, а



затем сглажены линейным фильтром скользящего среднего

$$N_O[i] = \frac{\sum_{k=i-3}^{i+3} N_I[k]}{7},$$

где N_O и N_I — сглаженный и исходный массивы данных; i, k — целые числа (индексы массивов). Для того чтобы корректно оценить постоянные времени четырех инерционных звеньев, которые составляют модель, массивы данных сдвинуты по направлению к электроду (вправо по оси x) на соответствующие рассчитанные расстояния транспортных запаздываний. Значения транспортных запаздываний определяются следующим образом. Известно, что ширина и высота валика формируется на фронте затвердевания металла сварочной ванны в ее средней и хвостовой части [9]. Поэтому транспортные запаздывания измерений высоты τ_g и ширины τ_e валика можно определить из следующих формул:

$$\tau_g = \frac{L_{TV} - L_g}{v_{CB}}; \quad \tau_e = \frac{L_{TV} - L_e}{v_{CB}}, \quad (7)$$

где L_{TV} — расстояние между световым следом ЛТС и электродом горелки, мм; L_g — расстояние от электрода до крайней точки хвостовой части сварочной ванны, мм; L_e — расстояние от электрода до средней точки сварочной ванны, мм. Для расчета расстояний L_e и L_g синтезирована регрессионная модель, при разработке которой использован вычислительный эксперимент над представленной моделью процесса распространения тепла в полубесконечном теле при нагреве его подвижным нормально-круговым источником [10]:

$$\begin{aligned} L_g &= -0,69 + 0,041U_d + 0,0048I_{CB} + 0,3v_{CB} \text{ [см]}; \\ L_e &= 0,08 + 0,004U_d + 0,0016I_{CB} + 0,4v_{CB} \text{ [см]}. \end{aligned}$$

На рис. 1 представлены графики изменений геометрических параметров валиков в зависимости от линейно изменяющихся регулирующих воздействий, на которые для сравнения наложены реакции инерционных звеньев. Можно отметить нелинейную динамику изменений ширины и высоты валика при воздействии импульса тока сварки, что проявляется в уменьшении длительности импульса выхода за счет фазового сдвига его переднего фронта (рис. 1, I).

Динамический объект управления синтезируется следующим образом. В связи с тем, что требуется ограничить динамику изменения регулирующих воздействий U_d и I_{CB} , вектор управлений задается в виде производных по времени

$\mathbf{u} = \left[\frac{dU_d}{dt} \quad \frac{dI_{CB}}{dt} \right]^T$. Тогда для согласования управляющих и регулирующих воздействий в состав ОУ необходимо добавить идеальное интегрирующее звено. Вектор выхода (вектор наблюдения) задается как $\mathbf{y} = [\Delta e(t) \Delta g(t)]^T$. Результирующее уравнение выхода в операторном виде запишется следующим образом:

$$\mathbf{y} = W(p)\mathbf{u}, \quad (8)$$

где $W(p) = W_3(p)W_2(p)W_1(p)$; p — оператор Лапласа; $W_3(p)$ — передаточная функция идеального звена транспортного запаздывания; $W_2(p)$ — передаточная функция аperiodического звена 1-го порядка; $W_1(p)$ — передаточная функция идеального интегрирующего звена. Эти передаточные функции в матричной форме имеют вид

$$W_1(p) = \begin{bmatrix} \frac{1}{p} & 0 \\ 0 & \frac{1}{p} \end{bmatrix}; \quad W_2(p) = \begin{bmatrix} \frac{k_{11}}{1 + T_{11}p} & \frac{k_{21}}{1 + T_{21}p} \\ \frac{k_{12}}{1 + T_{12}p} & \frac{k_{22}}{1 + T_{22}p} \end{bmatrix};$$

$$W_3(p) = \begin{bmatrix} e^{-\tau_e p} & 0 \\ 0 & e^{-\tau_g p} \end{bmatrix}.$$

После подстановки передаточных функций $W_3(p)$, $W_2(p)$ и $W_1(p)$ в (8) уравнение выхода запишется следующим образом:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \frac{k_{11}}{(1 + T_{11}p)p} e^{-\tau_e p} & \frac{k_{21}}{(1 + T_{21}p)p} e^{-\tau_g p} \\ \frac{k_{12}}{(1 + T_{12}p)p} e^{-\tau_e p} & \frac{k_{22}}{(1 + T_{22}p)p} e^{-\tau_g p} \end{bmatrix} \mathbf{u}. \quad (9)$$

Ограничения имеют вид

$$\left| \frac{dU_d(t)}{dt} \right| \leq u_{\max 1}, \quad \left| \frac{dI_{CB}(t)}{dt} \right| \leq u_{\max 2}, \quad (10)$$

где $u_{\max 1} \in U$, $u_{\max 2} \in U$, $U \subseteq \mathfrak{R}_+^2$, \mathfrak{R}_+^2 — двумерное пространство неотрицательных чисел.

На рис. 2 представлена структурная схема передаточной функции $W(p)$.

Для того чтобы воспользоваться известной методикой синтеза оптимальной системы автоматического управления (САУ) экспоненциальные функции заменяют рациональными полиномами. С достаточной точностью $e^{-\tau p}$ аппроксимируем полиномом Паде [11] 5-й степени:

$$e^{-\tau p} = \frac{\tau^5 p^5 - 30\tau^4 p^4 + 420\tau^3 p^3 - 3360\tau^2 p^2 + 15120\tau p - 30240}{\tau^5 p^5 + 30\tau^4 p^4 + 420\tau^3 p^3 + 3360\tau^2 p^2 + 15120\tau p + 30240}. \quad (11)$$

Полученную передаточную функцию необходимо представить системой в пространстве состояний. Исходя из условий сварки ($v_{CB} = \text{const}$)

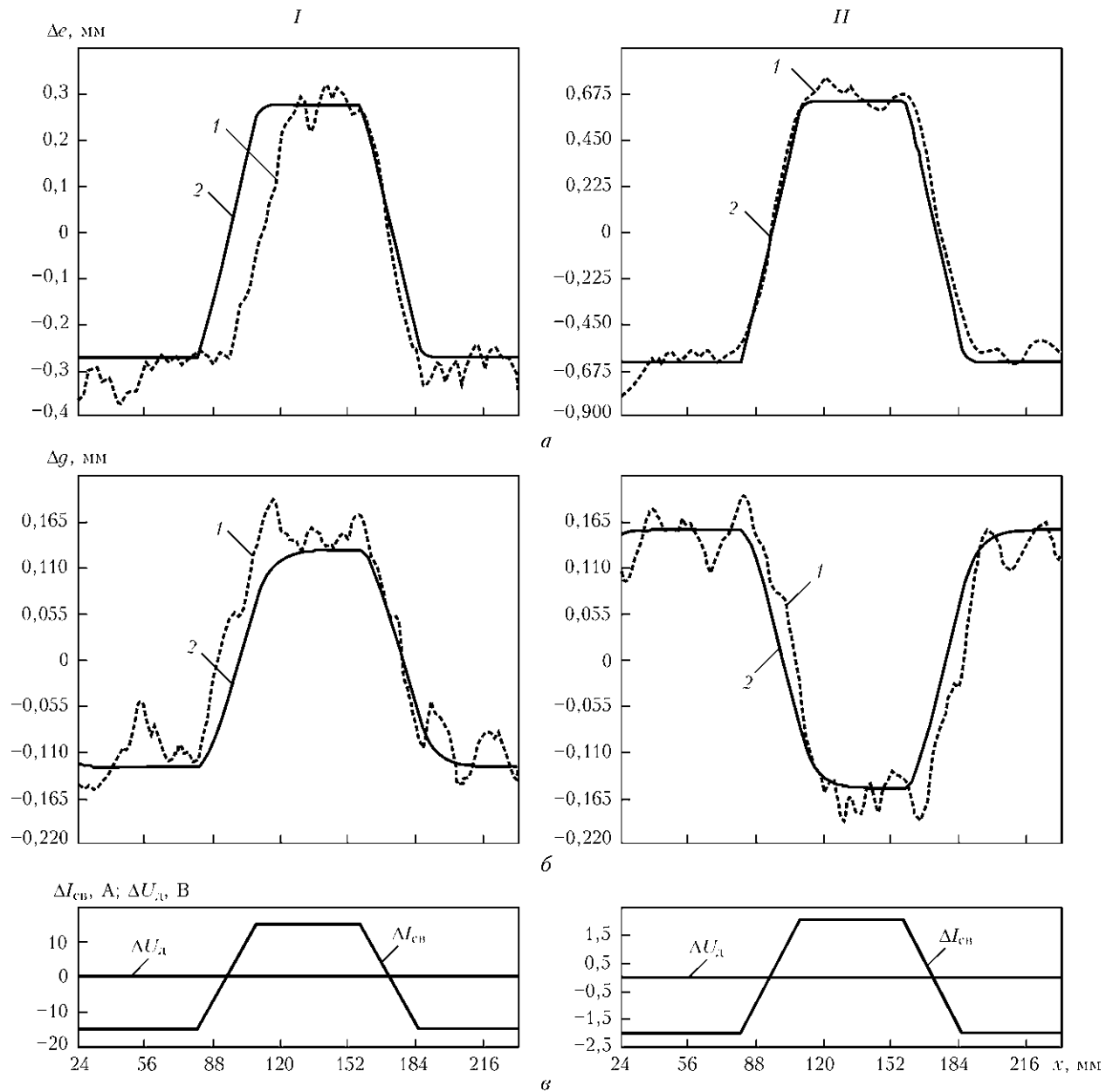


Рис. 1. Результаты идентификации параметров динамических звеньев модели формирования усиления шва для импульса тока сварки (I) и напряжения (II); а, б — изменения соответственно ширины и высоты усиления; в — приращения регулирующих воздействий соответственно по току сварки и напряжению: 1 — реакция динамических звеньев модели; 2 — геометрические параметры валика усиления, измеренные ЛТС

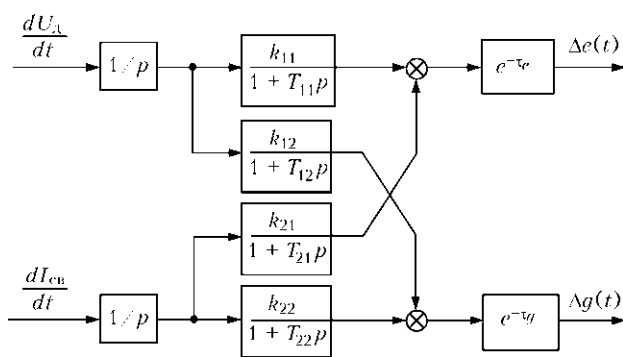


Рис. 2. Структурная схема динамической модели формирования усиления шва

и заданного расстояния $L_{TV} = 70$ мм определены средние значения транспортных запаздываний — $\tau_e = 9,52$ с; $\tau_g = 8,38$ с. Расчеты выполнены исходя из допущения, что при выбранном диапазоне параметров режима сварки транспортные запаздывания τ_g и τ_e изменяются незначительно. Отсюда следует, что ОУ является стационарным.

Матрицы объекта управления в пространстве состояний **A** (14×14), **B** (14×2) и **C** (2×14) рассчитаны в пакете MATLAB с помощью функции *ss* [12].

Анализ полученных матриц показывает, что количество строк матрицы выхода **C** меньше размерности матрицы **A**, которая определяет вектор



состояния, для восстановления которого целесообразно применение фильтра Калмана–Бьюси — оптимального наблюдателя состояния.

Синтез оптимальной системы управления формированием валика шва выполняется по методике [7], основанной на известном принципе разделения или стохастической эквивалентности [13, 14]. При этом решаются следующие взаимосвязанные задачи: разработка детерминированного оптимального регулятора состояния и синтез фильтра Калмана–Бьюси. Разработка детерминированного оптимального регулятора формулируется как задача определения оптимального управления с обратной связью для объекта (1), (2) при критерии оптимальности (3)

$$u = R^{-1} B^T K \hat{x}, \quad (12)$$

где \hat{x} — оптимальная оценка состояния ОУ, которая определяется с помощью оптимального наблюдателя состояния — фильтра Калмана–Бьюси; K — симметрическая матрица, определяемая из матричного уравнения Риккати

$$\dot{K} = -KA - A^T K + KBR^{-1}B^T K - Q \quad (13)$$

при граничном условии $K(t_f) = F$.

Требуемые ограничения на управление обеспечим соответствующим выбором матрицы R и включением в структуру оптимального регулятора вспомогательного элемента, который описывается функцией $u_{out\ k} = sat(u_{in\ k}, u_{max\ k})$:

$$u_{out\ k} = \begin{cases} u_{in\ k}, & \text{если } u_{in\ k} < u_{max\ k}, \\ u_{max\ k}, & \text{если } u_{in\ k} \geq u_{max\ k} \end{cases} \text{ при } k = 1, 2, \dots, m. \quad (14)$$

Синтез фильтра Калмана–Бьюси выполняется следующим образом. Поскольку шумы процесса сварки и наблюдения не коррелированы ($S_0(t) \equiv 0$), то оценка $\hat{x}(t)$ является несмещенной и оптимальной в том случае, если она удовлетворяет уравнению

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K^0(y - C\hat{x}); \quad \hat{x}(t_0) = \bar{x}_0 \quad (15)$$

с матрицей коэффициентов усиления $K^0 = PC^T R_0^{-1}$, где матрица P — решение уравнения Риккати:

$$\dot{P} = AP + PA^T - PC^T R_0^{-1} CP + Q_0, \quad P(t_0) = P_0. \quad (16)$$

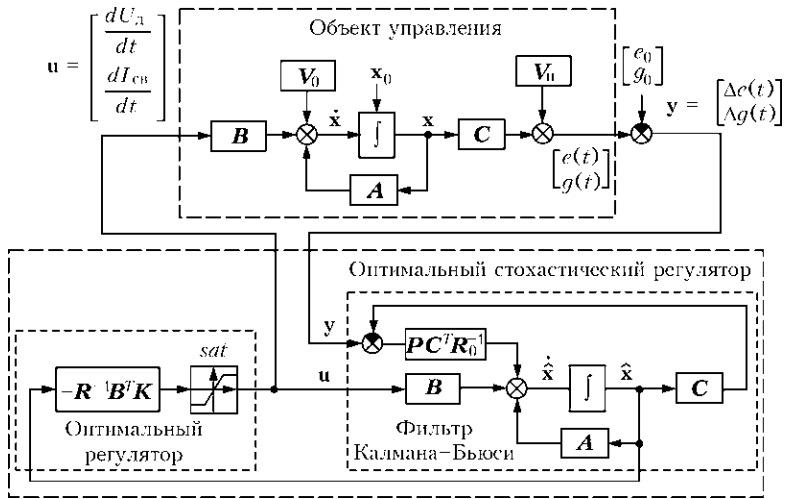


Рис. 3. Структурная схема модели оптимальной САУ

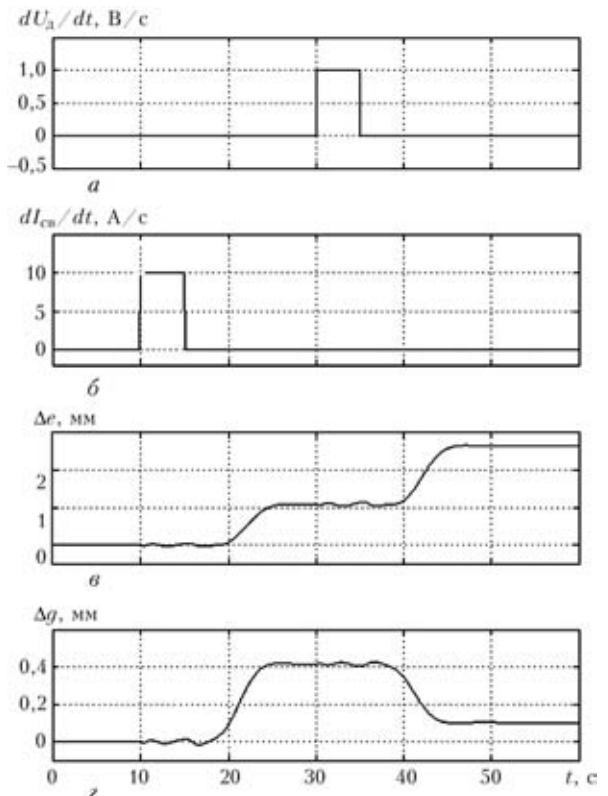


Рис. 4. Переходные характеристики динамической модели объекта управления: а, б — управляющие воздействия соответственно по напряжению и току сварки; в, г — изменения соответственно ширины и высоты шва

Расчет стохастического оптимального регулятора выполнен средствами пакета MATLAB (используется функция *lqry*). Получено решение уравнения Риккати в виде матрицы K (14×14). При расчете использовали матрицы весовых коэффициентов вектора наблюдений Q (2×2) и вектора управления R (2×2) в виде

$$Q = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0,015 \end{bmatrix}.$$

Для расчета фильтра Калмана–Бьюси использовали функцию *kalman*. В качестве исходных ус-

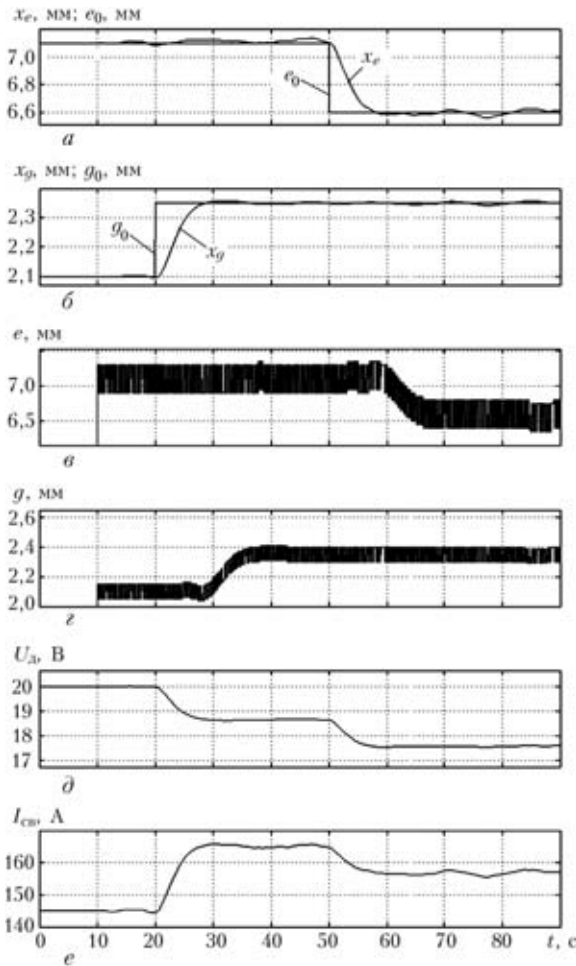


Рис. 5. Графики переходного процесса в оптимальной САУ при изменении задающих воздействий e_0 и g_0 на 20-, 50-й с: а, б — ширина x_e и высота x_g валика в текущий момент времени; в, г — сигналы наблюдения ширины и высоты валика; д, е — регулирующие воздействия

ловий заданы матрицы ОУ в пространстве состояний, матрицы коэффициентов входных возмущений V_0 (14×2) и шумов измерений V_n (2×2), а также ковариационные матрицы шумов

$$Q_0 = \begin{bmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,2 \end{bmatrix}; R_0 = \begin{bmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,004 \end{bmatrix}.$$

Структурная схема модели оптимальной САУ (рис. 3) включает модель ОУ и модель стохастического оптимального регулятора, который состоит из оптимального регулятора состояний, элемента ограничения управляющих воздействий и оптимального наблюдателя состояния — фильтра Калмана–Бьюси. Оптимальный регулятор формирует управления в виде вектора производных регулирующих воздействий U_d и $I_{св}$. В качестве сигналов обратной связи используется вектор состояния оптимального наблюдателя \hat{x} , который вычисляется на основе априорной информации о матрицах объекта управления A , B и C , а также с учетом текущих значений вектора управлений и вектора выхода $[\Delta e(t)\Delta g(t)]^T$.

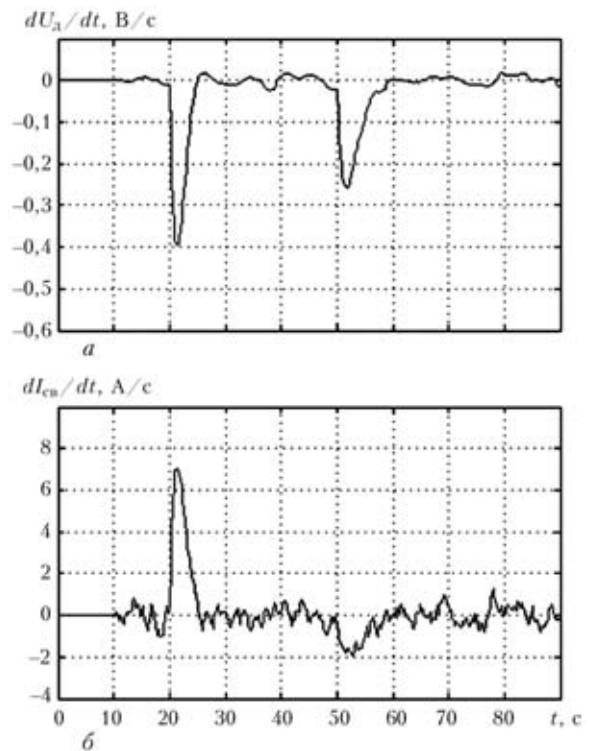


Рис. 6. Графики сигналов управления по напряжению (а) и току (б) сварки в оптимальной САУ

Исследованы переходные характеристики модели ОУ. На рис. 4 показаны графики входных и выходных сигналов при формировании импульсных управлений длительностью 5 с и амплитудами соответственно 1 В/с и 10 А/с. Эти кривые имитируют сигналы в гипотетической САУ с ЛТС, который формирует на поверхности изделия световой след на расстоянии $L_{TV} = 70$ мм от оси электрода. При этом происходит изменение значений геометрических параметров валика с некоторыми временными запаздываниями относительно момента времени подачи управляющих воздействий.

Выполнено моделирование переходных и стационарных процессов в САУ формированием валика шва (рис. 5 и 6). При этом имитировались значительные уровни шумов наблюдения ширины 0,2 мм и высоты усиления 0,05 мм. Определено, что при установившемся режиме флуктуации выходных параметров изменяются незначительно — ширина и высота усиления соответственно не более чем 0,05 и 0,02 мм. Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что разработанная оптимальная стохастическая САУ с транспортным запаздыванием в контуре обратной связи формирует приемлемую траекторию управления процессом сварки МАГ. При управлении процессом формирования усиления шва, описываемого многомерной динамической системой, обеспечивается минимальное время переходного процесса (не более 8 с) при отсутствии перерегулирования. Согласно рис. 5, в моменты времени 20 и 50 с



при ступенчатом изменении задающих воздействий одновременно начинают изменяться управляющие воздействия, что вызывает движение переменных состояния ОУ x_e и x_g . Траектории изменения регулируемых параметров имеют апериодический характер.

Разработанный оптимальный регулятор обеспечивает ограничения динамики регулируемых воздействий. Из рис. 6 следует, что несмотря на наличие в ОУ транспортного запаздывания и значительного уровня шумов сигналы управления не превышают уровней ограничения 1 В/с (для dU/dt) и 10 А/с (для $dI_{св}/dt$).

Таким образом, предложенный подход синтеза оптимальной САУ для управления сваркой МАГ, очевидно, может развиваться в направлении как уточнения структуры динамической модели формирования сварного шва, так и расширения вектора управляющих воздействий (например, регулирование скорости сварки) или вектора наблюдений (например, измерение зазора в стыке).

1. *Сергацкий Г. Н., Дубовецкий С. В.* Системы разомкнутого управления формированием шва при дуговой сварке // Автомат. сварка. — 1986. — № 6. — С. 37–48.
2. *Размышляев А. Д.* Физические основы формообразования валиков и швов при дуговой наплавке и сварке с управляющими воздействиями: Дис. ... д-ра техн. наук. — Мариуполь, 1996. — 403 с.
3. *Гуревич В. И.* Динамика тепловых систем автоматического управления режимом сварки // Управление свароч-

The method is proposed for development of the optimal system for automatic control of formation of the reinforced weld with transportation lag in the feedback loop under MAG welding conditions. The dynamic model of formation of the reinforced weld was developed to build the optimal controller. Mathematical modelling was performed by using the MATLAB software package. The developed control system provides minimal duration of the transient process at preset limitations of dynamics of the control effects.

- ными процессами: Сб. науч. тр. (межвузовский). — Тула: ТПИ, 1983. — С. 3–10.
4. *Тригубов Г. П., Горбач В. Д.* Оптимизация размеров сварных швов за счет адаптивного управления процессом дуговой сварки // Свароч. пр-во. — 2003. — № 7. — С. 19–21.
5. *Гладков Э. А.* Задачи прогнозирования качества и управления формированием шва в процессе сварки с использованием нейросетевых моделей // Там же. — 1996. — № 10. — С. 36–41.
6. *Математическое моделирование сварочных процессов для создания систем прогнозирования качества соединений и оптимального управления* / Б. Е. Патон, Н. В. Подола, В. Г. Квачев, А. А. Урсатьев // Автомат. сварка. — 1971. — № 7. — С. 1–5.
7. *Ким Д. П.* Теория автоматического управления. В 2-х т.: Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие. — М.: Физматлит, 2004. — 464 с.
8. *Кисилевский Ф. Н., Коляда В. А.* Система лазерного слежения за валиком усиления сварного шва // Автомат. сварка. — 2006. — № 1. — С. 60–62.
9. *Ерохин А. А.* Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности. — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.
10. *Рыкалин Н. Н., Углов А. А.* Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
11. *Бейкер Дж., Грейвс-Моррис П.* Аппроксимации Паде. — М.: Мир, 1986. — 502 с.
12. *Перельмутер В. М.* Пакеты расширения MATLAB. Control System Toolbox и Robust Control Toolbox. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. — 224 с.
13. *Квакернак Х., Сиван Р.* Линейные оптимальные системы управления. — М.: Мир, 1977. — 650 с.
14. *Брайсон А., Хо Ю-Ши.* Прикладная теория оптимального управления. — М.: Мир, 1972. — 544 с.

Поступила в редакцию 19.03.2009

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Восемнадцатая ежегодная международная конференция и выставка

4–8 октября 2010

г. Ялта

Научное руководство:

- ◆ Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики
- ◆ Российское общество неразрушающего контроля и технической диагностики
- ◆ Белорусская ассоциация неразрушающего контроля и технической диагностики
- ◆ Институт электросварки им. Е. О. Патона, Днепропетровский национальный университет, НПП «Машиностроение»

Контакты: тел./факс: +38(044) 573-30-40, моб.: +38-067-708-93-95
E-mail: office@conference.kiev.ua,
www.conference.kiev.ua



ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ (Обзор)

Академик НАН Украины С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, Ю. С. НЕЙЛО, инж., В. С. ГАВРИШ, канд. техн. наук, К. В. ГУЩИН, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведен обзор разработок, направленных на повышение энергетических показателей при контактной стыковой сварке, и анализ возможных путей исследований в этом направлении.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, технология, оборудование, источник питания, постоянный ток, переменный ток, ток низкой частоты, вторичный контур, сопротивление контура, энергетические показатели

Мощность оборудования, используемого при контактной стыковой сварке (КСС), составляет десятки и сотни киловатт. Одной из актуальных задач является нахождение путей равномерной загрузки трехфазной питающей сети при однофазной нагрузке в сварочной цепи, характерной для контактного нагрева. Неравномерная нагрузка приводит к большему падению в распределительной сети, создает неблагоприятные условия для эксплуатации другого оборудования, подключенного к этой сети. При выборе источников энергоснабжения однофазных контактных машин приходится ориентироваться на повышенные фазовые нагрузки и соответственно общую мощность источника питания.

В большинстве стандартных машин КСС используется технология, предусматривающая повторно-кратковременный нагрев деталей сопротивлением, когда нагрузка изменяется от нуля до предельного значения, что также отрицательно влияет на потребители энергии в общей сети.

Коэффициент мощности стандартных машин КСС составляет 0,5...0,6, а термический КПД не превышает 30 %. Это обусловлено тем, что сопротивление сварочной цепи машин соизмеримо, а во многих случаях превышает сопротивление в контакте между деталями при их нагреве [1, 2].

В последние десятилетия разработаны различные системы управления силовыми цепями контактных машин, предназначенные для распределения однофазной нагрузки на три фазы [2, 3]. По принципу работы используемые силовые компоненты можно разделить на две категории. В первой коммутация токов производится в первичных обмотках сварочного трансформатора, при этом во вторичной цепи сварочного контура под-

держивается ток пониженной частоты (5...30 Гц) по отношению к 50 Гц питающей сети. Во второй — во вторичных обмотках сварочного трансформатора установлены выпрямители, обеспечивающие протекание в сварочной цепи постоянного тока. Подробный анализ работы преобразователей первой группы приведен в работах [2, 3]. Такие преобразователи находят применение в машинах для точечной и конденсаторной сварки мощностью до 100...150 кВт.

Первый преобразователь частоты и числа фаз для использования при КСС был разработан в ИЭС им. Е. О. Патона еще в начале 1960-х годов [4]. Позже аналогичные преобразователи были разработаны другими фирмами, в частности «Sciaky». Преобразователь (рис. 1) состоит из шести тиристоров (в первых машинах использовались игнитроны).

Низкочастотные преобразователи подобного типа производства фирмы «Sciaky» до настоящего времени используют в мощных машинах для точечной и рельефной сварки. Применение их для стыковой сварки ограничилось выпуском единичных образцов и не получило дальнейшего развития. Это обусловлено прежде всего значительным усложнением конструкции низкочастотного сварочного трансформатора, значительным увеличением его массы, размеров и соответственно стоимости.

В новых поколениях мощных машин для КСС, поставляемых ведущими производителями такого оборудования, в последнее десятилетие используются преобразователи второй категории, предусматривающие выпрямление тока во вторичной цепи.

На рис. 2 представлены схемы трех- и шестиполупериодного выпрямителя, используемого в современных контактных машинах.

Наиболее часто используют отдельные трансформаторы, первичные обмотки которых соединены треугольником или звездой. В цепи пер-

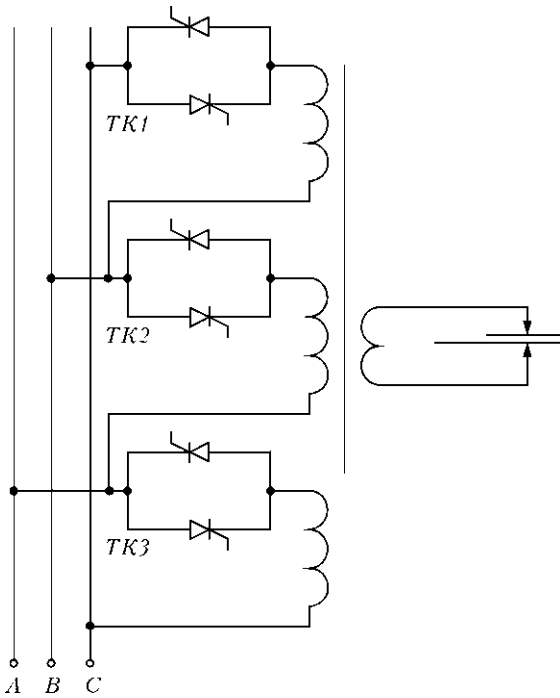


Рис. 1. Схема преобразователя частоты с четырехобмоточным трансформатором (TK1...TK3 — тиристорные контакторы)

вичных обмоток имеются тиристорные контакторы, позволяющие регулировать напряжение, подаваемое на трансформатор. В каждой цепи вторичных обмоток трансформаторов включены одно- или двухплечные выпрямители, вторичные обмотки соединены звездой. Конструктивно выпрямитель представляет собой единый модуль. Трансформаторы и вентили имеют систему охлаждения. Выпрямленный сварочный ток практически постоянный, коэффициент пульсации для трехполупериодного выпрямителя составляет 25, для шестиполупериодного — 5,7 %. Для мощных стыковых контактных машин преимущественно используются шестиполупериодные выпрямители с соединением первичных обмоток на треугольник. Фирмы «Roman transformer», «Safco System s.r.l.», «Dalex Schweissttechnik» в последние годы обеспечивают поставку модулей подобного типа на токи от 17 до 100 кА. Появление на мировом рынке таких систем значительно расширило возможности для создания новых поколений специализированного и универсального оборудования для КСС в различных отраслях промышленности. Использование преобразователей постоянного тока позволяет решить проблему равномерной загрузки сети при использовании мощных контактных машин и повысить эффективность их применения. При этом повышается коэффициент мощности такого оборудования, так как снижаются реактивные потери во вторичном контуре сварочной цепи. Наряду с отмеченными преимуществами в целом применение постоянного тока не позволило

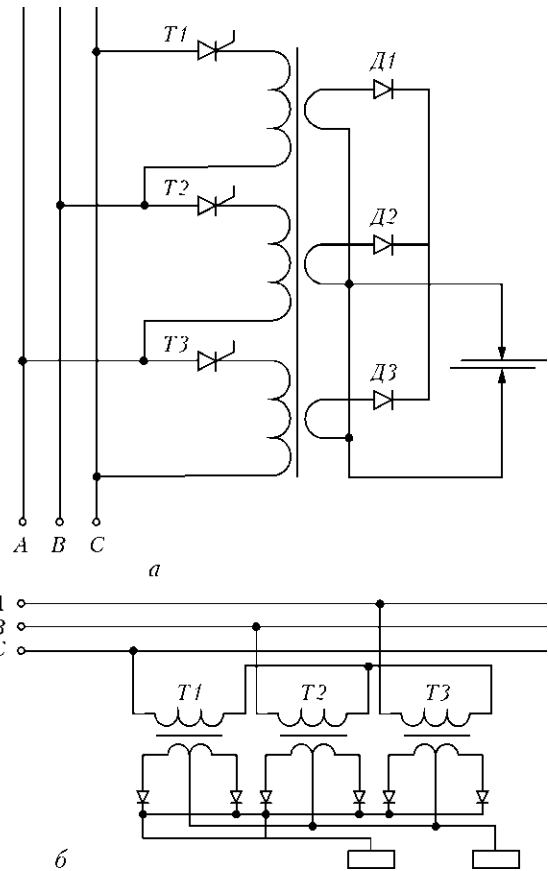


Рис. 2. Схема трех- (а) и шестиполупериодного (б) выпрямителя (T1...T3 — тиристоры; Д1...Д3 — диоды)

существенно понизить общую потребляемую мощность в сварочной цепи по сравнению с аналогичными показателями при питании от 50 Гц. Это обусловлено тем, что при нагреве сопротивлением деталей большого сечения (5...10 тыс. мм²) падение напряжения в контакте между деталями составляет 1,5...2,0 В. Падение напряжения на современных кремниевых вентилях приблизительно такое же, потери энергии в вентилях соизмеримы с расходуемой на сварку. При сварке алюминиевых деталей потери энергии еще выше, поэтому термический КПД процесса нагрева сопротивлением на постоянном токе ниже, чем при использовании преобразователей первой группы, в частности, низкочастотного преобразователя [4]. В таблице приведены технические характеристики некоторых современных машин для КСС рельсов. В них используются мощные выпрямители, позволяющие получать во вторичной цепи токи 50...100 кА. Для сравнения в таблице приведены также аналогичные показатели машин, рассчитанных на однофазную нагрузку.

При одинаковой производительности и мощности сварочных машин машины с трехфазной нагрузкой имеют мощность, распределенную на три фазы. В результате их установочная мощность снижается в $\sqrt{3}$ раз.



Технические характеристики машин КСС рельсов на постоянном и переменном токе фирмы «Schlatter»

Тип машины	Максимальное поперечное сечение, которое сваривается S , мм ²	Номинальная мощность сварочной машины $P_{ном}$, кВт·А	Мощность при коротком замыкании сварочной машины P_{max} , кВт·А	Максимальный вторичный ток I_{2max} , кА
Постоянный ток				
GAAS-80	12000	580	630	80
GAAS-100	20000	580	630	100
Переменный ток				
Aa 50/500u	10000	500	1500	90
Aa 50/450s	10000	450	1300	80
Aa 35/400s	8000	400	1000	70
BHVR 43/120	6000	450	—	—

Применение постоянного тока, судя по опыту эксплуатации такого оборудования, кроме улучшения энергетических показателей, обеспечивает ряд технологических преимуществ. В частности, в рекламных материалах [5] отмечается, что при использовании постоянного тока наблюдается более равномерный нагрев деталей по всему сечению.

Приведенные данные относятся к технологиям сварки, при которых основной нагрев деталей выполняется сопротивлением при коротких замыканиях из торцов.

Возможности дальнейшего повышения термического КПД и снижения потребляемой мощности при использовании таких технологий в значительной мере исчерпаны, по крайней мере, для систем, в которых используются современные полупроводниковые вентили. Более радикальное улучшение этих показателей можно ожидать при нахождении способов повышения эффективности контактного нагрева, предусматривающего повышение контактного сопротивления $R_{к.з}$ либо снижение $Z_{к.з}$ сварочной цепи.

В ИЭС им. Е. О. Патона за последние десятилетия разработано несколько поколений машин КСС деталей из различных сталей и сплавов на основе алюминия, титана, хрома с площадью поперечного сечения до 100 тыс. мм² и более. Они отличаются относительно малой удельной потребляемой мощностью (15 Вт/мм²), высоким коэффициентом мощности (0,80...0,95), высоким термическим КПД (60...70 %). В основу конструкции машин и систем управления положена технология сварки непрерывным оплавлением с программным управлением основными параметрами. В последние годы промышленное применение нашли разновидности этой технологии, получившие название пульсирующего оплавления [6]. Наряду с высокой производительностью она обеспечивает значительное (в 2...3 раза) снижение потребляемой мощности по сравнению с машинами, использующими технологию сварки с нагревом сопротивлением. Это прежде всего обус-

ловлено возможностью получения высококонцентрированного нагрева путем автоматического управления сопротивлением в контакте между деталями $R_{к.з}$ на уровне $R_{к.з} \geq Z_{к.з}$. Для осуществления процесса непрерывного оплавления необходимо в 2...3 раза, а в специализированных машинах более чем в 10 раз снизить значение $Z_{к.з}$, что достигается определенной конструкцией сварочной цепи. Хотя такие машины не обеспечивают трехфазную загрузку сети, в них мощность в фазе ниже, чем в обычных машинах с трехфазной загрузкой. Поскольку большинство указанных машин специализированы на сварку определенных изделий (трубы, рельсы), они имеют индивидуальные источники энергоснабжения (передвижные электростанции), когда требования трехфазной загрузки сети не столь актуальны. В ряде случаев технологии сварки непрерывным оплавлением успешно используют на универсальных стыковых машинах, где существенную реконструкцию вторичного контура трудно выполнить. Весьма эффективным оказалось переоборудование универсальной типовой однофазной рельсосварочной машины МСГУ-500 с использованием низкочастотного преобразователя частоты и числа фаз. Использование во вторичном контуре частоты 5 Гц позволило снизить его сопротивление с 280 до 120 мкОм. При этом напряжение, необходимое для возбуждения непрерывного оплавления при сварке рельсов тяжелых типов, снизилось с 11,5 до 6,26 В [4]. Применение в данном случае технологии сварки непрерывным оплавлением позволило снизить потребляемую мощность в 2,5 раза, сократить длительность сварки и расход электроэнергии в 1,5...2,0 раза.

Рассматривая перспективы дальнейшего совершенствования такого оборудования наряду с нахождением рациональных конструкций вторичного контура с целью минимизации его сопротивления, представляется целесообразным разработать преобразователи первой категории, ориентированных на средние частоты до 30 Гц.

При использовании постоянного тока для сварки непрерывным оплавлением также можно ожидать улучшения энергетических показателей процесса сварки, так как среднее значение $R_{к.з}$ при оплавлении выше, чем при нагреве сопротивлением. Это ухудшает работу вентилях выпрямителей, требующую синхронизации нагрузок. В мировой практике пока нет примеров промышленного использования машин с преобразователями постоянного тока для сварки деталей с большим сечением непрерывным оплавлением. В лабораторных условиях проводили опыты по сварке на постоянном токе пластин и тонкостенных труб поверхностей нагрева диаметром 30...50 мм [7, 8]. При сварке оплавлением сопротивление в контакте между деталями выше, чем при коротких замыканиях, характерных для нагрева сопротивлением, и можно ожидать, что относительные потери энергии в вентилях будут ниже. Определение их значения в данном случае затруднительно, так как сопротивление в контакте при оплавлении непрерывно изменяется от значений, близких к короткому замыканию, до полного разрыва цепи. Отмечается, что при постоянном токе образуются преимущественно мелкие контакты и процесс протекает более стабильно, чем на переменном токе, а поверхность оплавления более ровная, в результате возможно получать качественные соединения при меньших, чем на 20 % припусках на оплавление и осадку. В целом авторы работы пришли к выводу о том, что переход к постоянному току при сварке оплавлением указанных деталей даст такие же технологические преимущества, как уменьшение $Z_{к.з}$ машин путем реконструкции ее сварочного контура при 50 Гц, что обходится дешевле.

Синусоидальная форма напряжения, подводимого к свариваемым деталям, не является оптимальной, потому что эффективный нагрев элементарных электрических контактов осуществляется только на амплитудной части синусоиды, длительность которой в течение полупериода незначительна.

Известно, что за рубежом подобные недостатки стыковой сварки оплавлением устраняются с помощью инверторных источников питания, состоящих из выпрямителя и инвертора. Выпрямитель равномерно загружает все три фазы источника и преобразует трехфазное напряжение в однофазное, а инвертор преобразует однофазное постоянное напряжение в однофазное переменное, форма которого является прямоугольной. Причем наличие инвертора в новом источнике питания обусловлено тем, что для проведения процесса оплавления постоянным током трудно решить вопрос коммутирования энергии постоянного тока больших значений, а прямоугольная форма напряжения обусловлена, главным обра-

зом, трудностью получения на выходе инвертора напряжения синусоидальной формы. В работе [6] приведены данные о разработке и испытаниях опытного образца инверторного источника. Из приведенных данных следует, что наиболее высокие энергетические показатели при КСС могут быть получены на машинах с достаточно низким сопротивлением $Z_{к.з} \leq 100$ мкОм с использованием преобразователя числа фаз в первичной цепи трансформаторов. Преобразователи, рассчитанные на частоты 20...30 Гц, применяются также для КСС и обеспечивают равномерную загрузку сети. При этом могут быть использованы стандартные трансформаторы машин КСС. Рассматривая перспективы развития КСС, следует учитывать также возможности применения этого процесса для высококонцентрированного нагрева при сварке в твердой фазе сопротивлением. Наиболее эффективным использованием энергии при сварке сопротивлением отличаются машины, в которых используется накопленная энергия, чаще всего это конденсаторные машины для точечной сварки. При малых мощностях зарядки такие накопители генерируют в процессе сварки токи, превосходящие в десятки и сотни раз токи зарядки. Например, точечную сварку изделий из алюминиевых сплавов толщиной 1,5 + 1,5 мм можно проводить на машине переменного тока МТ-4019 и конденсаторной машине МТК-5502. Вылет электродов в обоих случаях одинаковый. Потребляемая мощность из сети у машины МТ-4019 составит 300 кВ·А, а у машины МТК-5502 — 20 кВ·А [3]. Продолжительность сварки на конденсаторных машинах исчисляется десятками миллисекунд.

При КСС сопротивлением деталей с относительно небольшой площадью поперечного сечения (до 1000 мм²) длительность нагрева составляет десятки секунд. Создание накопителей конденсаторного типа для таких нагрузок представляется экономически нецелесообразным, если ориентироваться на технические характеристики современных стандартных конденсаторов. Учитывая постоянные разработки в этой области, в ближайшем будущем появление таких преобразователей станет вполне возможным.

Ионисторы, которые называют еще суперконденсаторами (СК), — это электрические устройства, отдающие огромное количество энергии за очень маленький промежуток времени. Благодаря этой способности они получили широкое применение во многих областях электроники и электротехники. Последние изменения, внесенные в конструкцию, а также новые достижения в технологии производства делают их одними из самых перспективных электронных устройств [9]. СК превосходят конденсаторы других типов по плотности емкости ρ_C , заряда ρ_Q и энергии ρ_E . СК



могут обеспечить работу различных систем при повышенных импульсных токовых нагрузках, поэтому они заменяют в ряде случаев химические источники тока. СК отличаются уникальной комбинацией важных характеристик. По сравнению с литиевыми элементами к преимуществам СК относятся на порядок большая плотность мощности ρ_w , длительные сроки хранения (около 10 лет), отсутствие токсичных и представляющих опасность компонентов, огромное количество циклов перезарядки без изменения емкости (до 10 млн циклов). Емкость современных СК и батарей на их основе составляет 1...10000 Ф [10]. Характеристики СК позволяют использовать их в качестве накопителей энергии, например, источников бесперебойного питания, компонентов силовых импульсных устройств и в других приборах, где существует необходимость быстродействующего источника энергии [9]. Ускорению их применения может способствовать изыскание более совершенных процессов контактного нагрева сопротивлением. В ИЭС им. Е. О. Патона выполнены работы [10], в которых показана возможность сварки сопротивлением деталей с компактными и развитыми сечениями площадью сечения 2...3 тыс. мм² с использованием высококонцентрированного нагрева. Повышение концентрации нагрева достигается применением промежуточных вставок, имеющих композитную структуру. При этом длительность нагрева составляла 1,5...2,0 с, плотность тока — 15...2,0 А/мм². Для осуществления такого процесса, кроме конденсаторных, возможно применение также других накопителей энергии, в частности, кинетической в механических преобразователях. В этой связи представляют интерес многолетние разработки [7] по созданию униполярного генератора для энергоснабжения установок контактной стыковой сварки труб, идея создания которого неоднократно обсуждалась [8]. Суть ее заключается в том, что униполярный генератор, рассчитанный на низкое напряжение, встраивается во вторичную цепь сварочной машины (рис. 3) вместо трансформатора.

Специальные токоподводы передают токи, достигающие сотни тысяч ампер, с коллектора генератора непосредственно к электродам сварочной машины, что позволяет минимизировать потери во вторичном контуре. Электродвигатель D привода генератора G встроен в корпус статора генератора, что исключает промежуточные элементы в кинематической схеме привода, испытывающего значительные пиковые нагрузки. Большая масса и размеры вращающихся элементов привода при высоких скоростях вращения обеспечивают накопление в генераторе значительной кинетической энергии, расходуемой при сварке. При этом обеспечивается равномерная загрузка

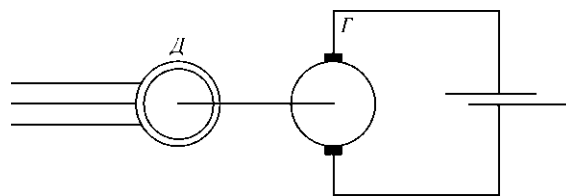


Рис. 3. Схема униполярного генератора

ка трех фаз сети, а мощность привода может быть снижена в десятки раз по сравнению с пиковой мощностью, потребляемой при сварке. Эффективное использование такого источника возможно при повторно-кратковременной работе сварочной машины, когда паузы между сварками достаточно велики для восстановления необходимого уровня накапливаемой энергии.

Многолетние разработки [11] по созданию униполярных генераторов различной мощности сопровождались поисками оптимальных технологий нагрева сопротивлением деталей с большими поперечными сечениями (до 12 тыс. мм²), в том числе труб. Они завершились изготовлением промышленной партии комплексов, включающих генераторы сварочных машин для сварки труб диаметром 80...320 мм с толщиной стенок 8...12 мм [11]. В сварочных машинах различной мощности используются накопители энергии от 10 до 60 МДж, что позволяет получать в сварочной цепи токи 1,5...9 МА. Длительность нагрева при сварке не превышает 3 с, мощность, потребляемая из сети электрического привода, составляет 230...420 кВт. Применение скоростного высококонцентрированного нагрева при плотностях тока 50...60 А/мм² позволило получить высококачественные соединения труб диаметром 80...320 мм с толщиной стенки от 8 до 12 мм из сталей класса Х65, а также аустенитного и мартенситного класса, относящихся к трудносвариваемым. Наряду с высокими показателями прочности соединения наблюдаются высокие показатели при испытании на ударную вязкость.

Дальнейшее совершенствование накопителей подобного типа создает условия для расширения областей применения технологий сварки сопротивлением, особенно для трудносвариваемых материалов.

Для установки контактной сварки оплавлением труб диаметром 114...320 мм отмечено, что применение источника питания с прямоугольной формой импульсов частотой 50 Гц сокращает время сварки на 25 % [6].

1. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992. — 235 с.
2. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для контактной сварки. — М.: Машиностроение, 1969. — 440 с.
3. Смирнов В. В. Оборудование для контактной сварки. — С.-Пб.: Энергоатомиздат, 2000. — 848 с.

4. Подола Н. В., Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка токами низкой частоты // Автомат. сварка. — 1957. — № 1. — С. 63–72.
5. Каталог фирмы «Schlatter». Prosp. Nr.2. — Schlatter AG, 1985.
6. Применение инверторных источников питания в стыковой сварке оплавлением при строительстве трубопроводов / В. И. Хоменко, О. Г. Панков, С. К. Сергеев и др. // Свароч. пр-во. — 1991. — № 9. — С. 16–17.
7. Бертинов А. И., Алиевский Б. Л., Троицкий С. Р. Униполярные электрические машины с жидкометаллическим токосъемом / Под ред. А. И. Бертинова. — М.; Л.: Энергия, 1966.
8. Haase P. W., Carries R. W., Hudson R. S. The University of Texas at Austin, Center for Electromechanics. Homopolar pulse welding for offshore deep water pipelines // Welding J. — 1995. — № 5. — Р. 35–39.
9. Шурыгина В. Суперконденсаторы // Электроника, наука, технология, бизнес. — 2003. — № 3.
10. Деспотули А. Л., Андреева А. В. Суперконденсаторы для электроники // Современ. электроника. — 2006. — № 5. — С. 10–14.
11. James C., Wright P. E. Homopolar pulsed welding for pipeline application // Докл. на междунар. симпозиуме «Exploiting Solid State Joining». — Cambridge, 1999.

A review of developments aimed at improvement of power characteristics in flash-butt welding, and analysis of the possible paths of investigations in this direction are given.

Поступила в редакцию 09.10.2009

(см. первую стр. обложки)

СВАРОЧНЫЕ АППАРАТЫ ФИРМЫ «ФРОНИУС» НАШЛИ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ПЕРЕПЛАВА

Основу производства Международной компании «Антарес» составляют две вакуумные электронно-лучевые печи ВТ01 с установленной мощностью по 2,5 МВт и производительностью 2,5 тыс. т титана в год каждая. В настоящее время заканчивается изготовление разработанной специалистами компании печи нового поколения ВТ02 с установленной мощностью 3,2 МВт и годовой производительностью по титану до 3,0 тыс. т в год. Конструкция печи позволит получать круглые слитки и слябы титана и его сплавов массой до 14 т, длиной до 5,5 м.

Фотография, представленная на 1-й странице обложки, иллюстрирует рабочий момент процесса сварки камеры плавки печи ВТ02 (сталь 09Г2С, облицовка из стали 10Х18Н10Т) с использованием сварочного оборудования фирмы «Фрониус» (Австрия). В настоящее время в МК «Антарес» применяется гамма сварочного оборудования фирмы «Фрониус» — Magic Wave 2200, Magic Wave 5000, Vario Star 457-2. Использование отмеченного оборудования позволило МК «Антарес» улучшить экономические показатели изготовления узлов установки ВТ02 при обеспечении высоких прочностных свойств и качества сварных соединений и, в частности, вакуумной плотности швов. Помимо этого, достигнуто существенное (до 10 %) повышение производительности сварочных работ, уменьшение расхода сварочной проволоки (на 5...5,5 %) и потерь на ее разбрызгивание, снижение затрат на зачистку швов и устранение дефектов.



За счет уменьшения тепловложения и высокой воспроизводимости режимов сварки удалось уменьшить остаточные напряжения и деформации и обеспечить заданную точность размеров и формы сварных узлов. Это позволило уменьшить объемы механической обработки вакуумных фланцевых соединений.

Достигнуто сокращение эксплуатационных затрат при сварке обычных и нержавеющей сталей и меди до 15 % за счет снижения расхода защитных газов — аргона и гелия.

Надежность и безотказность работы сварочного оборудования фирмы «Фрониус» позволяет в итоге повысить эксплуатационную надежность электронно-лучевых установок, производимых в МК «Антарес».



ПОРТАТИВНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

П. М. РУДЕНКО, В. С. ГАВРИШ, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены структурная схема и алгоритмы работы системы контроля качества сварных соединений, выполненных контактной точечной сваркой, построенной на основе карманного персонального компьютера. Кроме контроля качества в реальном времени, в системе реализованы функции экспертной системы для выбора технологии и анализа производства.

Ключевые слова: контактная точечная сварка, сварные соединения, контроль качества, управление процессом, диаметр ядра сварной точки, экспертная система, карманный персональный компьютер

Качество контактной точечной сварки зависит от многих факторов, в первую очередь от выбранной технологии, применяемого оборудования и автоматического контроля процесса в реальном времени.

Известно много стационарных и карманных приборов, систем на основе офисных и промышленных компьютеров и ноутбуков, предназначенных для контроля процесса контактной точечной и шовной сварки сопротивлением.

Эти приборы и системы позволяют исследовать процесс сварки новых и известных материалов и конструкций, автоматизировать выбор режима сварки, оптимизировать его, задавать и проверять допустимые пределы колебаний параметров режима, следить в реальном времени за качеством сварки. С их помощью можно накапливать, статистически обрабатывать и анализировать данные, сертифицировать производство, калибровать датчики, осуществлять техническое обслуживание сварочных машин и электродов.

В качестве примера систем контроля процесса контактной точечной сварки можно отметить широкую номенклатуру приборов Miyachi Uniteck [1], мониторы WeldComputer Corp., ATek Resistance Welding и Dengensha America (все США), карманный тестер TECNA (Италия) [2], измерительные системы ВНИИЭСО (Россия) [3].

В ИЭС им. Е. О. Патона также разработана серия приборов контроля и диагностики процесса (УДК-01, -02, -05) [4] и систем управления режимом сварки, которые имеют широкий набор функций по контролю параметров режима и качества сварного соединения (РВК-100, КСУ КС-02) [5, 6].

Описанные выше приборы по контролируемым параметрам отличаются несущественно.

Обычно это ток сварки или ток в первичной обмотке сварочного трансформатора, напряжение между электродами, давление или усилие сжатия электродов, перемещение электродов и время отработки операций в циклограмме. Однако по технической реализации они могут сильно отличаться. Так, серия Miyachi Uniteck включает стационарные MG3, ММ-370 (массой 5 кг) с графическим дисплеем, более компактный ММ-122А (1,9 кг) с возможностью подключения к внешнему персональному компьютеру (например, ноутбуку) и печатающему устройству, так называемый наладонный ММ-380 (0,9 кг) и, наконец, карманные приборы для измерения параметров тока ММ-315А и усилия сжатия ММ-601А. В то же время мониторы WeldComputer Corp. похожи на промышленные рабочие станции с полноценным графическим экраном с возможностью работать как локальное, удаленное или сетевое устройство, контролирующее несколько сварочных машин.

В ИЭС им. Е. О. Патона создана экспертная система для контактной точечной сварки [7], которая на основе баз данных и знаний выдает рекомендации по технологии сварки изделий с заданной толщиной деталей, состоянием их поверхности, особенностей конструкции и марки материала. Для повышения конкурентоспособности желательна разработка приборов контроля с функциями экспертной системы. Кроме работы справочной системы, существует также возможность выбора наиболее эффективного способа оценки качества для рассматриваемого изделия и автоматического переключения прибора в требуемый режим контроля.

Приборы УДК были построены на основе промышленных контроллеров. Реализация в них алгоритмов, аналогичных экспертным системам, из-за ограниченного объема памяти для хранения программы и данных невозможна. Дисплеи для вывода данных имеют ограниченные возможности по объему выдаваемой текстовой и графической информации. Вместе с тем полноценный вывод ин-

формации является очень важным и его отсутствие приводит к ограничению возможностей экспертных систем. В то же время приборы контроля и управления являются сложными компьютерными устройствами и выпуск их малыми партиями приводит к большой себестоимости.

В настоящее время широкое применение в быту (развлечения, организация рабочего дня, перевод текста, GPS, контроль здоровья и т. п.) находят мобильные компьютерные вычислительные средства с экранами от 3...4 дюймов для отображения текстовой и графической информации — карманные персональные компьютеры (КПК), смартфоны, коммуникаторы, нетбуки и ноутбуки. Их технические характеристики при обеспечении возможности съема информации о параметрах процесса сварки со сварочной машины с успехом могут заменить перечисленные выше приборы и, кроме того, получить дополнительные преимущества путем реализации требуемых функций экспертной системы.

Целью настоящей работы является создание портативной компьютерной системы, в которой одновременно реализованы функции экспертной системы и функции контроля процесса сварки, присущие специализированным приборам. При этом система должна максимально использовать широко распространенное серийное оборудование, которое имеет высокую надежность, низкую стоимость и может быть приспособлено к применению в условиях сварочного цеха.

Одной из основных задач при разработке такой системы является создание аппаратуры и программного обеспечения сопряжения мобильных компьютеров с датчиками параметров процесса.

В ИЭС им. Е. О. Патона для сопряжения контактной точечной машины с универсальными мобильными компьютерными устройствами разработана система контроля параметров процесса точечной сварки КСУ КС-03, назначением которой является измерение параметров процесса и передача этих данных в компьютер верхнего уровня. Блок разработан на основе однокристального контроллера С8051F020 компании «Silicon Laboratory», основным преимуществом которого является наличие необходимых ресурсов для построения измерительной системы: 12-разрядного восьмиканального АЦП с производительностью до 100 К измерений за 1 с и входным усилителем с программируемым коэффициентом усиления при высокой производительности по вычислениям и управлению. Структурная схема системы приведена на рис. 1.

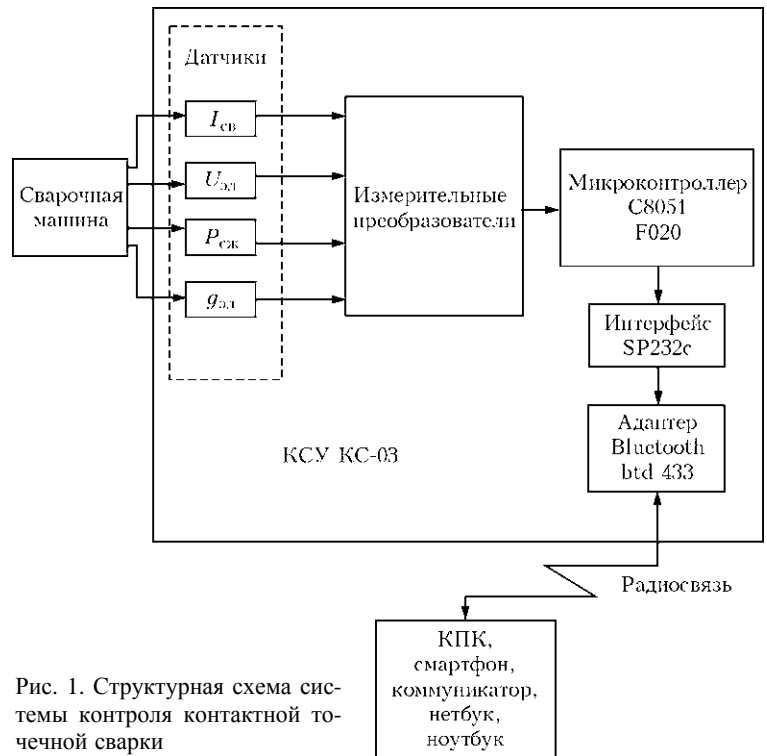


Рис. 1. Структурная схема системы контроля контактной точечной сварки

Технические характеристики блока измерения

Диапазон измерения тока сварки, кА	2,0...25,0; 4,0...50,0
Диапазон измерения напряжения между электродами, В	0...5,0
Диапазон измерения усилия сжатия электродов, кН	0...10 ; 0...20
Диапазон измерения ускорения перемещения электродов, g	±1,7
Приведенная погрешность измерения параметров, не более, %	3,0
Скорость передачи данных по радиоканалу, Кбит/с	19,2...115,2
Напряжение питания, В	220...380
Габаритные размеры, мм	260×220×160

Основным отличием блока от приборов контроля является наличие одного из двух каналов связи, которые имеются практически во всех портативных компьютерах, USB и Bluetooth. В первом случае скорость обмена составляет до 921,6 Кбит/с, во втором Bluetooth адаптер работает в режиме последовательного канала RS232 и максимальная скорость передачи составляет 115,2 Кбит/с. Хотя радиоканал имеет скорость ниже, его применение может быть предпочтительнее, так как не требуется проводная связь между устройствами, расстояние между приемником и передатчиком может быть до 100 м, исключается попадание высоких напряжений на вход компьютерной системы, простое подключение.

В качестве базового набора в состав блока входят следующие датчики: пояс Роговского разъемного типа производства Инженерного центра сварки давлением им. Е. О. Патона; датчик усилия сжатия MEGATRON KMB 31K 10 KN 0000D; датчик ускорения ANALOG DEVICE ADXL 103.

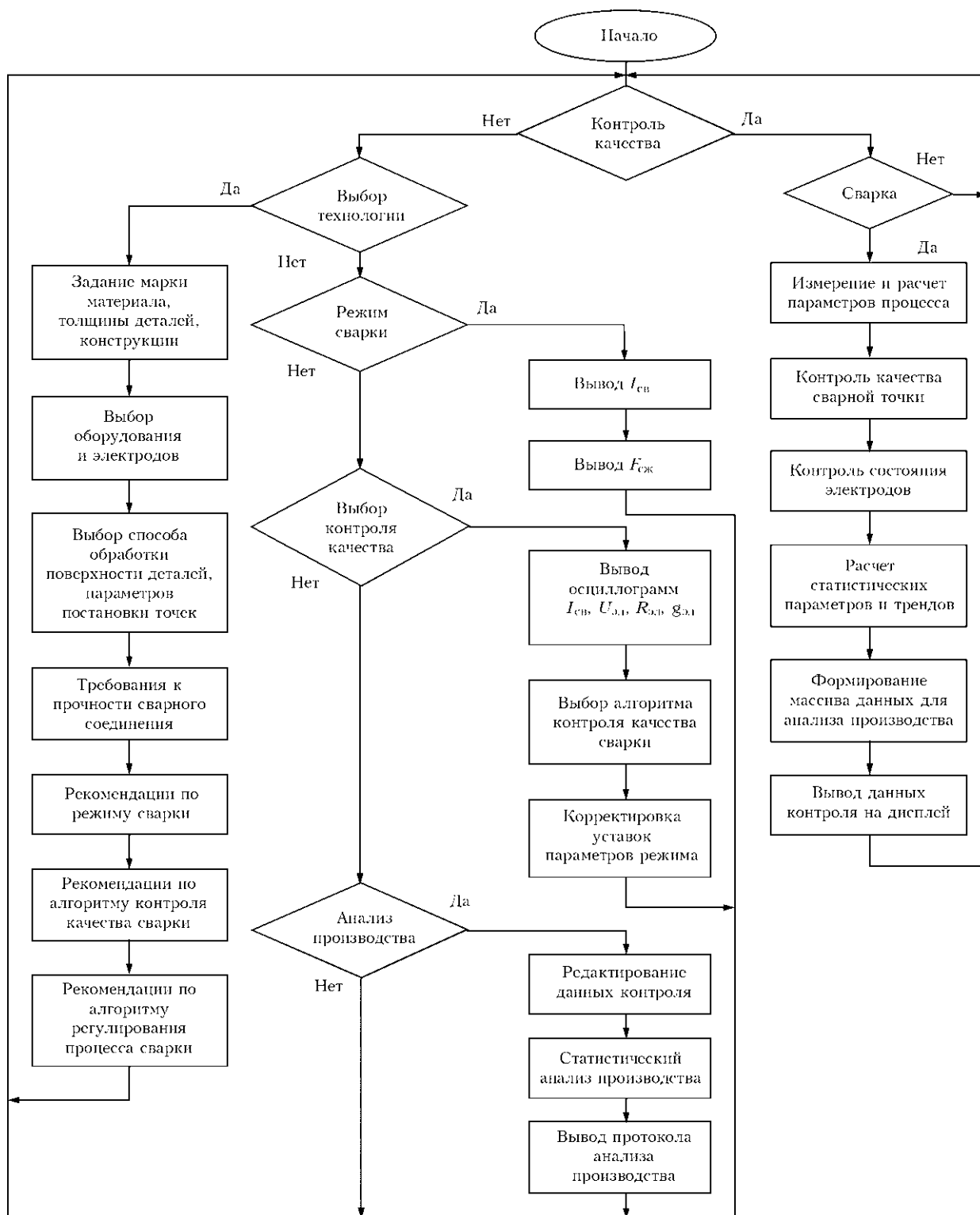


Рис. 2. Алгоритм работы системы контроля

Кроме того, для измерения напряжения между электродами имеется пара измерительных проводников со специальными зажимами.

Датчик тока — гибкий разъемный и имеет диаметр 150 мм, чувствительность 1 Вс/кА, погрешность измерения тока не зависит от положения датчика. Датчик усилия сжатия выполнен из высококачественной стали, рабочий температур-

ный диапазон $-10...+40$ °С, исполнение IP66. Датчик ускорения — одноосный, чувствительность 1 В/g, смещение нуля при 0 g равно 2,5 В.

В состав блока также входят измерительные преобразователи датчиков. В комплекте с датчиком усилия сжатия используется измерительный преобразователь MEGATRON IMA 3-DMS-2405. Измерительный преобразователь датчика напря-

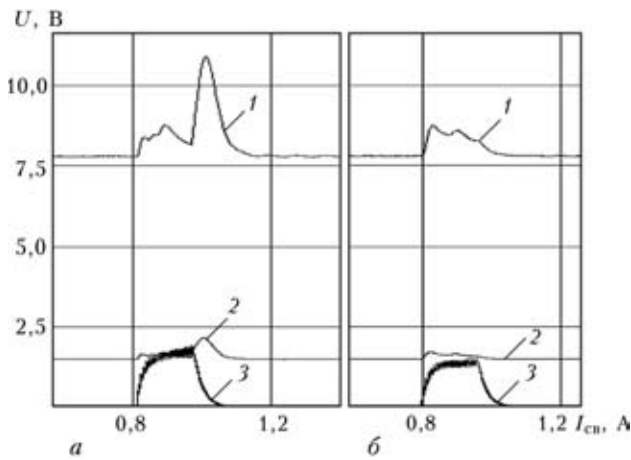


Рис. 3. Осциллограмма сигналов с выходов измерительных преобразователей акселерометра 1 и тока 3 при выплеске (а) и без него (б) (2 — сигнал на выходе акселерометра)

жения устраняет помеху, наводимую от сварочного тока, и позволяет измерять сигнал непосредственно на электродах с прокладкой измерительных цепей по сварочному контуру.

Алгоритм работы системы контроля приведен на рис. 2.

При контроле технологического процесса блок контроля с периодом 10 мс выдает интегральные значения тока, напряжения, усилия сжатия и ускорения электродов, по которым компьютер верхнего уровня рассчитывает входные величины алгоритма контроля качества и стабильности производства:

входные параметры допускового контроля: ток, напряжение, перемещение и сопротивление в последнем периоде сварки, относительное изменение сопротивления, интегральные оценки погрешности отработки кривых тока, напряжения, перемещения (сумма абсолютных значений отклонения текущих величин относительно эталонных кривых);

входные параметры регрессионной модели — энергия Q , выделенная в сварочном контакте;

входные параметры нейронной сети — средние значения тока и напряжения на четырех последовательных и по возможности равных интервалах, которые в сумме равны времени сварки.

При допусковом контроле качества используют алгоритмы, основанные на «нечеткой» логике [8].

Контроль диаметра ядра сварной точки по регрессионным уравнениям осуществлялся по выражению

$$d = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2,$$

где a_0, a_1, a_2 — коэффициенты уравнения.

При контроле качества сварки по нейронным сетям использовали зависимости, приведенные в работе [9].



Рис. 4. Данные по технологии сварки на дисплее КПК

Для контроля выплеска используют показания акселерометра (рис. 3), который устанавливается на электрододержателе. При этом учитывают время его возникновения: выплеск в начале сварки недопустим и может свидетельствовать о недостаточном усилии сжатия электродов, некачественной подготовке поверхности свариваемых деталей или износе рабочей поверхности электродов. В любом из этих случаев необходимо остановить сварку изделия и устранить причину нестабильного прохождения процесса. В то же время выплеск в конце сварки во многих случаях не является браковочным признаком.

По полученному значению диаметра ядра сварной точки далее вычисляют среднее значение, среднеквадратическое отклонение, а также скользящее среднее значение и скользящее среднеквадратическое отклонение, с помощью которых можно попытаться определить нежелательные тенденции в качестве сварки. Для наглядности, кроме данных о качестве сварки, на дисплей также выводят данные, графики и гистограммы по всему массиву и по скользящим средним значениям.

Имеется возможность сбросить данные по последней точке для исключения их из общей оценки, сбросить весь массив или сохранить его в памяти компьютера в виде отдельного файла для дальнейшего анализа.

Выбор технологии сварки, настройка параметров алгоритма контроля качества и статистичес-

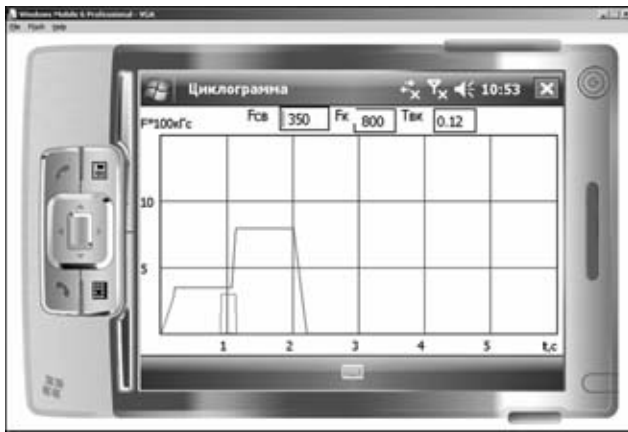


Рис. 5. Циклограмма усилия сжатия электродов на дисплее КПК

кий анализ производства осуществляют в диалоговом режиме.

Рекомендации по выбору режима сварки и выбору оборудования выдаются на дисплее КПК на основании заданной марки материала, толщины деталей, конструкции, способа обработки поверхности, а также требований, предъявляемых к качеству сварки (рис. 4).

Для измерения параметров циклограммы усилия сжатия необходимо отработать заданный режим с включенным током сварки при установленном между электродами датчике усилия сжатия. В этом случае длительность тока и время его в общей циклограмме определяются по датчику напряжения между электродами (рис. 5).

В процессе сварки изделия или образцов при подборе режима измеряют значение тока в последнем периоде I_k , средний ток за время сварки I_c и длительность тока $T_{св}$. Для перечисленных значений рассчитывают и выводят на дисплей средние значения, среднеквадратические и максимальные относительные отклонения. При этом массив для расчета этих значений в любой момент испытаний может быть сброшен в нулевые значения либо полностью, либо только по последней точке.

При статистическом анализе производства из памяти прибора может быть выбран любой файл

контроля процесса сварки. Обычно один файл соответствует работе сварочной машины в течение дня и его имя выбирается по дате создания (дню, месяцу и году). Из него формируется протокол в виде документа программы Microsoft WORD, в котором указывают количество сваренных точек, данные по качеству сварки, данные по погрешностям воспроизведения контролируемых параметров, рекомендации по зачистке и замене электродов. На дисплее можно вывести гистограммы контролируемых параметров и сравнить их с аналогичными гистограммами при подборе режима.

Таким образом, созданная система контроля и управления процессом контактной точечной сварки на основе современных устройств вычислительной техники значительно расширяет возможности контроля, повышает его достоверность и тем самым обеспечивает требуемое качество сварных соединений.

1. *Resistance welding. Weld checkers. Spirit of innovation.* Miyachi Uniteck. 991-041 03/07.
2. *ТЕСНА. Test and measurement instruments.* 1000-10/2007.
3. *Иоффе Ю. Е.* Аппаратура управления и контроля для контактной сварки // Контактная сварка и другие виды сварки давлением. Технологии и оборудование: Материалы Третьего междунар. науч.-практ. семинара 13–15 июня 2006 г. — С.-Пб., 2006.
4. *Подола Н. В., Гавриш В. С., Руденко П. М.* Компьютерная диагностика контактной сварки // Автомат. сварка. — 1994. — № 7/8. — С. 32–35.
5. *Компьютерная система типа РВК-100 управления машиной для контактной точечной сварки / Н. В. Подола, П. М. Руденко, В. И. Гейц и др.* // Там же. — 1991. — № 7. — С. 61–68.
6. *Гавриш В. С., Руденко П. М.* Система автоматического управления и контроля процесса контактной точечной сварки КСУ КС-02 // Там же. — 2007. — № 11. — С. 43–46.
7. *Подола Н. В., Гавриш В. С., Руденко П. М.* Система автоматического управления и контроля контактной точечной сварки // Там же. — 2007. — № 9. — С. 54–58.
8. *Контроль качества контактной сварки межэлементных соединений аккумуляторов на основе нечеткой логики / Н. В. Подола, П. М. Руденко, Н. П. Горун, В. М. Ягнятинский* // Там же. — 1999. — № 5. — С. 42–45.
9. *Подола Н. В., Руденко П. М., Гавриш В. С.* Применение адаптивного алгоритма для контроля качества сварки в системах управления контактными точечными машинами // Там же. — 1991. — № 7. — С. 61–68.

The paper presents the block-diagram and operating algorithm of the system of quality control of welded joints made by resistance spot welding based on a pocket PC. In addition to real-time quality control, the system also implements the functions of expert system for technology selection and production analysis.

Поступила в редакцию 16.10.2009

ТЕХНОЛОГИЯ ШИРОКОСЛОЙНОЙ НАПЛАВКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

А. П. ЖУДРА, С. Ю. КРИВЧИКОВ, кандидаты техн. наук, В. В. ПЕТРОВ, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния параметров режима широкослойной наплавки на характеристики наплавленного слоя, а также определены оптимальные диапазоны изменения параметров режима при наплавке поверхностей цилиндрических деталей диаметром 180...300 мм. Показано применение результатов исследования при разработке технологии восстановления крупногабаритных коленчатых валов дизель-генераторов.

Ключевые слова: широкослойная дуговая наплавка, крупногабаритные коленчатые валы, самозащитная порошковая проволока, оптимизация режимов наплавки, технология наплавки

Крупногабаритные коленчатые валы (коленчатые валы компрессоров магистрального транспортирования газа, дизель-генераторов, судовых и тепловозных двигателей и др.) являются металлоемкими изделиями, масса которых достигает 6 т при длине около 6 м. Средняя цена одного такого коленчатого вала составляет 70 тыс. дол. США. Конструктивно он представляет собой кривошип из среднеуглеродистой стали, состоящий из двух групп цилиндрических шеек — шатунной и коренной. Шатунная группа включает до восьми шеек, а коренная — до десяти, диаметр которых составляет 180...280 мм.

Основными параметрами нагрузок, определяющих рабочий ресурс коленчатого вала, являются высокое контактное давление в трущихся сопряжениях шейка-вкладыш и количество циклов знакопеременных нагрузений. Они приводят к изнашиванию рабочих поверхностей и уменьшению номинального диаметра коренных и шатунных шеек. Изменение геометрических размеров трущихся сопряжений в свою очередь ведет к возникновению аварийной ситуации: нарушению режима смазывания трущихся сопряжений, созданию условий для «сухого» трения, «схватыванию» и выплавлению сопряженных с шейками вкладышей. Таким образом, коленчатый вал, израсходовавший около 30 % своего конструктивного запаса прочности, выходит из строя по причине значительного износа, который в зависимости от условий и длительности эксплуатации может составлять 1,5...2,5 мм.

Для восстановления цилиндрических деталей большого диаметра со значительным износом (более 5 мм) широко применяется наплавка по винтовой линии под флюсом или открытой дугой.

При износе менее 3 мм более целесообразно применять широкослойную наплавку самозащитной порошковой проволокой, производительность которой в 1,8...2,0 раза выше, чем у наплавки по винтовой линии. Кроме того, широкослойная наплавка характеризуется благоприятным термическим циклом (наличием автоподогрева наплавленной детали)*, что очень важно для увеличения трещиностойкости при наплавке закаливаемых сталей.

На рис. 1 представлена схема широкослойной наплавки цилиндрической поверхности самозащитной порошковой проволокой. При наплавке вращение детали диаметром D происходит со скоростью наплавки v_n , а порошковая проволока (электрод) подается в зону плавления со скоростью подачи $v_{п.пр}$ и одновременно совершает возвратно-поступательные перемещения (колебания) на ширину B наплаваемой поверхности (амплитуда или размах колебаний) с заданными радиусом r и скоростью колебаний v_k . В процессе наплавки и постепенной кристаллизации сварочной ванны на поверхности наплаваемой детали формируется наплавленный слой. Длительность цикла наплавки t_n соответствует времени одного оборота наплаваемой детали. Очевидно, что параметры широкослойной наплавки оказывают влияние на толщину наплавленного слоя δ и качество его формирования. При этом большое количество переменных параметров режима широкослойной наплавки, а также возможность их варьирования в широких диапазонах значений часто затрудняют оптимизацию этого процесса.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование влияния отдельных параметров режима широкослойной наплавки на характеристики наплавленного слоя, а также определение оптимальных диапазонов их изменения

* Кривчиков С. Ю., Жудра А. П., Петров В. В. О термическом цикле при широкослойной наплавке цилиндрических деталей из чугуна // Автомат. сварка. — 1998. — № 4. — С. 49–50.

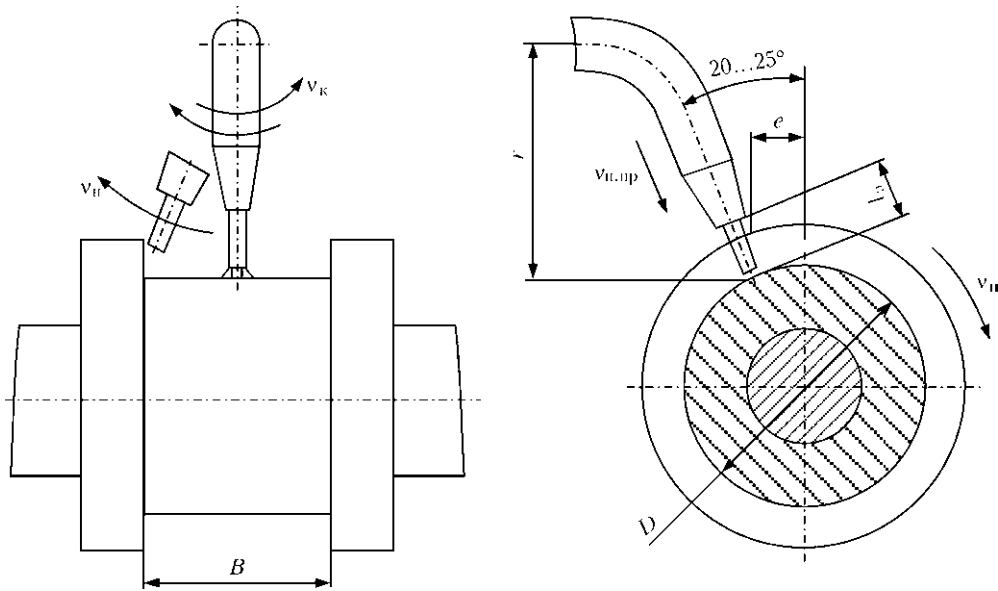


Рис. 1. Схема техники широкослойной наплавки колеблющимся электродом (самозащитной порошковой проволокой) цилиндрических деталей (см. обозначения в тексте)

при наплавке поверхностей цилиндрических деталей диаметром 180...300 мм.

Опытные наплавки выполняли на постоянном токе обратной полярности на образцы из стали Ст3, геометрические размеры которых соответствовали размерам коренных и шатунных шеек крупногабаритных коленчатых валов. В качестве электродного материала использовали самозащитную порошковую проволоку ПП-Нп-30Х4Г2СМ диаметром 2 мм, которая хорошо зарекомендовала себя при наплавке стальных коленчатых валов.

Средняя толщина δ наплавленного слоя и качество его формирования являются основными исходными характеристиками, на основании ко-

торых производится выбор таких параметров режима широкослойной наплавки, как I_H , U_d , v_n , $v_{n.pr}$, v_k , вылета электрода l_3 и смещения его с зенита e . Для задания значения δ (с учетом припуска на механическую обработку) можно воспользоваться формулой

$$\delta = (1,0 \dots 1,2)(И + 0,5П),$$

где $И$ — износ или толщина наплавленного слоя, мм; $П$ — припуск на диаметр для механической обработки, мм; $1,0 \dots 1,2$ — коэффициент, который учитывает степень шероховатости поверхности наплавленного слоя. Как отмечалось выше, для крупногабаритных коленчатых валов $И = 1,5 \dots 3,0$ мм. Широкослойная наплавка слоя металла такой толщины на цилиндрическую поверхность большого диаметра возможна в широком диапазоне токов. Однако для используемой порошковой проволоки технологически эффективный диапазон тока наплавки и напряжения составляет соответственно $I_H = 200 \dots 400$ А и $U_d = 26 \dots 28$ В при $l_3 = 20 \dots 25$ мм. Необходимо отметить, что для таких значений тока наплавки максимальная ширина наплавленного слоя с позиции обеспечения приемлемого качества его формирования и производительности процесса не должна превышать 70 мм. Установлено также, что при широкослойной наплавке среднелегированной порошковой проволокой диаметром 2 мм абсолютные значения I_H (А) и $v_{n.pr}$ (м/ч) практически равны между собой (рис. 2). Это позволяет использовать параметр $v_{n.pr}$ в качестве более общей характеристики процесса, исключив из числа параметров оптимизации режима ток наплавки.

Шероховатость поверхности наплавленного слоя, имеющая место при широкослойной наплавке, оценивали коэффициентом вариации дейс-

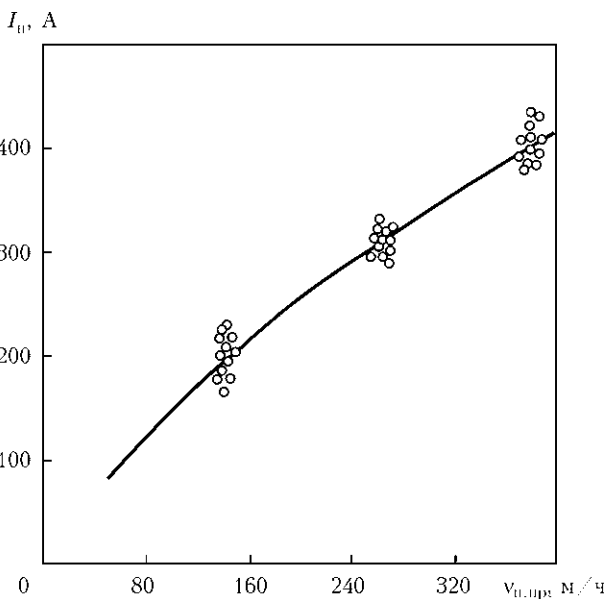


Рис.2. Зависимость тока I_H от скорости подачи порошковой проволоки $v_{n.pr}$ ПП-Нп-30Х4Г2СМ диаметром 2 мм при широкослойной наплавке ($U_d = 26 \dots 28$ В; $l_3 = 20 \dots 25$ мм; $v_k = 155 \dots 215$ м/ч)

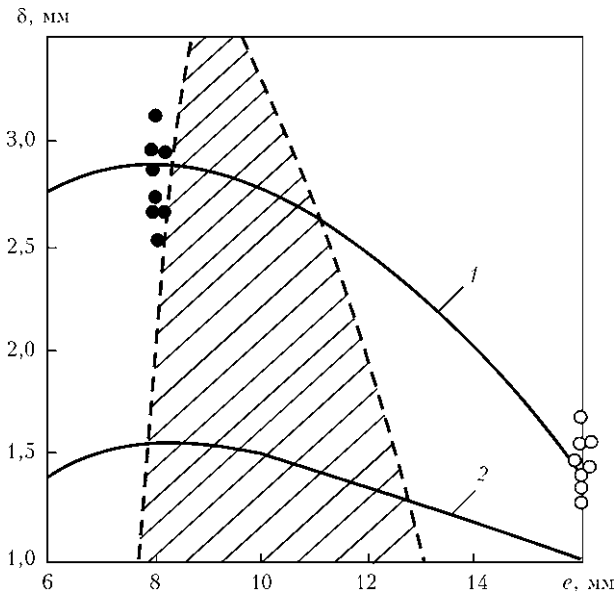


Рис. 3. Зависимость средней толщины наплавленного слоя δ от смещения электрода с зенита e при $v_n = 5,5$ м/ч, $CV_\delta = 30\%$ и $I_n = 400$ А (1); 200 А (2): ●, ○ — стекание жидкого металла соответственно вперед и назад

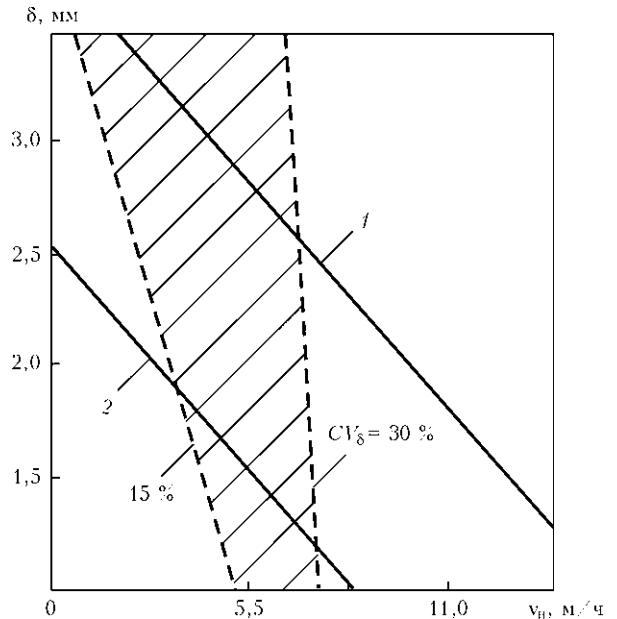


Рис. 4. Зависимость средней толщины δ наплавленного слоя от скорости наплавки v_n при $l_3 = 8$ мм: 1, 2 — см. на рис. 3

твительной толщины слоя CV_δ . Максимальное значение $CV_\delta = 30\%$ принимали с учетом величины припуска на последующую механическую обработку наплавленной поверхности. Установлено, что диапазону рассеивания действительной толщины слоя 15...30% соответствует скорость наплавки 3...8 м/ч. При этом смещение электрода с зенита, обеспечивающее хорошее формирование наплавленного слоя, также изменяется в довольно узком интервале значений. Так, при скорости наплавки 5,5 м/ч и токе 200...400 А оптимальное качество формирования наплавленного слоя имеет место при смещении электрода с зенита в пределах 8...12 мм (заштрихованная область на рис. 3). За пределами этого диапазона формирование наплавленного слоя нарушается и возникает опасность стекания части жидкой сварочной ванны с наплаваемой поверхности. Следует учитывать, что, чем больше v_n и I_n , тем больше должно быть значение e . Влияние значений v_n и I_n на среднюю толщину наплавленного слоя показано на рис. 4.

Скорость колебаний электрода v_k оказывает влияние на процесс формирования сварочной ванны, протяженность которой при широкослойной наплавке примерно равна его амплитуде (или размаху) колебаний. При малом значении v_k образуются отдельные поперечные валики наплавленного металла, а если ее значение слишком велико, то появляются участки несплавления основного и наплавленного металлов, ухудшаются стабильность горения дуги и равномерность плавления порошковой проволоки. И в первом, и во втором случае качество формирования наплавленного слоя бывает неудовлетворительным. В связи с

этим оптимальным, с точки зрения обеспечения хорошего качества формирования, является такое значение v_k , при котором в начале процесса наплавки образуется общая жидкая сварочная ванна, по длине равная размаху колебаний электрода. Экспериментально установлено, что при наплавке слоев шириной 40...70 мм и $I_n = 200...400$ А оптимальное значение v_k может изменяться в пределах 120...250 м/ч, при этом оно зависит от тока и ширины наплавленного слоя. Следует отметить, что скорость колебаний оказывает существенное влияние лишь на время образования общей сварочной ванны в начале процесса наплавки, после ее образования значение v_k можно изменять в широком диапазоне без ущерба качеству формирования наплавленного слоя.

Однако регулировка параметра v_k занимает много времени. Для исключения этой операции достаточно определить время, необходимое для образования общей сварочной ванны, и использовать его в качестве постоянного параметра режима наплавки. Установлено, что в исследованных диапазонах тока (200...400 А) и ширины наплавленного слоя (30...70 мм) это время составляет 2...3 с, что соответствует частоте колебаний электрода $n_k = 60$ мин⁻¹. Установленная частота колебаний обеспечивает хорошее качество формирования наплавленного слоя, поэтому ее можно использовать в качестве универсальной. При этом следует учитывать, что в течение времени задержки начала процесса наплавки (2...3 с) скорость наплавки должна быть равна нулю, после истечения этого времени v_n возрастает до заданного значения. Использование параметра n_k вместо v_k позволило также существенно упростить механизм колебания электрода.



Одним из требований, предъявляемых к технологии широкослойной наплавки шеек коленчатых валов, является обязательная наплавка галтелей — участков перехода цилиндрической поверхности шейки к перпендикулярно расположенной поверхности щек. Экспериментальным путем установлено, что если электрод в процессе наплавки совершает колебательные движения с постоянной скоростью, то в моменты его пребывания у галтелей (в крайних положениях) тепла дуги и электродного металла оказывается недостаточным для их надежного заплавления. В результате образуется дефект в виде участка несплавления наплавленного слоя с пригалтельным участком щеки шейки коленчатого вала. Для устранения этого недостатка в параметры режима широкослойной наплавки необходимо ввести еще одну характеристику, а именно, время остановки электрода в крайних положениях. В зависимости от τ изменяется и качество наплавленных пригалтельных участков: чем больше время задержки и меньше скорость наплавки, тем выше качество формирования наплавленного металла. При прочих равных условиях τ зависит также от условий теплоотвода: чем больше масса прилегающих к шейке щек, тем больше значение τ . Характер колебательного движения электрода задается профилированным кулачком, который кинематически связан с мундштуком для подачи порошковой проволоки. При этом профиль кулачка задается таким образом, что полный цикл колебательного движения электрода состоит из трех участков: 1-й и 2-й участки — остановка электрода у галтелей в течение времени τ ; 3-й — движение электрода с заданной постоянной скоростью. Для исследованных диапазонов режимов широкослойной наплавки максимальное значение τ не превышает 0,26 с.

Включение в число параметров оптимизации радиуса r колебаний электрода обусловлено тем, что поверхность галтельных участков удобнее наплавлять при криволинейной траектории движения конца электрода. В результате устраняется возможность возникновения коротких замыканий между мундштуком и щеками. Согласно расчетам, изменение вылета электрода при его колебаниях на ширину 30...70 мм составляет 0,6...4,8 мм. Однако, как показали эксперименты, такое изменение вылета при скорости подачи порошковой проволоки более 180 м/ч не оказывает заметного влияния на длину дуги, ее электрические параметры и качество формирования наплавленного слоя. Изменение радиуса колебаний существенно влияет на процесс наплавки галтельных участков и потери электродного металла. Из полученных данных следует, что с увеличением значений r в пределах 81...145 мм качество формирования метал-

ла, наплавленного на галтельные участки, ухудшается, а потери электродного металла возрастают с 8,1 до 15,8 %. Это связано с уменьшением угла наклона электрода к плоскости щеки наплавленной шейки, что в свою очередь приводит к случайным касаниям щеки и боковой поверхности оболочки порошковой проволоки, возникновению шунтирующих дугу коротких замыканий и разбрызгиванию электродного металла. Таким образом, при наплавке слоев шириной не более 70 мм оптимальное значение r должно составлять 80...90 мм.

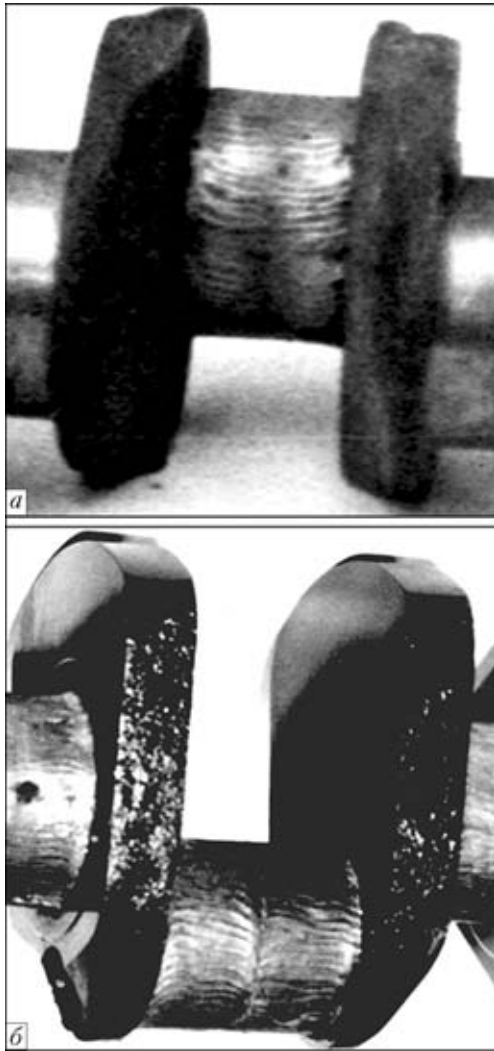
Проведенные исследования легли в основу разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона технологии наплавки крупногабаритных коленчатых валов дизель-генераторов. Технология включает три последовательно выполняемых этапа: подготовку коленчатого вала; широкослойную наплавку коренных и шатунных шеек; механическую обработку наплавленного коленчатого вала. Если после наплавки или в процессе механической обработки обнаруживаются дефекты наплавленного слоя (например, участки с крупными порами или раковинами и т. п.), то технологией наплавки дополнительно предусмотрен способ их устранения.

Подготовка коленчатого вала к наплавке включает дефектоскопию подлежащих наплавке поверхностей вала с целью обнаружения трещин. При наличии трещин, выходящих на поверхность шеек и имеющих протяженность более 20 мм, их подвергают механической разделке и заварке.

Оборудование для наплавки коленчатых валов включает вращатель и наплавочный аппарат (например, наплавочная головка А-580), оснащенный механизмом колебаний электрода. В качестве вращателя использован специализированный токарно-винторезный станок, предназначенный для механической обработки заготовок коленчатых валов дизель-генераторов. Широкослойную наплавку выполняют самозащитной порошковой проволокой диаметром 2 мм с использованием предварительного подогрева наплавленной шейки до температуры 220...240 °С. Оптимальные режимы наплавки приведены в таблице.

При широкослойной наплавке открытой дугой с использованием порошковой проволоки ПП-Нп-30Х4Г2СМ наплавленный металл имеет следующий химический состав, мас. %: 0,3 С; 4,0 Сг; 2 Мп; 0,8 Si; 0,8 Мо; 0,45 Ti.

На рис. 5, а представлен внешний вид наплавленной шейки коленчатого вала шириной 65 мм. Ширина шейки вала дизель-генератора составляет 135 мм, что существенно превышает допустимо возможную ширину наплавленного слоя при указанной марке порошковой проволоки. Поэтому процесс наплавки шейки состоит из двух этапов: сначала выполняют широкослойную наплавку одной части шейки с размахом колебаний



Оптимальные режимы широкослойной наплавки коренных и шатунных шеек коленчатого вала дизель-генератора

Параметр режима	Тип шейки коленчатого вала	
	коренной	шатунный
I_n, A	320...340	340...360
U_d, B	27...28	27...28
$v_n, м/ч$	4,5	5,0
Размах колебаний электрода, мм	50	65
$e, мм$	8...10	8...10
$n_k, мин^{-1}$	60	60
Количество смежных слоев, шт.	2	2
$t_n, мин$	6,0	4,0
$l_3, мм$	25...28	25...28

Рис. 5. Внешний вид шеек коленчатого вала после широкослойной наплавки самозащитной порошковой проволокой ПП-Нп-30Х4Г2СМ на оптимальном режиме одним слоем (а) и двумя смежными слоями (б)

на шейке формируются два смежных слоя, которые полностью покрывают ее изношенную рабочую поверхность (рис. 5, б).

Разработанная технология широкослойной наплавки прошла опытно-промышленную проверку в АООТ «Первомайскдизельмаш» (г. Первомайск, Украина). Наплавлена, обработана и успешно прошла стендовые испытания партия коленчатых валов, которые в настоящее время находятся в промышленной эксплуатации. Данные о влиянии широкослойной наплавки на усталостную прочность восстановленных крупногабаритных коленчатых валов отсутствуют. Однако многолетний опыт широкослойной наплавки различных типов коленчатых валов подтверждает, что она не оказывает существенного влияния на этот показатель.

электрода, равным половине ее ширины, а затем осуществляют наплавку другой половины шейки. В результате выполнения наплавки в два этапа

Внедрение технологии широкослойной наплавки крупногабаритных коленчатых валов дизель-генераторов показало, что затраты на наплавку составили 22 % стоимости нового коленчатого вала.

Results of experimental investigations of the effect of the wide-layer hard-facing parameters on characteristics of the deposited layer are presented. Optimal ranges of variations of the process parameters in hard-facing on cylindrical parts 180...300 mm in diameter were determined. Application of the investigation results for development of the technology for repair of large-size crankshafts of diesel generators is shown.

Поступила в редакцию 17.07.2009



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЮ ЛИСТОВЫХ ПОЛОТНИЩ ПО НЕПРИВОДНОМУ РОЛИКОВОМУ ПОЛЮ ЛИНИЙ СБОРКИ И СВАРКИ

В. А. РОЯНОВ, д-р техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь),
П. В. КОРОСТАШЕВСКИЙ, инж. (ОАО «ГСКТИ», г. Мариуполь)

Исследован характер силового взаимодействия лобовой кромки листовых полотнищ при перемещении по неприводным роликам роликового поля линий сборки и сварки. Определено дополнительное сопротивление перемещению полотнищ при установке роликов с критическим шагом и соотношение ее составляющих. Разработаны циклограммы нагрузки с учетом дополнительного сопротивления перемещению для использования при расчете мощности приводов транспортирующих устройств и рекомендации по снижению дополнительного сопротивления.

Ключевые слова: дуговая сварка, стальные листы, линии сборки и сварки, роликовое поле, сопротивление перемещению, циклограммы нагрузки

Одной из основных технологических операций при изготовлении котлов железнодорожных вагонов-цистерн и других емкостей является сборка и сварка листов в полотнища. При перемещении листовых полотнищ по роликам неприводного роликового поля в линиях их сборки и сварки приводы транспортирующих устройств преодолевают сопротивление, прямо пропорциональное весу полотнища и зависящее от параметров роликов. Это сопротивление рассчитывается по известным формулам аналогично расчету сопротивления перемещению, например, для механизмов передвижения транспортных тележек и грузоподъемных кранов [1]. Однако при заходе лобовой кромки полотнища на ролики в отличие от плавного перемещения колеса по рельсу происходит скачок сопротивления — появляется дополнительное сопротивление, обусловленное прогибом лобовой кромки ниже плоскости перемещения полотнища и ее упором в ролики. Максимальных значений дополнительные сопротивления достигают при установке роликов с шагом, равным или близким к критическому, когда полотнище упирается лобовой кромкой в бочку ролика на таком расстоянии ниже плоскости транспортировки, увеличение которого, т. е. дальнейший прогиб лобовой кромки, ведет к полной остановке полотнища или уходу его под ролик (прогиб лобовой кромки полотнища и ее вылет при критическом шаге роликов также являются критическими) [2]. Мощность приводов устройств, транспортирующих полотнища, пропорциональна сопротивлению перемещения полотнищ по роликовому полю (в су-

ществующих конструкциях линий сборки и сварки крупногабаритных полотнищ из листов толщиной до 16 мм она составляет порядка 10...15 кВт). Увеличение общего сопротивления перемещению полотнищ при появлении дополнительного сопротивления требует пропорционального увеличения усилий для осуществления этого перемещения, что автоматически ведет к перегрузке двигателей и прочих элементов приводов. Для предотвращения указанной ситуации приходится повышать мощность приводов транспортирующих устройств адекватно возросшему сопротивлению, что вызывает увеличение их габаритных размеров, расхода электроэнергии и удорожание продукции. Такая дополнительная нагрузка требует учета при выборе оптимального шага роликов и расчете мощности приводов транспортирующих устройств, поэтому определение дополнительных сопротивлений перемещению листовых полотнищ по неприводному роликовому полю является важной научной и практической задачей.

В публикациях, посвященных проблемам транспортировки изделий по роликовым полям и конвейерам [2–6], уделено внимание условиям нормальной транспортировки листовых полотнищ и длинномерных грузов и определению сопротивления их перемещения. Условия нормального захода лобовой кромки листового полотнища на ролики подробно рассмотрены в работах [2, 3]. В работах [4, 6] проанализированы способы определения дополнительного сопротивления перемещению длинномерных грузов по роликовым конвейерам с приводными роликами и установленными между ними настилами. Однако указанные материалы не дают возможности расчетного определения дополнительного сопротивления перемещению листовых полотнищ по линиям их сборки и сварки, возникающего при заходе лобовой

кромки полотна на неприводные ролики роликового поля, установленные без каких-либо промежуточных настилов (рис. 1).

Целью настоящей работы является определение дополнительных сопротивлений перемещению листовых полотен по линиям их сборки и сварки, возникающих при заходе на ролики лобовой кромки полотна при перемещении по роликовому полю с неприводными, установленными без промежуточных настилов, роликами.

Для определения дополнительных сопротивлений рассмотрим схему действия сил при контакте лобовой кромки полотна с роликом при ее критическом прогибе на роликовом поле с критическим шагом роликов (рис. 2).

В месте контакта лобовой кромки усилие перемещения полотна Q , равное сопротивлению его перемещения, раскладывается на две составляющие: радиальную силу Q_R , направленную от точки контакта к оси вращения ролика, и окружную силу Q_o . В свою очередь реакция от радиальной силы $Q_R = Q_{R'}$ раскладывается на горизонтальную Q_T и вертикальную Q_B составляющие. Дополнительное сопротивление перемещению полотна W_c складывается из двух составляющих: сопротивления от вращения роликов при заходе на них лобовой кромки W_p и сопротивления горизонтальному перемещению полотна при контакте лобовой кромки с роликами W_T .

$$W_c = W_p + W_T. \quad (1)$$

Влияние веса свисающей лобовой кромки в данном случае не рассматривается, так как вес полотна полностью учитывается при определении основного сопротивления перемещению полотна по роликовому полю.

Сопротивление от вращения роликов W_p при заходе на них лобовой кромки создается во время вращения роликов при давлении на них радиальной составляющей таким же образом, как и в роликах при нормальном перемещении по ним полотен. Рассчитать его можно по известным формулам [1], например, по формуле, преобразованной из формулы расчета сопротивления передвижению тележки мостового крана при установленном режиме работы:

$$W_p = Q_R(f_{тр}d + 2\mu)/D_p, \quad (2)$$

где $f_{тр}$ — коэффициент трения в цапфах роликов; d — диаметр цапф роликов; μ — коэффициент трения качения; D_p — диаметр роликов по кругу катания; $Q_R = Q \cos \alpha$, а из прямоугольного треугольника AOC — при критическом вылете полотна и шаге роликов (рис. 1)

$$\alpha = \arcsin(r/R_p). \quad (3)$$

После преобразований получим

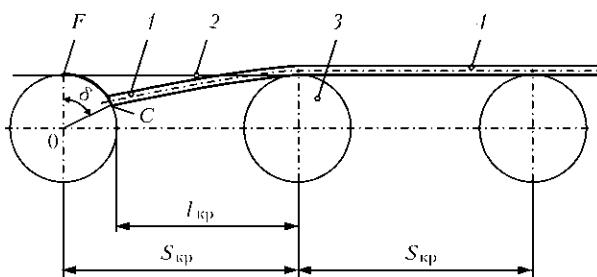


Рис. 1. Схема перемещения лобовой кромки полотна по ролику: 1 — лобовая кромка полотна; 2 — уровень транспортировки полотна; 3 — ролик; 4 — полотно; C, F — начальная и конечная точки контакта лобовой кромки с роликом; $l_{кр}$ — критический вылет полотна; $S_{кр}$ — критический шаг установки роликов

$$W_p = Q \cos[\arcsin(r/R_p)](f_{тр}d + 2\mu)/D_p = QK_p, \quad (4)$$

$$K_p = \cos[\arcsin(r/R_p)](f_{тр}d + 2\mu)/D_p, \quad (5)$$

где K_p — коэффициент дополнительного сопротивления перемещению от вращения роликов при заходе лобовой кромки полотна на ролики роликового поля; r_p — радиус оси ролика (внутренний радиус подшипника), равный $d_p/2$; R_p — радиус роликов по кругу катания, равный $D_p/2$.

Из формул (4) и (5) видно, что дополнительное сопротивление перемещению от вращения роликов при контакте с лобовой кромкой не зависит от параметров транспортируемых полотен, а зависит только от параметров роликов и их подшипников.

Дополнительное сопротивление горизонтальному перемещению полотна при контакте его лобовой кромки с роликами является горизонталь-

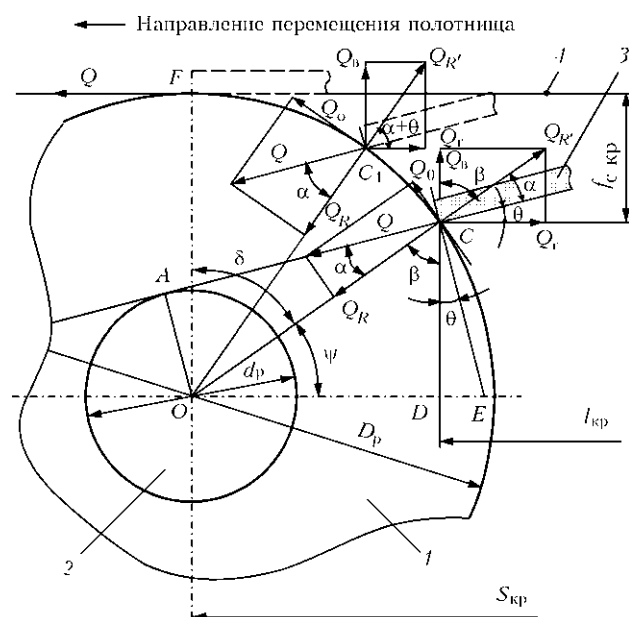


Рис. 2. Схема действия сил при контакте лобовой кромки полотна с роликом при ее критическом прогибе на роликовом поле с критическим шагом роликов: 1 — ролик; 2 — цапфа; 3 — лобовая кромка полотна; 4 — уровень транспортировки полотна



Таблица 1. Значения коэффициентов дополнительного сопротивления перемещению от вращения роликов K_p различных параметров

Параметры $\cdot 10^3$, м			Диаметр цапф роликов $d \cdot 10^3$, м	Значения $K_p \cdot 100$ %	
роликов d_p/D_p	подшипников			граничные	средние
	d_p	D_p			
25/100	25	37, 42, 47, 52, 62, 80	31,0...52,5	1,225...1,538	1,38
30/120	30	47, 55, 62, 72, 90	38,5...60,0	1,113...1,372	1,24
35/160	35	47, 55, 62, 72, 80, 100	41,0...67,5	0,863...1,106	0,99
40/200	40	62, 68, 80, 90, 110	51,0...75,0	0,767...0,944	0,86
45/250	45	68, 75, 85, 100, 120	56,5...82,5	0,648...0,802	0,73
50/280	50	80, 90, 110, 130	56,0...90,0	0,624...0,756	0,69
50/300				0,584...0,707	0,65
55/320	55	80, 90, 100, 120, 140	67,5...97,5	0,558...0,696	0,63
60/360	60	78, 85, 95, 110, 130, 150	69,0...105,0	0,503...0,651	0,58

ной составляющей реакции радиальной силы $Q_R = Q_{R'}$:

$$W_r = Q_R \sin \beta = Q \cos \alpha \cos(\alpha + \theta) = Q K_r, \quad (6)$$

$$K_r = \cos \alpha \cos(\alpha + \theta), \quad (7)$$

где K_r — коэффициент дополнительного горизонтального сопротивления перемещению при контакте лобовой кромки полотнища с роликами; θ — угол поворота торцевой плоскости лобовой кромки при ее критическом прогибе, равный $K_\theta l_{кр}^3$ [2].

Раскрывая формулу дополнительного сопротивления (1) с помощью формул (4) и (6), получаем

$$W_c = Q(K_p + K_r) = Q K_c, \quad (8)$$

$$K_c = K_p + K_r, \quad (9)$$

где K_c — коэффициент дополнительного сопротивления перемещению при заходе лобовой кромки полотнища на ролики.

При определении K_p для разных роликов уточним значение расчетных диаметров цапф роликов d . Расчетный диаметр цапфы равен среднему диаметру подшипника ролика:

$$d = (d_p + D_n)/2, \quad (10)$$

где d_p ($d_p = 2r_p$), D_n — соответственно внутренний и наружный диаметры подшипника ролика.

Поскольку конструктивно в роликах могут применять подшипники качения, имеющие одинаковый внутренний, но разные наружные диаметры, то диаметр цапфы для одних и тех же роликов и соответственно сопротивление перемещению полотнища по таким роликам при их одинаковых наружных диаметрах будет разным.

Результаты расчета коэффициентов дополнительного сопротивления перемещению полотнищ

от вращения роликов для роликов наиболее оптимальных наружных диаметров 100, 120, 160, 200, 250, 280, 300, 320 и 360 мм, установленных на различных подшипниках и имеющих различные диаметры цапф, представлены в табл. 1 и на рис. 3. При этом использованы параметры наиболее применяемых шариковых радиальных однорядных подшипников качения [7], а также значения $f_{тр} = 0,015$ и $\mu = 0,04$ см [1].

Результаты расчета коэффициентов дополнительного горизонтального сопротивления перемещению при упоре лобовой кромки полотнища в ролики K_r и коэффициентов полного дополнительного сопротивления при транспортировке листовых полотнищ K_c для листовых полотнищ из стали 12Х18Н10Т толщиной 4, 6, 8, 10, 12 и 16 мм по роликам диаметром D_p 100, 120, 160, 200, 250, 280, 320 и 360 мм приведены в табл. 2. Значения критических вылетов полотнища $l_{кр}$ и углов поворота торцевой плоскости лобовой

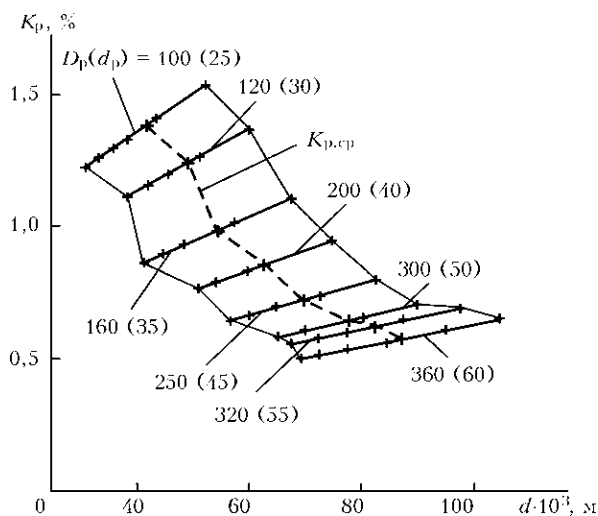


Рис. 3. Коэффициенты дополнительного сопротивления перемещению полотнищ от вращения роликов K_p по роликам различных диаметров с различными диаметрами цапф

Таблица 2. Значения коэффициентов дополнительного сопротивления K_c для листовых полотнищ из стали 12X18H10T разной толщины при транспортировке по роликам различных диаметров

$h \times 10^3$, м	$d_p/D_p \times 10^3$, м	Коэффициенты сопротивления, %		
		$K_{p,cp}$	K_r	K_c
4,0	25/100,	1,38; 1,24; 0,99; 0,86; 0,73; 0,69; 0,63; 0,58	92,49...94,40	93,87...94,98
6,0	30/120,		92,72...94,79	94,10...95,37
8,0	35/160,		92,86...95,31	94,24...95,89
10,0	40/200,		92,96...95,53	94,34...96,11
12,0	45/250,		93,03...95,70	94,41...96,28
16,0	50/280, 60/360		93,13...95,92	94,51...96,50

кромки при ее критическом прогибе (углов поворота сечения при критических вылетах) θ получены по соответствующим графикам и формулам [2].

Из анализа полученных результатов видно, что коэффициент дополнительного сопротивления перемещению при заходе лобовой кромки полотнища на ролики при критических вылетах полотнища для листов разных толщин составляет 93,87...96,50 % (почти 100 %), т. е. единицу. При этом коэффициент сопротивления перемещению от вращения роликов составляет до 2 %, уменьшается с увеличением диаметра цапфы и диаметра ролика и возрастает с увеличением диаметра цапфы при неизменном диаметре ролика. Основную часть дополнительного сопротивления создает сопротивление горизонтальному перемещению полотнища при контакте его лобовой кромки с роликами, незначительно возрастающее с увеличением толщины листов и диаметров роликов. С уменьшением шага роликов (и соответственно вылета лобовой кромки полотнищ) значение дополнительного сопротивления снижается.

Продолжительность действия дополнительного сопротивления при постоянной скорости перемещения полотнищ прямо пропорциональна пути S_p лобовой кромки по ролику — длине дуги CF (см. рис. 1, 2). Величина перемещения лобовой кромки от одного ролика к другому (в плане — на шаг роликов) при установке роликов с критическим шагом составит

$$S_n = S_p + l_{кр}$$

При этом путь лобовой кромки по ролику (по дуге бочки ролика CF)

$$S_p = \pi D_p \delta / 360, \quad (11)$$

где δ — центральный угол дуги ролика диаметром D_p (см. рис. 1, 2) равный

$$\delta = 90^\circ - \psi = 90^\circ - (90^\circ - \beta) = 90^\circ - (\alpha + \theta). \quad (12)$$

Таблица 3. Величина пути лобовой кромки листовых полотнищ из стали 12X18H10T толщиной 8 мм при транспортировке по образующей роликов различных диаметров

$d_p/D_p \times 10^3$, м	$l_{кр} \times 10^3$, м	K_c , %	$S_p \times 10^3$, м	$\frac{S_p}{S_p + l_{кр}}$
25/100	1400	94,24	64,2	4,39
30/120	1460	94,10	76,8	5,00
35/160	1585	95,03	10,40	6,16
40/200	1680	95,53	13,10	7,23
45/250	1785	96,00	16,49	8,46
50/280	1830	95,87	18,41	9,14
55/320	1895	95,89	21,01	9,98
60/360	1945	95,89	23,60	10,82

Выполнив соответствующие преобразования и расчеты, получим значения пути, а также значение пути по отношению к полному перемещению (в процентном выражении) лобовой кромки листовых полотнищ по роликам. Для листовых полотнищ из стали 12X18H10T толщиной 8 мм при транспортировке по роликам различных диаметров результаты расчетов приведены в табл. 3, а циклограммы коэффициентов основного и дополнительных сопротивлений перемещению лобовой кромки — на рис. 4.

По циклограммам прослеживается значение, периодичность и продолжительность действия дополнительного сопротивления перемещению полотнища при прохождении его по роликовому полю с критическим шагом роликов. При этом видно, что с увеличением диаметра роликов и критического вылета лобовой кромки полотнища возрастает величина пути лобовой кромки по ролику и соответственно продолжительность действия дополнительного сопротивления. При уменьшении шага роликов от критического автоматически уменьшаются от критических вылет и прогиб лобовой кромки полотнища, при этом уменьшаются дополнительное сопротивление перемещению полотнища и соответственно продолжительность его действия (рис. 5). Приведенные циклограммы фактически являются графиками нагрузки приводов транспортирующих устройств — основой для расчета мощности двигателей. При известной скорости перемещения полотнища легко определяются время прохождения конкретных отрезков пути и влияние дополнительного сопротивления на мощность приводов транспортирующих устройств.

Проанализировав формулы коэффициентов сопротивления (5), (7) и (9) и их расчетные значения в табл. 2, видим, что дополнительное сопротивление от вращения роликов (коэффициент $K_{p,cp}$) составляет около 2 % общего дополнительного сопротивления. Незначительное значение

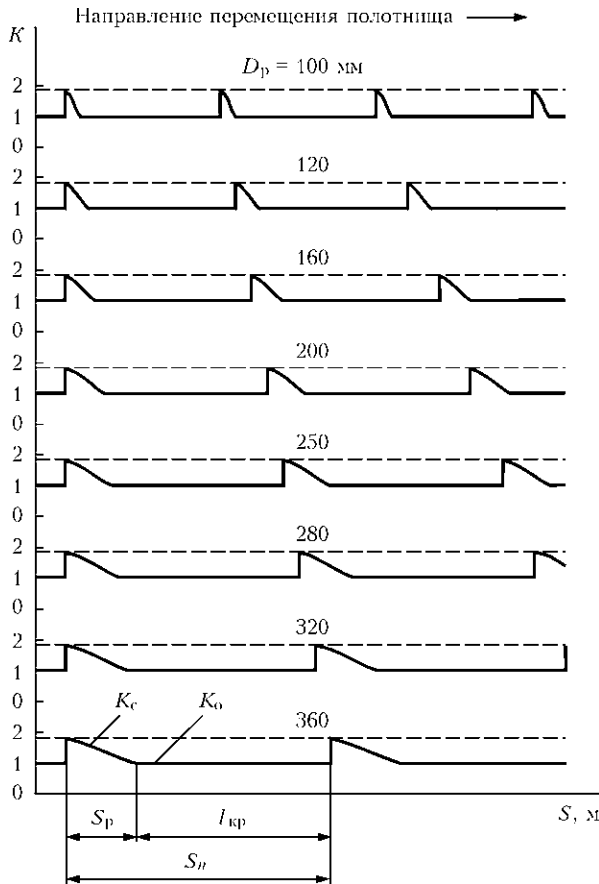


Рис. 4. Циклограммы коэффициентов сопротивления перемещению листового полотна толщиной 8 мм из стали 12Х18Н10Т по установленным с критическим шагом роликам различных диаметров: K_0 — коэффициент основного сопротивления равный 1,0; K — общий коэффициент сопротивления

составляет и угол θ в формуле коэффициента горизонтального сопротивления K_r . Кроме того, при уменьшении прогиба лобовой кромки от критического увеличиваются углы α и ψ , а угол θ уменьшается, при этом значение угла α приближается к значению угла ψ . Преобразовав с учетом

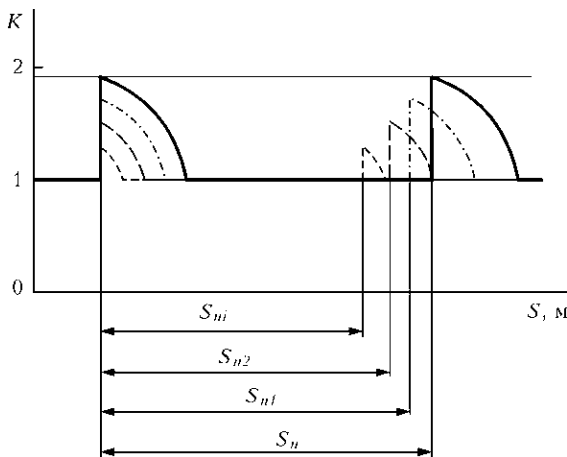


Рис. 5. Характер изменения коэффициента дополнительного сопротивления при уменьшении шага роликов: $S_n - S_{ni}$ — путь лобовой кромки при перемещении полотна на различных (уменьшающийся) шаг роликов

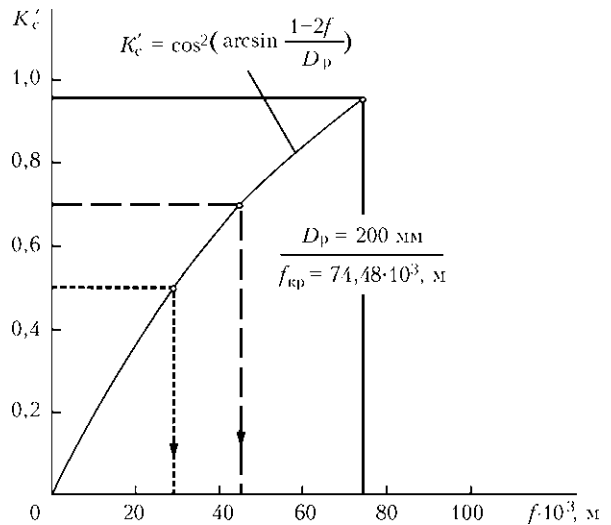


Рис. 6. Зависимости коэффициента дополнительного сопротивления от прогиба лобовой кромки листового полотна толщиной 8 мм из стали 12Х18Н10Т

этого формулы (7) и (9), получим упрощенную формулу коэффициента дополнительного сопротивления K_c' для расчета его значения при прогибах лобовой кромки полотна менее критических:

$$K_c' = \cos^2 \psi. \quad (13)$$

С учетом того, что при минимальных диаметрах роликов 100 мм и их цапф 25 мм максимальный угол α (см. рис. 2) равен $14,48^\circ$, а максимальный угол $(\alpha + \theta)$ — $17,21^\circ$, использовать формулу (13) можно в диапазоне значений $\psi = 20 \dots 90^\circ$. Выразив значение ψ через прогиб лобовой кромки (см. рис. 2), получим формулу коэффициента дополнительного сопротивления полотна при прогибах менее критических:

$$K_c' = \cos^2 \psi = \cos^2 [\arcsin(1 - 2f/D_p)], \quad (14)$$

где f — прогиб лобовой кромки полотна менее критического.

График этой зависимости для листов из стали 12Х18Н10Т толщиной 8 мм и роликов диаметром 200 мм, имеющих критический прогиб 74,48 мм, приведен на рис. 6. Приняв допустимый для конкретного случая коэффициент дополнительного сопротивления, по указанному графику определяем прогиб лобовой кромки при этом коэффициенте, а по значению прогиба — требуемый для этого шаг роликов по известным зависимостям.

Направлением дальнейших исследований является разработка критериев выбора оптимального шага роликов неприводных роликовых полей с учетом влияния дополнительного сопротивления перемещению полотен на мощность приводов транспортирующих устройств.

Выводы

1. При заходе на ролики неприводного роликового поля лобовой кромки полотнища последнее на каждом ролике испытывает дополнительное сопротивление перемещению, практически равное основному при критическом шаге роликов.

2. Подтверждено, что основную часть дополнительного сопротивления перемещению полотнища по роликовому полю (при его максимальном значении) составляет сопротивление горизонтальному перемещению при контакте лобовой кромки с роликом, и незначительную часть — до 2 % — сопротивление перемещению от вращения роликов.

3. Установлено, что значение дополнительного сопротивления понижается с уменьшением шага роликов, а при перемещении лобовой кромки полотнища по ролику уменьшается от своего максимального значения до нулевого.

4. Шаг роликов роликового поля необходимо выбирать с учетом допускаемой величины допол-

нительного сопротивления перемещению полотнищ, а при расчете мощности приводов транспортирующих устройств в графиках нагрузки необходимо учитывать величину и продолжительность действия дополнительного сопротивления.

1. *Расчеты* грузоподъемных и транспортирующих машин / Ф. К. Иванченко, В. С. Бондарев, Н. П. Колесник, В. Я. Барабанов. — Киев: Вища шк., 1978. — 575 с.
2. *Роянов В. А., Коросташевский П. В.* Выбор параметров роликового поля линий сборки и сварки тонколистовых полотнищ // Автомат. сварка. — 2007. — № 7. — С. 19–24.
3. *Роянов В. А., Коросташевский П. В.* Определение оптимального соотношения шага роликов и расстояния между рядами роликов транспортных систем линий сборки и сварки тонколистовых полотнищ // Вісн. Приазов. держ. техн. ун-ту. — 2008. — Вип. № 18, Ч. 1. — С. 184–187.
4. *Ивановский К. Е., Раковщик А. Н., Цоглин А. Н.* Роликовые и дисковые конвейеры и устройства. — М.: Машиностроение, 1973. — 216 с.
5. *Плавинский В. И.* Машины непрерывного транспорта. — М.: Машиностроение, 1969. — 720 с.
6. *Зенков Р. Л., Ивашков И. И., Колобов Л. Н.* Машины непрерывного транспорта. — 2-е изд. — М.: Машиностроение, 1987. — 432 с.
7. *ГОСТ 8338–75.* Подшипники шариковые радиальные однорядные. — М.: Изд-во стандартов, 1985.

The character of force interaction of the frontal edge of sheet panels in displacement along the undriven roller field of assembly and welding lines was investigated. The value of additional resistance to displacement of the panels, as well as relationship between its components, was revealed for a case of arrangement of the rollers at a critical pitch. Cyclograms of loads were plotted, allowing for the additional resistance to displacement, to be used in calculation of power of the transportation device drives. Recommendations for decrease of the additional resistance were worked out.

Поступила в редакцию 07.09.2009

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ 30-я международная конференция с блиц-выставкой

7–11 июня 2010

г. Ялта

В рамках конференции состоится семинар на тему «Трубопроводы из полимерных композиционных материалов: изготовление, проектирование, строительство, эксплуатация».

Конференция проводится при содействии Министерства промышленной политики Украины, Национального космического агентства Украины, Российского космического агентства, Отделения Международного общества авиакосмических материалов и технологий SAMPE «Россия-СНГ», АНТК «Антонов», ГКБ «Южное», ЗМКБ «Прогресс», ФГУП «ОНПП «Технология», ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина, НПП «Полет», ОАО «Композит», ГК НПП им. М. В. Хруничева, ГНУ «ИММС» НАН Беларуси, ОАО «УкрНИИТМ», ОАО «УкрНИИИАТ», ИХВС НАН Украины и других организаций.

**Контакты: тел./факс: +38(044) 573-30-40,
моб.: +38-067-708-93-95
E-mail: office@conference.kiev.ua, www.conference.kiev.ua**



АРКТИЧЕСКАЯ ПРЕМЬЕРА СМТ ПРОЦЕССА*

Новый дуговой сварочный процесс с переносом металла с короткими замыканиями впервые используется при строительстве трубопровода

Длинная и тяжелая канадская зима идеальна для строительства трубопроводов. Фирма «RMS Welding Systems» г. Ниску, Альберта (Канада) специализируется на сварке трубопроводов в условиях вечной мерзлоты. Они используют на монтаже технологию «Fronius», включая, впервые в этой отрасли, дуговой процесс СМТ с переносом металла с короткими замыканиями.

На севере Канады время кажется застывшим. На бесконечных равнинах огромные участки смешанных лесов тянутся вдоль шоссе со знаками, предупреждающими водителей о присутствии лосей и оленей. Зимой температура здесь опускается ниже -40°C (-40°F), и в пейзаже преобладают замерзшие реки и озера. В этом удаленном месте фирма «TransCanada Pipelines» строит инфраструктуру, укладывая трубопровод в землю для подачи газа в Канаду и США. Один из таких контрактных участков — это проект «Buffalo Creek West» длиной 54 км (34 мили). За своевременность и бесперебойность строительства этого

участка трубопровода отвечает фирма «O. J. Pipelines Ltd.». Работа по прокладке стальных труб, каждая массой в несколько тонн, может выполняться только в замерзшей земле. Подрядчиком является филиал «O. J. Pipelines» — фирма «RMS Welding Systems», которая специализируется на процессах сварки труб и уже выполнила несколько подобных международных проектов. Специалисты RMS по контракту выполняют сварку на отрезках трубопровода по реке Буффало Крик на расстоянии 400 км (250 миль) на север от г. Эдмонтон, за которые отвечает фирма «TransCanada Pipelines».

Сварка труб длиной 24 м (79 футов) в трубопровод длиной 54 км (34 мили) выполняется в три этапа. На первом большую часть швов сваривает главная бригада. Для этой части проекта фирма «O. J. Pipelines» использует систему RMS MOWII — механизированную установку для орбитальной сварки с двумя сварочными головками, обеспечивающую швы стабильного качества, вос-



Трубопровод «Buffalo Creek West» строится в экстремальных условиях как для человека, так и для машины

* По материалам, опубликованным в журнале «Weld+Vision» (Австрия) за 2009 г., № 23.



Дебют дугового процесса СМТ с переносом металла с короткими замыканиями при строительстве трубопровода

производительность и повышенную производительность. RMS тесно сотрудничала с «Fronius» при разработке этой системы, и теперь использует изготовленные по заказу источники питания TransPuls Synergic 3200 Pipe и механизмы подачи проволоки VR7000 в качестве основного сварочного оборудования. На втором этапе команда сваривает короткие звенья трубопровода, например, швы на крутых подъемах, отрезках дороги, сборной арматуре и другие подобные швы, которые основная бригада не делает, так как это было бы неэффективным использованием ее времени. И, наконец, третья бригада, «связующая», сваривает эти особо короткие звенья с главным отрезком, ранее сваренным главной бригадой, где именно и происходит мировой дебют СМТ для сварки корневых швов при строительстве трубопровода.

Обычно эти связующие звенья сваривают с использованием электродов с целлюлозным покрытием. Однако этот процесс отличается повышенным риском водородного растрескивания шва. Для исключения водородного растрескивания такие швы, сваренные с применением электродов, подвергаются неразрушающему контролю качества, но не ранее, чем через 24 ч после их завершения. Эта 24-часовая выдержка представляет собой проблему для подрядчика, так как траншея должна оставаться открытой, и ее целостность должна быть обеспечена в течение 24 ч. Для исключения этой задержки подрядчики пытались найти способ сварки электродами с низким со-

держанием водорода для получения связующих швов, который бы позволил выполнять немедленный контроль качества только что сваренных швов.

Применение процесса СМТ вместо сварки с использованием электродов обеспечило огромные преимущества, в частности, в отношении времени. В случае корневых проходов, сваренных процессом СМТ, в кольцевых швах содержится намного меньше водорода, а это позволяет исключить 24-часовое ожидание для проведения контроля готового шва. Кроме экономии времени, СМТ обеспечивает прекрасные характеристики перекрытия зазора при переносе металла с короткими замыканиями и чрезвычайно высокую стабильность горения дуги, даже если сварка выполняется с двух сторон одновременно.

Еще одно преимущество применения СМТ заключается в обеспечении стабильности формы корневого шва изнутри. В положениях сварки «12» и «6 часов» корень всегда имеет одинаковую форму, несмотря на изменение некоторых параметров сварки. После сварки корневых проходов RMS сваривает швы с использованием автоматической сварки порошковой проволокой. В своем первом применении для строительства трубопровода процесс СМТ доказал пригодность применения в экстремальных условиях, а также перспективность для повышения производительности сварки трубопроводов.



ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛА «WELDING JOURNAL», 2009, № 4

C. Darling. ПАЙКА: НЕОБХОДИМАЯ АЛЬТЕРНАТИВА СОЕДИНЕНИЯ

Чтобы привести в соответствие постоянно изменяющиеся проекты продукции и экономические требования сегодняшней промышленности, инженеры должны уметь квалифицированно подбирать или сочетать многие материалы и процессы, которые применяются при производстве изделий. Соединение металла является одним из таких процессов, который обычно применяется в промышленности и на что часто влияет переделка материала. Среди множества технологий соединения инженеры наиболее часто выбирают один из четырех методов: механическое крепление, склеивание, сварку, пайку. Пайка позволяет инженерам-разработчикам и инженерам-техно-

логам различные и экономные формы соединения одно- и разнородных металлов и неметаллических материалов. В статье обсуждаются многие критерии, которые должны учитывать инженеры при выборе метода соединения с помощью пайки по сравнению с другими основными методами. При правильном проектировании пайка может обеспечить те же характеристики, что и при соединении сваркой, которая является более гибким процессом производства. С повышением спроса на модернизированную продукцию и процессы пайка является важной альтернативой другим способам соединения компонентов.

G. D. Budi Dharma, M. Hamdi, T. Ariga. РЕЗУЛЬТАТЫ ДОБАВЛЕНИЯ СЕРЕБРА И ИНДИЯ К БЕССВИНЦОВЫМ ПРИПОЯМ

На протяжении многих лет для сборки электронных приборов использовали оловянно-свинцовые припои. Этот сплав обладает многими необходимыми характеристиками, включая низкую стоимость и температуру плавления, хорошую технологичность и замечательное смачивание на медных подложках и их сплавах. Однако токсичность свинца для здоровья человека и окружающей среды подталкивает к проведению основательного научного исследования, которое привело бы к открытию бессвинцового припоя, подходящего для электронных сборок. Для замены оловянно-свинцовых припоев было предложено большое количество бессвинцовых сплавов, но только некоторые соответствуют требуемым свойствам материала, паяемости и критериям стоимости.

Даже незначительное добавление серебра и индия улучшает смачиваемость, микроструктуру и микрот-

вердость бессвинцового припоя. Начальная температура на кривой DSC Sn–Cu припоя эвтектического состава была понижена с помощью добавления 1,0 мас. % In. Дальнейшее понижение начальной и пиковой температур было получено путем добавления серебра. Его незначительное добавление оказывает влияние на смачиваемость припоев. Повышенное содержание серебра способствовало лучшей смачиваемости посредством сокращения времени смачивания и повышения максимальной силы смачивания. Увеличение содержания серебра от 0,1 до 0,5 мас. % в Sn–0,7Cu–1,0In–xAg припоях немного уменьшает его твердость. Добавление серебра делает первичный размер зерен β -Sn меньше. Основываясь на результатах EMPA, наблюдались Cu–Sn и Ag–Sn интерметаллидные фазы, а атомы индия были распределены в β -Sn матрице.



*J. Arnold, E. Miller, G. Mitchell. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ПАЙКИ
ТВЕРДЫМ И МЯГКИМ ПРИПОЕМ*

Способы пайки твердым и мягким припоём обеспечивают профессионалов крепкими, долговечными соединениями. При выполнении конкретной работы из разных методов следует выбирать наиболее приемлемые. Традиционные методы нагрева предусматривают использование печи, погружение в расплав, контактный нагрев либо нагрев пламенем. Вопрос лишь в том, какой метод следует выбрать для вашей будущей работы?

В данной статье представлен взгляд на разные способы выполнения работы при использовании пайки в печах, пайки погружением, пайки с применением контактного нагрева или пайки с применением нагрева пламенем.

M. Weinstein, R. L. Peaslee, F. M. Miller. ПРИПОИ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ ДЛЯ ВАКУУМНОЙ ПАЙКИ

Припои на основе никеля используют для пайки любых тугоплавких металлов, в основном, для пайки жаропрочных и коррозионно-стойких металлов, в частности, для пайки наиболее широко используемых нержавеющей сталей типа AISI 300, AISI 400, а также сплавов на основе никеля и кобальта. В случае оптимального выбора припоя паяное соединение сохраняет свои прочностные свойства вплоть до температуры 980 °С. Для пайки низкоуглеродистых сталей обычно используют более дешевые припои, и лишь в исключительных случаях применяют припои на основе никеля.

При выборе припоя принимают во внимание следующие основные факторы: свойства припоя, конструкцию паяного соединения, эксплуатационные свойства, свойства паяемого металла, стоимость припоя и его наличие на рынке.

Свойства припоя. К свойствам припоя относят температуру плавления, растекаемость, температуру распайки и давление паров компонентов припоя.

Рассматривая припой с точки зрения температуры плавления, следует учитывать, что его плавление может происходить при достижении определенной температуры, например, в случае использования припоя эвтектического состава, или он постепенно расплавляется в некотором температурном интервале.

От качества подгонки деталей в зоне соединения зависит выбор припоя, обладающего определенной вязкостью и текучестью, которые характеризуют скорость растекания припоя по паяемым поверхностям.

Свойства сплавов, используемых в качестве основы припоев, как правило, зависят от сочетания компонентов и их температуры плавления, что в итоге определяет структуру паяного шва и температуру,

Так как существует большое количество методов нагрева для пайки твердым и мягким припоём, в профессиональном применении решающий фактор будет зависеть от технических, производственных и экономических средств и требований. Выбор наиболее подходящего метода нагрева обеспечит наилучшие возможные соединения при пайке твердым и мягким припоём. Для достижения хорошего результата сварочная промышленность постоянно улучшает и совершенствует технологии и одновременно способствует обеспечению безопасности и достижению более высоких показателей.

при которой происходит разрушение паяного соединения, т. е. температуру его распайки.

При вакуумной пайке следует выбирать припои с давлением паров компонентов ниже, чем давление в вакуумной печи, во избежание испарения некоторых компонентов припоя, что приводит к дефектам паяного шва.

Конструкция паяного соединения. Исходя из перечисленных выше причин, при выборе припоя необходимо учитывать геометрию паяного шва и величину паяльного зазора.

Эксплуатационные свойства. Условиям эксплуатации должны соответствовать следующие свойства паяного соединения: прочность, пластичность, жаропрочность и коррозионная стойкость. При выборе припоя следует учитывать химический состав, растекаемость и механические свойства паяного шва.

Состав основы припоя. Свойства паяного соединения в основном определяются легированием основы припоя.

Цена и его наличие на рынке. Стоимость компонентов припоя на рынке металлов играет существенную роль в формировании стоимости паяного узла. Причем на стоимость процесса пайки в основном влияют неустойчивость и практически непрогнозируемые изменения рынка как драгметаллов, так и стратегически важных металлов.

Влияние этой непредсказуемости в некоторой мере можно скомпенсировать разработкой паяных конструкций, в которых предусматривается использование припоев, компоненты которых в меньшей мере чувствительны к колебаниям цен на рынке металлов. В табл. 1 показано изменение за последние пять лет стоимости золота, серебра и никеля, которые в основном и определяют стоимость припоя.



Таблица 1. Цены металлов, используемых в составе припоев, USD за тройскую унцию

Металл	2 кв. 2003	1 кв. 2008	Рост цен, %
Золото	300,00	896,00	199
Серебро	5,00	16,87	237
Никель	0,33	0,68	106

В машиностроении традиционно применяются определенные драгметаллы для пайки некоторых узлов, однако в настоящее время наметилась тенденция использования относительно более дешевых припоев на основе никеля, рекомендуемых, например, Американским обществом сварщиков (AWS) и Академией маркетинга (AMS).

В расчете фактических затрат на материалы, используемые в паяном соединении, следует учитывать не только рыночную стоимость металлов, но и процентное содержание данного металла в припое и его удельный вес, так как для выполнения паяного соединения независимо от состава требуется заданный объем припоя, необходимый для заполнения зазора между паяемыми деталями. Удельный вес золота по отношению к никелю почти в два раза выше и потому его требуется большее количество для заполнения паяльного зазора.

В табл. 2 показана зависимость стоимости припоя (по состоянию на июнь 2008 г.) от содержания в нем золота, серебра и никеля, необходимого для решения определенной технологической задачи, например, пайки деталей с зазором 2,5 мкм по площади паяемой поверхности 1 кв. дюйм или 1 кв. фут. Из данных таблицы видно влияние колебаний цен на рынке металлов на стоимость припоя, а также возможность снижения затрат при замене припоев, содержащих золото и серебро припоями на основе никеля.

Таблица 2. Стоимость припоя в зависимости от содержания золота, серебра и никеля

Компонент припоя	USD/кв. дюйм	USD/кв. фут
AWS BAu-1 (38% золота)	2,27	326,88
AWS BAu-2 (80% золота)	6,45	928,80
AWS BAg-7 (56% серебра)	0,05	7,20
AWS BNi-5 (71% никеля)	0,002	0,29
AWS BNi-7 (76% никеля)	0,0022	0,32
AWS BNi-6 (90% никеля)	0,0028	0,40

В качестве примера ниже приведены краткие технические характеристики и рекомендации AWS A5.8:2004 по применению некоторых типов припоев на никелевой основе для пайки и сваркопайки.

BNi-1 используют для получения высокопрочных и жаростойких соединений при сборке, например, лопаток турбин и деталей реактивного двигателя.

BNi-2 как и припой марки BNi-1 обеспечивает хорошую растекаемость при более низкой температуре пайки.

BNi-3 хорошо растекается при снижении требований к условиям вакуума. Идеален для получения неразъемных соединений и при пайке по большой поверхности.

BNi-4 образует большие галтели с достаточно высокой пластичностью, пригоден для пайки деталей с большими зазорами.

BNi-5 применяют для получения высокопрочных и коррозионно-стойких соединений, в частности, для пайки изделий ядерной техники и в других случаях, где исключается использование в составе припоя бора.

BNi-6 — порошкообразный наплавочный материал, обеспечивающий минимальное проникновение металлов припоя в подложку на основе никеля или железа.

BNi-7 обеспечивает прочные и вакуумно-плотные соединения с жаропрочными сталями при относительно низкой температуре пайки. Низкий уровень эрозии паяемых деталей объясняется малой растворимостью припоя в сплавах на основе железа и никеля. Используется для изготовления сотовых конструкций и тонкостенных трубчатых теплообменников.

BNi-8 также используют для пайки сотовых конструкций из нержавеющей сталей и других коррозионно-стойких металлов.

BNi-9 идеален для пайки деталей реактивных двигателей и других узлов, работающих в условиях повышенных нагрузок. Обеспечивает высокую прочность соединений при более низкой температуре пайки.

BNi-10 обеспечивает очень высокую прочность соединений, эксплуатируемых в условиях повышенной температуры. Припой хорошо подходит для пайки металлов, легированных кобальтом, вольфрамом и молибденом.

BNi-11 можно использовать для тех же целей, что и припой марки BNi-10, но в отличие от него он лучше растекается.

BNi-12 аналогичен по свойствам припою BNi-7, но обладает более высокой прочностью, повышенной жаропрочностью и коррозионной стойкостью.

BNi-13 аналогичен по свойствам припою BNi-2, но обладает повышенной коррозионной стойкостью и обеспечивает высокую прочность паяного соединения.

ХІІІ РЕСПУБЛІКАНСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНІЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦІЯ СВАРЩИКОВ КАЗАХСТАНА

10–11 декабря 2009 г. прошла XIII Республиканская научно-техническая конференция «Сварка и контроль» в Карагандинском государственном техническом университете (Республика Казахстан). В конференции приняли участие главные сварщики, специалисты по сварке и неразрушающему контролю, преподаватели учебных заведений из более чем 30 предприятий и организаций Казахстана.

Перед началом конференции состоялась передача менеджерами итальянско-казахстанской компании «ERSAI» Ф. Жаббур и Д. Коньсовой в дар Карагандинскому государственному техническому университету восьми единиц современного мультимедийного учебного оборудования на общую сумму 1 млн тенге для обучения студентов сварочной специальности и для совместно создаваемого межотраслевого учебного центра «Сварка». В июне 2009 г. эта компания уже безвозмездно поставила для лаборатории сварки фильтровентиляционный агрегат ЕМК-1600 стоимостью 1,2 млн тенге. Со словами благодарности компании «ERSAI» на открытии конференции выступил председатель конференции канд. техн. наук, доцент КарГТУ И. А. Бартнев.

В ходе конференции было заслушано и обсуждено 16 докладов, посвященных различным аспектам теории и практики сварочного производства и неразрушающего контроля, а также подготовки кадров для сварочного производства в Республике Казахстан (РК).

О международной выставке современного сварочного оборудования и технологий «Weldex 2009», проходившей с 12 по 16.10.2009 г. в Москве, рассказал с демонстрацией фотослайдов и видеороликов И. А. Бартнев. Принципиально новую технологию MicroTask™, разработанную фирмой «Кемппи», для прихватки тонкого металла представил в своем докладе главный сварщик «Welding Group» из г. Алм-Аты С. Линовский в соавторстве с д-ром техн. наук П. Ярнстром (Kemppi Oy, Finland., Lachti). С докладом о перспективах развития сварочного производства выступил старейший преподаватель сварочных дисциплин в КарГТУ канд. техн. наук, доцент В. И. Боченин. Об интересных работах по применению аргонодуговой сварки при создании оригинальных монументальных скульптур из бронзы, которые установлены в таких крупных городах Казахстана, как Астана, Караганда, Атырау, Усть-Каменогорск рассказал с показом иллюстраций академик Академии художеств РК, директор Карагандинского отделения Союза художников РК А. Ф. Курицын.

Опыту плодотворного сотрудничества итальянско-казахстанской компании «ERSAI» и Карагандинского государственного технического университета в деле подготовки и стажировки молодых специалистов по сварке был посвящен доклад менеджера ТОО «ЕРСАЙ» из г. Актау на Каспии Фади Жаббура и И. А. Бартнева. Два доклада об износостойкой дуговой наплавке

ленточным электродом в производстве сварных шибберных задвижек и о нанонитридном упрочнении хромоникелькремнистого наплавленного металла для трубопроводной арматуры были представлены канд. техн. наук, доцентом Ю.И. Лопуховым из Восточно-Казахстанского государственного технического университета (г. Усть-Каменогорск).

О влиянии параметров плазменной наплавки и сварки на свойства металла сообщили И. А. Бартнев и академик Академии информатизации, канд. техн. наук Б. М. Маринушкин из ТОО «Ветромашсервис», г. Алм-Аты. Три доклада были представлены молодыми преподавателями и магистрантами из КарГТУ. Это «Природа деформаций и напряжений, возникающих в сварных конструкциях»; «Наплавка бил молотковых мельниц» (магистрант Д. К. Абсатов); «CAE системы — системы инженерного анализа в моделировании сварочных процессов» (магистрант Е. А. Теленкова, преподаватель Г. Р. Гурба).



Рабочий момент конференции



Выступление С. Линовского

О разработке государственных общеобязательных стандартов технического и профессионального послесреднего образования РК рассказала зам. директора профессионального лицея № 26 г. Караганды Е. М. Квитко. С докладом о технологических особенностях сварки и контроля корневого шва трубопровода выступил инженер, первый выпускник кафедры сварки КарГТУ Ж. Е. Абилов. Директор ТОО НПО «Техник», г. Караганда И. М. Покасов доложил о разработке методики контроля и оценке качества сварных швов по площади дефекта, которая вызвала большую дискуссию на конференции. Еще одна серьезная дискуссия состоялась по поводу доклада главного сварщика «Welding Group» из г. Алм-Аты С. Линовского о технологии сварки корня шва Fast ROOT модифицированной короткой дугой.

В заключение первого дня конференции И. А. Барте́нев рассказал об опыте подготовки студентов по сварочной специальности в КарГТУ в соответствии с системой бакалавриата и о распределении выпускников на работу в крупные компании и фирмы в Западном и Центральном Казахстане.

В первый день конференции состоялась экскурсия в лабораторию сварки КарГТУ, где прошла презентация нового оборудования фирмы «Кемппи». В частности, был показан в действии аппарат Master

Tig MLS™ 3000/3003 ACDC для сварки и выполнения прихваток на тонком металле по технологии MicroTask. Настройку режимов и сварку этим аппаратом продемонстрировал главный сварщик ТОО «Welding Group» С. Линовский. Новая технология вызвала большой интерес у участников конференции, которые сами опробовали сварку аппаратом Master Tig MLS™ 3000/3003 ACDC. Во второй день конференции было проведено совещание главных сварщиков предприятий, начальников лабораторий сварки и специалистов по сварке и неразрушающему контролю, на котором обсуждались проект новых Правил аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства РК, а также создание системы аттестации сварочного производства в стране. С докладом по этим вопросам выступил доцент КарГТУ И. А. Барте́нев.

Были предложены кандидатуры в состав Национального аттестационного комитета по сварочному производству РК (НАКС РК) и намечены его функции. Присутствовавшие на совещании специалисты одобрили эти предложения и высказались за скорейшее утверждение новых Правил аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства РК в Министерстве чрезвычайных ситуаций РК и введение в действие системы аттестации сварочного производства в стране.

Обсуждался на конференции также вопрос о коллективной подписке на журнал «Автоматическая сварка». Более десяти представителей фирм и предприятий изъявили желание стать коллективными подписчиками этого авторитетного журнала.

По окончании конференции директор ТОО «Welding Technologies» из г. Атырау А. Г. Козьмин высказал желание оказать помощь лаборатории сварки и поставить безвозмездно три новейших сварочных аппарата фирмы «Кемппи» для обучения студентов КарГТУ, что будет способствовать повышению качества подготовки молодых специалистов по сварочному производству в единственном в Казахстане вузе с такой специальностью.

И. А. Барте́нев, канд. техн. наук

УДК 621.791:061.2/4

ПРОБЛЕМЫ РЕСУРСА И БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ, СООРУЖЕНИЙ И МАШИН (итоговая научная конференция в ИЭС им. Е. О. Патона)

22 января 2010 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона состоялась итоговая научная конференция, посвященная рассмотрению научных и прикладных результатов, полученных в течение 2007–2009 гг. при выполнении проектов целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы

ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин». В работе конференции приняли участие научные руководители и исполнители проектов, а также представители заинтересованных министерств, ведомств, учебных и отраслевых институтов, промышленных предприятий и организаций.

Конференцию открыл научный руководитель программы Президент Национальной академии наук Украины академик Б. Е. Патон, который отметил, что «...сегодня особую активность приобретают проблемы управления эксплуатационной надежностью и долговечностью ответственных объектов путем определения их технического состояния, остаточного ресурса и установления научно обоснованных терминов эксплуатации». На решение этих проблем и направлена комплексная программа НАН Украины. Ее цель — создание методологических основ, технических средств и технологий для оценки и продления ресурса ответственных объектов длительной эксплуатации. К выполнению этой программы, состоящей из девяти разделов, включающих 118 проектов, были привлечены 26 институтов восьми отделений НАН Украины. По мнению Б. Е. Патона, в течение трех лет были получены важные научно-технические и практические результаты. Среди них:

- разработка методики оценки прочности и долговечности трубопроводов на основе двукритериальной диаграммы разрушения при наличии стресс-коррозионных дефектов с регламентированием допустимого коэффициента запаса прочности и предложенной процедурой расчета его реального значения;
- разработка технологии ремонтной сварки корпусных деталей паровых турбин и арматуры высокого давления для продления ресурса турбоагрегатов ТЭС;
- расчет по критериям механики разрушения допустимых размеров трещиноподобных дефектов в стенках питающих трубопроводов энергоблоков сверхкритического давления ТЭС в зависимости от их формы и содержания примесей в рабочей среде;
- отработка технологии изготовления низкочастотных пьезокерамических двухкомпонентных акселерометров для вибрационного контроля главных циркуляционных насосов АЭС при эксплуатации в условиях температур до 300 °С. Изготовлены опытные образцы акселерометров и исследованы их характеристики;
- выполнены работы по оптимизации сварочных технологий и материалов для восстановления и продления ресурса действующих мостов. Создан полуавтомат для восстановления дуговой сваркой подводных металлоконструкций с целью продления их ресурса;
- созданы и внедрены в КБ «Южное» технология и оборудование для диагностики элементов конструкций из композиционных материалов методами лазерной интерферометрии;
- разработаны и исследованы образцы слоистокомбинированных волокнистых композиционных материалов, на основе которых созданы эластичные взрывозащитные камеры для безопасной резки и обработки металлоконструкций;
- изготовлены для нефтехимической отрасли опытная партия эмали с использованием модифи-



Президиум конференции (слева направо): академик НАН Украины И. К. Походня, академик Б. Е. Патон и академик НАН Украины Л. М. Лобанов

цированных полиуретановых лакокрасочных материалов для противокоррозионных покрытий и проведена опытно-промышленная проверка с нанесением ее на элементы оборудования и трубопроводы Лисичанского нефтеперерабатывающего комбината;

- разработана технология, повышающая в 3...4 раза ресурс долот для бурения скважин при добыче рассеянного или шахтного металла;

- установлено, что длительная эксплуатация создает значительные изменения электрических свойств металла стенки магистральных трубопроводов. Построены корреляционные зависимости между изменениями механических и электрохимических свойств, которые открывают возможности прогнозирования эксплуатационной надежности металла трубопроводов.

В процессе выполнения программы были получены и другие важные научно-технические и практические результаты. Вместе с тем, по мнению Б. Е. Патона, программа содержала ряд мелких проектов, не имеющих ясных перспектив использования полученных результатов.

Важно отметить, что научный совет программы обеспечил подготовку издания итогового сборника научных статей проектов программы «Проблемы ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» (Киев, изд. ИЭС им. Е. О. Патона, 2009. — 710 с). Сборник содержит основные научные и прикладные результаты работ, полученные при выполнении проектов (заказать сборник можно в ИЭС им. Е. О. Патона по тел. 529-26-23).

Затем на конференции выступили научные руководители разделов программы.

Академик НАН Украины *В. И. Махненко*, научный руководитель раздела «Разработка методологических основ оценки технического состояния и обоснованности безопасного срока эксплуатации конструктивных элементов объектов повышенной опасности на территории Украины», в своем выступлении сообщил, что все шесть проектов раздела программы связаны с ответственными объектами такими, как парогенераторы (атомная энергетика), магистральные трубопроводы, железнодорожный транспорт, жилищные и производственные строе-



ния в зоне шахтных выработок. По всем этим направлениям получены важные результаты.

Академик НАН Украины *З. Т. Назарчук*, научный руководитель раздела «Разработка методов и новых технических средств неразрушающего контроля и диагностики состояния материалов и изделий длительной эксплуатации», в своем выступлении отметил, что создана эффективная система мониторинга, новые средства неразрушающего контроля качества элементов ряда жизненно важных объектов, а также подготовлена к серийному производству новая диагностическая аппаратура.

Научный руководитель раздела «Разработка методов защиты от коррозии элементов конструкций объектов длительной эксплуатации» чл.-кор. НАН Украины *В. И. Похмурский* отметил, что в перечень наиболее важных результатов выполненных проектов следует отметить разработку покрытия для повышения эксплуатационной надежности труб и котлов электростанций, разработку покрытий для защиты от фреттинг-коррозии, разработку методов защиты от коррозии стальной арматуры для продления ресурса железобетонных конструкций. Он отметил важность создания государственной целевой программы работ по защите от коррозии конструкций мостов и других объектов в базовых отраслях промышленности Украины вплоть до 2015 г.

По разделу «Разработка эффективных методов оценки и продления ресурса объектов атомной энергетики» (научный руководитель — академик НАН Украины *И. М. Неклюдов*) выступил д-р техн. наук *В. Н. Воеводин*. Он подчеркнул, что основная часть проектов подраздела выполнена с участием АЭС Украины. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния корпусов реакторов ВВЭР-1000, парогенераторов и сварных швов трубопроводов турбинного отделения энергоблоков Запорожской и Южно-Украинской АЭС. Установлены основные причины разрешения трубопроводов обвязки, предложена экспертная методика их контроля с помощью магнитных методов.

Академик НАН Украины *Б. С. Стогний*, подводя итоги исследований по разделу «Повышение надежности и продление ресурса энергетического оборудования и систем», отметил, что получены важные результаты, которые будут использованы для повышения надежности и увеличения сроков службы турбин, генераторов, оборудования станций газоперекачки, а также при модернизации котельного оборудования коммунальной энергетики и угольных энергоблоков. Благодаря проведенным исследованиям сформулированы и обоснованы основные мероприятия для увеличения ресурса работы элементов котельного оборудования децентрализованной теплоэнергетики.

О научных результатах, полученных по разделу «Создание систем мониторинга технического состояния трубопроводов и объектов газо- и нефтеперерабатывающей промышленности», сообщил его научный руководитель чл.-кор. НАН Украины *А. Я. Красовский*. К наиболее важным достижениям он отнес создание компьютерной системы обеспечения целостности магистрального трубопровода, разработку универсального алгоритма расчета давления в составляющих трубопроводной системы, оценку конструкционной прочности трубопроводов с дефектами.

Выступление академика НАН Украины *Л. М. Лобанова* было посвящено полученным результатам по 22 проектам раздела «Повышение надежности и продление ресурса мостов, строительных, промышленных и транспортных конструкций». Среди них разработка технологии ремонтной сварки корпусных деталей турбин, разработка низководородных электродов для сварки и ремонта мостовых и транспортных конструкций и др.

Результаты, полученные по проектам раздела «Разработка технологий ремонта и восстановления элементов конструкций объектов повышенной опасности с целью продления сроков их эксплуатации» (научный руководитель — академик НАН Украины *К. А. Ющенко*), доложил д-р техн. наук *О. Г. Касаткин*.



Рабочий момент конференции



Научный руководитель раздела программы «Подготовка и издание нормативных документов и научно-технических пособий по вопросам оценки ресурса объектов длительной эксплуатации» академик НАН Украины *В. В. Панасюк* в своем выступлении отметил, что в течение 2007–2009 гг. были подготовлены и вышли в свет современные научно-технические справочные пособия в помощь инженерно-техническим работникам конструкторских и промышленных предприятий для оценки долговечности и надежности (ресурса) элементов конструкций длительной эксплуатации, в частности мостовых и строительных конструкций, тепловых и атомных электростанций, трубопроводов и т. п.

Затем состоялось обсуждение научных результатов, изложенных в докладах научных руководителей разделов программы. В обсуждении приняли участие доктор техн. наук *В. И. Король* (директор Донбасского центра технологической безопасности), *П. И. Кривошеев* (директор НИИ строительных конструкций), *А. И. Лантух-Ляценок* (профессор кафедры мостов и туннелей Национального транспортного университета), *В. И. Большаков* (директор ИЧМ им. З. И. Некрасова).

Все выступившие отметили актуальность и важность полученных результатов для решения проблемы ресурса объектов длительной эксплуатации, высказали мнение о целесообразности продолжить выполнение программы «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» в 2010–2012 гг.

В заключение академик *Б. Е. Патон* отметил: «...считаю, что нам нужно поддержать предложение научного совета относительно продления выполнения программы «Ресурс» в последующие три года. Необходимо поручить научному совету сформировать новые этапы работ, сконцентрировав научные силы на наиболее актуальных направлениях исследований, предусмотрев, прежде всего, практическое использование полученных результатов. При этом особенно подчеркиваю, что при проведении конкурса первоочередное внимание необходимо обратить на финансирование комплексных крупных работ, а не расплывать средства на выполнение мелких проектов». В завершение было принято решение отчетной конференции.

О. Г. Касаткин, д-р техн. наук,
В. Н. Липодаев, д-р техн. наук

Ю. Н. ЛАНКИНУ — 75



В феврале исполнилось 75 лет известному ученому в области автоматизации процессов сварки и спецэлектрометаллургии, заведующему отделом Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины доктору технических наук Юрию Николаевичу Ланкину.

Ю. Н. Ланкин работает в институте с 1958 г. после окончания Киевского политехнического института. Основным направлением его научной работы является исследование процессов сварки, нанесения покрытий и переплава как объектов автоматического регулирования, разработка систем автоматического регулирования и управления этими процессами, разработка систем автоматизации научных исследований.

Ю. Н. Ланкиным разработана теория расчета и созданы первые автоматические регуляторы электрических параметров контактной сварки, системы автоматического управления и контроля установки «Вулкан» для первого в мире эксперимента по сварке в космосе, а также автоматические регуляторы, системы управления и телеметрические преобразователи для электронно-лучевых установок зондирования ионосферы Земли по программам «Зарница» и «Аракс». В 1974–1975 гг. Ю. Н. Ланкин возглавил

бригаду специалистов, ответственных за предстартовую подготовку и штатную работу ускорителей во время советско-французского эксперимента «Аракс» на острове Киргелен.

Фундаментальные работы Ю. Н. Ланкина по автоматическому регулированию электронно-лучевой сварки легли в основу его докторской диссертации. Он возглавлял работы по созданию систем автоматического управления установок для электронно-лучевого нанесения покрытий и переплава, электродуговой и высокочастотной наплавки, автоматического регулирования электрошлаковой сваркой, датчиков и информационно-измерительных систем.

С 1987 г. Ю. Н. Ланкин возглавляет отдел автоматического управления процессами сварки и нанесения покрытий, является членом специализированного ученого совета ИЭС им. Е. О. Патона и НТУУ «Киевский политехнический университет» по защите докторских диссертаций, членом экспертной комиссии по оборудованию для автоматизации сварочного производства, членом редколлегии журнала «Автоматическая сварка».

Ю. Н. Ланкин — автор 57 авторских свидетельств и патентов и более 120 научных статей, соавтор учебников для вузов.

Коллектив ИЭС им. Е. О. Патона и редколлегия журнала сердечно поздравляют Юрия Николаевича со славным юбилеем и желают ему доброго здоровья, счастья, новых творческих успехов.

ПОДПИСКА — 2010 на журнал «Автоматическая сварка»

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
	480 грн.	960 грн.	2100 руб.	4200 руб.	78 дол. США	156 дол. США

*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Если Вас заинтересовало наше предложение по оформлению подписки непосредственно через редакцию, заполните, пожалуйста, купон и отправьте заявку по факсу или электронной почте.

Контактные телефоны: (38044) 287-63-02, 271-26-23; факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23.

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

ПОДПИСНОЙ КУПОН

Адрес для доставки журнала _____

Срок подписки с _____ **200 г. по** _____ **200 г. включительно**

Ф. И. О. _____

Компания _____

Должность _____

Тел., факс, E-mail _____



РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (190×190мм) — 700\$
 Вторая страница обложки (200×290мм) — 550\$
 Третья страница обложки (200×290мм) — 500\$
 Четвертая страница обложки (200×290мм) — 600\$

Обложка внутренняя, полноцветная

Первая страница обложки (200×290мм) — 400\$
 Вторая страница обложки (200×290мм) — 400\$
 Третья страница обложки (200×290мм) — 400\$
 Четвертая страница обложки (200×290мм) — 400\$

Внутренняя вставка

Полноцветная (разворот А3) (400×290мм) — 570\$
 Полноцветная (200×290мм) — 340\$
 Полноцветная (200×142мм) — 170\$
 Реклама в разделе информации
 Полноцветная (165×245мм) — 300\$
 Полноцветная (165×120мм) — 170\$
 Полноцветная (82×120мм) — 80\$

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
- Статья на правах рекламы — 50% стоимости рекламной площади
- При заключении рекламных контактов на сумму, превышающую 1000\$, предусмотрена гибкая система скидок

Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290мм
- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5мм с целью избежания потери части информации
- Все файлы в формате IBM PC**
- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi
- К файлам должна прилагаться распечатка (макеты в формате Word не принимаются)

Подписано к печати 21.01.2010. Формат 60×84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,84. Уч.-изд. л. 10,24 + 3 цв. вклейки. Цена договорная.

Печать ООО «Фирма «Эссе». 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

ПРОГРАММА ЛОЯЛЬНОСТИ ООО «ФРОНИУС УКРАИНА» В КРИЗИСНЫЙ ПЕРИОД И ЕЕ ИТОГИ*

С 25 июня по 25 сентября 2009 г. фирма ООО «Фрониус Украина» представила своим клиентам «Программу лояльности и стимулирования продаж». Целью этой программы является стимулирование покупок сварочных систем **«Fronius»** и аппаратов плазменной резки типа Powermax и поддержка украинских предприятий-производителей.

Благодаря отличным сварочно-технологическим качествам, высокой надежности и гибкости, сварочные системы **«Fronius»** и установки для плазменной резки типа Powermax дают возможность повысить качество и внешний вид изделий и в целом сократить себестоимость операций и снизить общие производственные расходы. Это является очень важным в данной экономической ситуации и сложных рыночных условиях, когда производственные компании ищут новые возможности сокращения расходов и экономии средств.

Предприятия, использующие в своем производственном цикле сварочные технологии, при приобретении оборудования могли выбрать один из трех наиболее подходящих для каждого вариант программы лояльности от ООО «Фрониус Украина»:

- ✦ получение дополнительной скидки на сварочную систему;
- ✦ отсрочка платежа (120 дней);
- ✦ программа «от аренды к владению».

Во всех случаях заказчики совместно со специалистами «Фрониус Украина» должны были оценить эффективность внедрения приобретаемой сварочной системы (или системы для резки); определить главные критерии получаемых преимуществ и **в результате спрогнозировать экономию средств при дальнейшей эксплуатации этих систем.**

Указанная эффективность внедрения систем в производство оценивалась на основании следующих критериев для различных типов оборудования:

КРИТЕРИИ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ

- ✦ Замена способа сварки с сокращением общих эксплуатационных затрат
- ✦ Экономия электроэнергии (потребляемый ток при сварочных токах 100А/200А/300А/400А — ранее и теперь)
- ✦ Экономия сварочной проволоки за счет уменьшения разбрызгивания (замер массы проволоки на сварку первого изделия — ранее и теперь)
- ✦ Уменьшение затрат на последующую обработку
- ✦ Увеличение производительности (скорость сварки или коэффициент наплавки)
- ✦ Надежность оборудования, сервис и техническая поддержка
- ✦ Повышение качества сваренного соединения

ТИП ОБОРУДОВАНИЯ

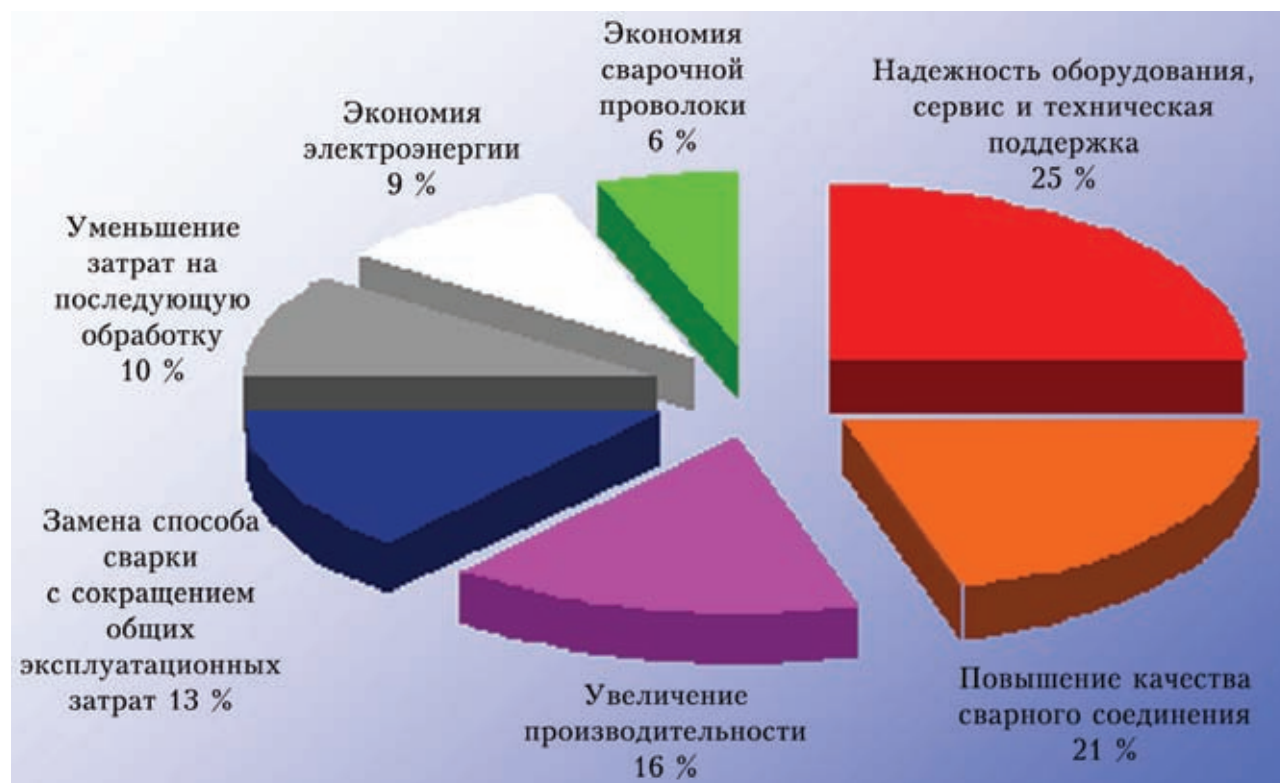
- ✦ МИГ/МАГ
- ✦ ВИГ/ТИГ
- ✦ ММА (электрод)
- ✦ Плазменная резка «Hypertherm»

* Статья на правах рекламы.

Необходимые сварочные пробы с соответствующими замерами производили на территории заказчиков или в Технологическом центре ООО «Фрониус Украина».

За время действия программы в ней приняло участие более 50 отечественных предприятий, которые внедрились в свое производство новое высокоэффективное сварочное оборудование и технологии (на основе анализа эффективности окупаемости своих инвестиций в новое оборудование).

Обобщенные данные по основным критериям выбора оборудования «Фрониус» представлены ниже.



Шесть технологических преимуществ, почему плазма *Hypertherm* превосходит кислородную резку:

Отличное качество реза	Высокая гибкость
Высокая производительность	Низкая себестоимость реза
Простота в использовании	Повышенная безопасность

Надеемся, что представленная информация будет полезна широкому кругу специалистов по сварке при модернизации или улучшении сварочных процессов производства с целью повышения конкурентоспособности предприятий.

ООО «Фрониус Украина» благодарит всех участников данной программы и надеется на дальнейшее развитие взаимовыгодного сотрудничества.



ОТЛИЧНАЯ СВАРКА

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

Днепрометиз
Группа предприятий «Северсталь-метиз»

ОАО «Днепрометиз» - крупнейшее предприятие Украины в своей отрасли, входит в международную группу производителей «Северсталь-метиз»

e-mail: sale@dm.severstalmetiz.com

т/ф: (0562) 34-82-24, 35-83-69, 35-15-97
Украина, 49081, г. Днепропетровск, пр. им. газеты „Правда”, 20

ПРОВОЛОКА:
сварочная Св-08 (А), Св-08Г2С
Вр-1 для армирования ЖБК
общего назначения без покрытия
термообработанная черная
оцинкованная
колючая

СЕТКИ:
плетеные
сварные
рифленные

ЭЛЕКТРОДЫ:
МР-3
АНО-4
АНО-6
АНО-21
УОНИ

**ГВОЗДИ
БОЛТЫ
ГАЙКИ
ШАЙБЫ**

www.dneprometiz.com.ua



С 1992 г. на рынке сварочного оборудования Украины

«Триада-Сварка»
г. Запорожье

- Разработка и поставка автоматизированных сварочных комплексов
- Технологическое обеспечение и полная комплектация сварочных производств
- Ремонт сварочного оборудования, в т. ч. сложного
- Пуско-наладочные работы
- Широкий выбор сварочного оборудования

ABICOR BINZEL
Fronius
SELMA



тел. (061) 233 1058, (0612) 34 3623,
(061) 213 2269, 220 0079 e-mail: weld@triada.zp.ua
Сервисный центр: (061) 270 2939. www.triada-weld.com.ua

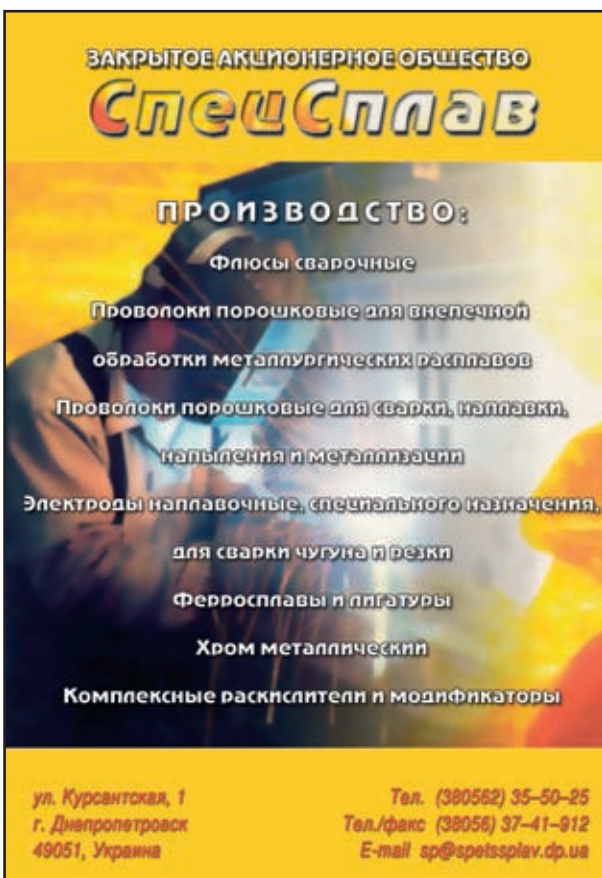
ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
СпецСплав

ПРОИЗВОДСТВО:

- Флюсы сварочные
- Проволоки порошковые для внепечной обработки металлургических расплавов
- Проволоки порошковые для сварки, наплавки, напыления и металлизации
- Электроды наплавочные, специального назначения, для сварки чугуна и резки
- Ферросплавы и легатуры
- Хром металлический
- Комплексные раскислители и модификаторы

ул. Курсантская, 1
г. Днепропетровск
49051, Украина

Тел. (380562) 35-50-25
Тел./факс (38056) 37-41-912
E-mail sp@spetssplav.dp.ua



НАВКО-ТЕХ
Automatic machines and robots for arc welding

Автоматические установки и роботы для дуговой сварки и наплавки

- УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ШВОВ
- УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ КОЛЬЦЕВЫХ ШВОВ
- РОБОТТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ СВАРКИ
- СВАРОЧНАЯ АППАРАТУРА

Украина, Киев
Тел.: +38 044 456-40-20
Факс: +38 044 456-83-53
<http://www.navko-teh.kiev.ua> E-mail: info@navko-teh.kiev.ua



SELMA ОАО «Электромашиностроительный завод «Фирма СЭЛМА»

Производство электросварочного оборудования

Номенклатура выпускаемого оборудования составляет более 100 наименований сварочной техники для всех видов электродуговой сварки.

- трансформаторы и выпрямители для ручной дуговой сварки
- полуавтоматы для сварки в среде защитных газов
- установки для аргодуговой сварки неплавящимся электродом
- установки воздушно-плазменной резки металла
- сварочные автоматы. Сварочные головки
- машины для контактной точечной сварки
- оборудование для механизации процесса сварки и резки
- оборудование для управления контактными сварочными машинами
- машины для автоматической плазменной резки портального типа
- машины для автоматической резки и разделки кромок под сварку труб
- дизельные сварочные агрегаты типа АДД
- машины для механической подготовки кромок под сварку

Вся продукция фирмы сертифицирована Госстандартами Украины и России. На предприятии внедрена и сертифицирована система обеспечения качества выпускаемой продукции ISO 9001-2001, TUV (Германия).

«Фирма СЭЛМА» проводит гарантийное и сервисное обслуживание оборудования, пусконаладочные работы, обучение и консультации по эксплуатации сварочного оборудования.



95000, г. Симферополь, Украина, ул. Генерала Васильева, 32А
Отдел маркетинга и сбыта: +38 (0652) 66-85-37, 58-30-55
Факс: +38 (0652) 58-30-53
E-mail: sales@selma.crimea.ua http://www.selma.ua

ОАО «ЗАПОРОЖСТЕКЛОФЛЮС»

69035, Украина г. Запорожье, ул. Диагональная, 2
Тел.: +380 (61) 289-03-53; факс: +380 (61) 289-03-50
E-mail: market@steklo.zp.ua

ОАО «Запорожский завод сварочных флюсов и стеклоизделий» на протяжении многих лет является одним из крупнейших в Европе производителей сварочных флюсов и силикатов натрия растворимого. На сегодня мы предлагаем более 20 марок сварочных флюсов.


На заводе разработана и внедрена Система управления качеством с получением сертификатов TUV NORD SERT на соответствие требованиям стандарта DIN EN ISO 9001-2000 и научно-технического центра «СЕПРОЗ» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины на соответствие требованиям ДСТУ ISO 9001-2001.

Благодаря тесному сотрудничеству с Институтом электросварки им. Е. О. Патона ОАО «Запорожстеклофлюс» освоил производство сварочных флюсов новым методом – двойным рафинированием сплава.

Сварочные флюсы для автоматической, полуавтоматической сварки и наплавки углеродистых и низколегированных сталей: АН-348-А, АН-348-АМ, АН-348-АД, АН-348-АП, АН-47, АН-47Д, АН-47П, АН-60, ОСЦ-45, АНЦ-1А, ОСЦ-45 мелкой фракции (ГОСТ 9087-81, ТУ У 05416923.049-99, ГОСТ Р 52222-2004).

Силикат натрия растворимый (модуль от 2,0 до 3,5). Широко применяется для изготовления жидкого стекла и сварочных электродов.

МЫ ВСЕГДА ГАРАНТИРУЕМ СТАБИЛЬНОСТЬ ПОСТАВОК И САМЫЕ НИЗКИЕ ЦЕНЫ В СНГ
Наша цель — более полное удовлетворение Ваших потребностей в качественных и современных сварочных материалах.



ЗАВОД АВТОГЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ДОНМЕТ[®]

Украина, г. Краматорск, тел./факс: (06264) 5-77-13
svarka@donmet.com.ua www.donmet.com.ua

Все для газовой резки и сварки. Электросварка.

100% гарантия от производителя

GYS **ТБ**

ДОНМЕТ[®]

ФИРМЕННАЯ ТОРГОВАЯ СЕТЬ

КИЕВ • ДОНЕЦК
Тел./факс (044) 404-38-72 Тел./факс (062) 381-88-93

ЗАПОРОЖЬЕ
Тел./факс (061) 224-11-56

ПУГАНСК • ОДЕССА
Тел./факс (0642) 71-51-65 Тел./факс (048) 785-19-65



Plasma Master Научно-производственная фирма **ПЛАЗМА-МАСТЕР ЛТД.**

Лидер в Украине в области плазменно-порошковой наплавки

- Оборудование для плазменно-порошковой наплавки
- Плазмотроны для наплавки различных модификаций
- Технологические разработки в области плазменной наплавки
- Услуги по наплавке деталей машин

Ручная плазменно-порошковая наплавка - прекрасный инструмент в ремонте!

Украина, 03680, Киев ул. Кржижановского, 3
тел./факс: +38 044 537-31-44
office@plasma-master.com.ua
www.plasma-master.com.ua



ОАО "ЗОНТ"

ПРОИЗВОДСТВО:

МАШИН ФИГУРНОЙ ГАЗОКИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ "АСШ-70М";
 МАШИН ДЛЯ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ "МЕТЕОР";
 МАШИН ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ "КОМЕТА М";
 МАШИН ДЛЯ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ "МАРИНА";
 МАШИН ПЛАЗМЕННОЙ И ГАЗОКИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ С
 ЧПУ ДЛЯ ФИГУРНОЙ РЕЗКИ ТРУБ;
 ПЕРЕНОСНЫХ ГАЗОРЕЖУЩИХ МАШИН "РАДУГА";
 НАСОСОВ, ТЕПЛООБМЕННИКОВ И ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ДЛЯ
 КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ.

ПОСТАВКА
 ИСТОЧНИКОВ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ.
 КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ И
 МОДЕРНИЗАЦИЯ
 МАШИН ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛА.





ОАО "ЗОНТ" (ТОРГОВАЯ МАРКА «АВТОГЕНМАШ»)
 65104, УКРАИНА, Г. ОДЕССА, ПР-Т. МАРШАЛА ЖУКОВА 103.

Т. +38 (048) 717-00-50, E-MAIL: OAOZONT@ZONT.COM.UA
 715-69-40, WWW.ZONT.COM.UA

Ф. +38 (048) 715-69-50 WWW.AUTOGENMASH.COM

ИЭС
 им. Е.О. ПАТОНА
 ОЗСМ

ГП «Опытный завод
 сварочных материалов
 ИЭС им. Е.О. Патона
 НАН Украины»

**Производство материалов для
 дуговой сварки, наплавки и резки:**

Электроды — АНО-4, АНО-4И, АНО-6, АНО-6У,
 АНО-12, АНО-21, АНО-21М, АНО-21У, АНО-27,
 АНО-36, АНО-37, МР-3, УОНИ 13/45, УОНИ 13/55,
 ВН-48, АНО-ТМ, АНО-ТМ/СХ, АНО-ТМ60, АНО-ТМ70,
 ТМЛ-1У, ТМЛ-3У, ЦУ-5, ТМУ-21У, ОЗЛ-6, ОЗЛ-8, ЦЛ-11,
 ЭА-395/9, ЭА-400/10У, ЦЧ-4, Комсомолец-100,
 Т-590, АНР-2

Порошковые проволоки — ПП-АН1, ПП-АН3,
 ПП-АН7, ПП-АН19, ПП-АН19Н, ПП-АН24С, ПП-АН30,
 ПП-АН59, ПП-АН61, ПП-АН63, ПП-АН67, ПП-АН68М,
 ПП-АН69, ПП-АН70М, ПП-АНВ2У, ПП-НnX25П4Н3Т,
 ППС-ЭК1, ППС-ЭК2, ППР-ЭК3, ППР-ЭК4

Флюсы плавные — по ГОСТ 9087-81, а также
 АН-М13, АН-25, АН-72

Флюсы керамические — АНК-40, АНК-47А,
 АНК-57, АНК-565

Возможно изготовление других марок материалов

04112, Украина	Тел.: (044)	456-64-95
г. Киев-112		456-63-69
ул. О. Телиги, 2	Факс: (044)	456-64-95
		456-63-08

Каховский завод
 электросварочного оборудования

74800 Украина, г. Каховка. Тел./факс: +38 (05535) 2-99-93, 2-19-72

market@kzeso.com www.kzeso.com



СИЛА ПРОТИВОПОЛОЖНОСТЕЙ...



КЗЭСО

Специальные Научные Разработки **СНР**
 Научно-производственная фирма

**ДИАГНОСТИКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
 И ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА**

**Магнитный
 структуроскоп КРМ-Ц-К2М**

- остаточные напряжения
- конструкционные напряжения
- результаты термообработки
- усталостные изменения
- развитие опасных зон
- оценка ресурса
- предупреждение разрушений



- ✓ без зачистки
- ✓ через защитное покрытие **до 6 мм**
- ✓ без контактной жидкости

Украина, 61121, г. Харьков, ул. Светлая, 10/16; тел./факс +38 (057) 771-65-91, 738-32-06
 www.krm-nrf.com e-mail: mail@krm-nrf.com
 в Москве — ООО "Магнитометрическая диагностика", +7 (499) 502-93-91, mail@mdiag.ru

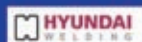
Разработка, производство, внедрение

СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Проволоки
порошковые для
сварки и наплавки,
проволоки сплошные,
электроды, флюс,
наплавочные установки



ООО «НПФ «Элна» является разработчиком и производителем порошковых проволок для сварки и наплавки, а также представителем компаний WELDING ALLOYS GROUP (Англия) и HYUNDAI WELDING Co. Ltd (Южная Корея) в Украине



ООО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА «Элна»
ул. Антоновича, 69, г. Киев, 03150, Украина
тел. (044) 200-80-25, 200-85-17, факс (044) 200-85-17
e-mail: mfo@elna.com.ua www.elna.com.ua



MEGAFIL® — обеспечение точности благодаря совершенной форме: полностью бесшовная порошковая проволока с уникальными сварочными свойствами для получения неразъемных соединений; благодаря своим стабильным размерам, отсутствию деформаций кручения она пригодна при решении широкого круга задач; гарантированная внутренняя защита от влаги позволяет использовать ее без повторной прокалки; важными преимуществами являются сверхвысокая электрическая проводимость и стабильное горение дуги. Поддержите свою форму с помощью MEGAFIL®.

MEGAFIL®: Продукция компании Дратцуг Штайн — наша серия бесшовных изделий, включая также высококачественные порошковые проволоки TOPCORE® и MECUFIL®.



Drahtzug Stein
D-67317 Altleiningen
Tel: +49(0) 6356 966-0
Fax: +49(0) 6356 966-114
E-mail: postmaster@drahtzug.de; www.drahtzug.de

Официальный представитель в Украине
АРКСЭЛ
83017, г. Донецк, пер. Витязий, 2а
Тел.: (062) 332-2650(52)
Тел./факс: 382-9449, 332-2651
E-mail: info@arcsel.dn.ua; www.arcsel.dn.ua

