

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор  
Б. Е. Патон

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

Ученые университетов Украины  
В. В. Дмитрик, НТУ «ХПИ», Харьков,  
В. В. Квасницкий, НТУУ «КПИ», Киев,  
В. Д. Кузнецов, НТУУ «КПИ», Киев,  
М. М. Студент, ФМИ, Львов

Зарубежные ученые

Н. П. Алешин

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ  
Гуань Цяо

Ин-т авиационных технологий, Пекин, Китай

А. С. Зубченко

ОКБ «Гидропресс», Подольск, РФ

М. Зиниград

Ун-т Ариэля, Израиль

В. И. Лысак

Волгоградский гос. техн. ун-т, РФ

У. Райсген

Ин-т сварки и соединений, Аахен, Германия

Я. Пилярчик

Ин-т сварки, Гливице, Польша

Г. А. Турчин

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

Редакторы

Т. В. Юштина (отв. секр.), Н. А. Притула  
Электронная верстка

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

Адрес редакции

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

Учредители

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

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

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

За содержание рекламных материалов  
редакция журнала ответственности не несет

Цена договорная

Издается ежемесячно

## СОДЕРЖАНИЕ

### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- Кривцун И. В., Крикент И. В., Демченко В. Ф.* Численный анализ характеристик плазмы сжатой и свободногорящей дуги с тугоплавким катодом ..... 3
- Григоренко Г. М., Ахонин С. В., Задорожнюк О. М., Клочков И. Н.* Структура и свойства проплавленного металла двухфазного титанового сплава с дисперсионным упрочнением при АДС ..... 11
- Бабинец А. А., Рябцев И. А., Панфилов А. И., Жданов В. А., Рябцев И. И.* Влияние способов дуговой наплавки порошковой проволокой на проплавление основного металла и формирование наплавленного металла ..... 20
- Жеманюк П. Д., Петрик И. А., Чигилейчик С. Л., Яровицын А. В., Хрущов Г. Д.* Особенности управления формой валика при однослойной микроплазменной наплавке на кромки лопаток авиационных ГТД ..... 26
- Хаскин В. Ю., Коржик В. Н., Чижская Т. Г., Сидорец В. Н., Ло Зие.* Влияние поглощения лазерного излучения на эффективность лазерной сварки меди и ее сплавов ..... 35

### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- Ланкин Ю. Н., Соловьев В. Г.* Информационно-измерительная система для дуговой сварки и наплавки ..... 40
- Бурлака В. В., Гулаков С. В.* Устройство для возбуждения и стабилизации сварочной дуги ..... 48

### ХРОНИКА

- Международная конференция и Форум заведующих кафедрами по направлению «Сварка и родственные технологии» ..... 52
- Выставка Weldex/Россварка 2016 ..... 55

### Информация

- Портативные, компактные сварочные системы  
TPS 270i C PULSE и TPS 320i C PULSE от Fronius ..... 57
- Сварка труб в экстремальных условиях ..... 59
- Роботизация сварочных процессов ..... 63
- Программы профессиональной подготовки на 2017 г. .... 65

## EDITORIAL BOARD

## Editor-in-Chief

B. E. Paton

## Scientists of PWI, Kyiv

S. I. Kuchuk-Yatsenko (vice-chief ed.),  
V. N. Lipodaev (vice-chief ed.),  
Yu. S. Borisov, G. M. Grigorenko,  
A. T. Zelnichenko, V. V. Knysh,  
I. V. Krivtsun, Yu. N. Lankin,  
L. M. Lobanov,  
V. D. Poznyakov, I. A. Ryabtsev,  
K. A. Yushchenko

## Scientists of Ukrainian Universities

V. V. Dmitrik, NTU «KHP», Kharb v,  
V. V. Kvasnitskii, NTUU «KPI», Kyiv,  
V. D. Kuznetsov, NTUU «KPI», Kyiv,  
M. M. Student, Karpenko PhMI, Lviv

## Foreign Scientists

## N. P. Alyoshin

N.E. Bauman MSTU, Moscow, Russia

## Guan Qiao

Beijing Aeronautical Institute, China

## A. S. Zubchenko

OKB«Gidropress», Podolsk Russia

## M. Zinigrad

Ariel University, Israel

## V. I. Lysak

Volgograd State Technical University, Russia

## Ya. Pilarczyk

Welding Institute, Gliwice, Poland

## U. Reisinger

Welding and Joining Institute, Aachen, Germany

## G. A. Turichin

St. Petersburg State Polytechn. Univ., Russia

## Editors

T. V. Yushtina (exec. sec.), N. A. Pritula  
Electron galley

I. R. Naumova, A. I. Sulima, D. I. Sereda

## Address of Editorial Board:

11, Kazimira Malevicha str., 03680, Kyiv,  
Ukraine

Tel.: (38044) 200 63 02, 200 82 77

Fax (38044) 200 54 84, 200 82 77

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

## Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,  
Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine,  
IA «Welding» (Publisher)

## State Registration Certificate

KV 4788 of 09.01.2001

ISSN 0005-111X

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

Published monthly

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.

## CONTENTS

## SCIENTIFIC AND TECHNICAL

- Krivtsun I. V., Krikent I. V., Demchenko V. F.* Numerical analysis of characteristics of plasma of compressed and freely-burning arc with refractory cathode ..... 3
- Grigorenko G. M., Akhonin S. V., Zadorozhnyuk O. M., Klochkov I. N.* Structure and properties of fully-penetrated metal of two-phase titanium alloy with dispersion hardening at AAW ..... 11
- Babinets A. A., Ryabtsev I. A., Panfilov A. I., Zhdanov V. A., Ryabtsev I. I.* Effect of methods of arc surfacing by flux-cored wire on penetration of base metal and formation of deposited metal ..... 20
- Zhemanyuk P. D., Petrik I. A., Chigilejchik S. L., Yarovitsin A. V., Khrushchov G. D.* Peculiarities of control of bead shape in single-layer microplasma surfacing on blade edges of aircraft FTE ..... 26
- Khaskin V. Yu., Korzhik V. N., Chizhskaya T. G., Sidorets V. N., Luo Ziyi.* Effect of laser emission absorption on efficiency of laser welding of copper and its alloys ..... 35

## INDUSTRIAL

- Lankin Yu. N., Solovjev V. G.* Information-measuring system for arc welding and surfacing ..... 40
- Burlaka V. V., Gulakov S. V.* Device for exciting and stabilization of welding arc ..... 48

## NEWS

- International Conference and Forum of Chair Chiefs on the direction "Welding and related technologies" ..... 52
- Exhibition Weldex/Rossvarka 2016 ..... 55

## INFORMATION

- Portable compact welding systems TPS 270i C PULSE and TPS 320i C PULSE from Fronius ..... 57
- Welding of pipes under extreme conditions ..... 59
- Robotization of welding processes ..... 63
- Programs of professional training for 2017 ..... 65

# ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ СЖАТОЙ И СВОБОДНОГОРЯЩЕЙ ДУГИ С ТУГОПЛАВКИМ КАТОДОМ\*

И. В. КРИВЦУН<sup>1</sup>, И. В. КРИКЕНТ<sup>2</sup>, В. Ф. ДЕМЧЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua  
<sup>2</sup>Днепродзержинский гос. технический университет. 51918, г. Днепродзержинск, ул. Днепростроевская, 2.

На основе самосогласованной математической модели процессов энерго-, массо- и электропереноса в столбе и анодной области электрической дуги с тугоплавким катодом проведен сравнительный численный анализ тепловых, электромагнитных и газодинамических характеристик дуговой плазмы для сжатой (плазменной) и свободногорящей аргоновой дуги с медным водоохлаждаемым анодом. Результаты расчета характеристик плазмы столба дуги показывают, что распределения плотности электрического тока, температуры и скорости плазмы сжатой дуги могут в значительной мере отличаться от соответствующих распределений для свободногорящей дуги в зависимости от тока дуги, диаметра канала сопла плазмотрона и расхода плазмообразующего газа. Характеристики прианодного слоя плазменной дуги также существенно отличаются от соответствующих характеристик свободногорящей дуги в зависимости от указанных выше параметров режима горения дуги. Таким образом, варьируя ток дуги, диаметр канала сопла плазмотрона и расход плазмообразующего газа, можно эффективно управлять характеристиками теплового, электромагнитного и, особенно, динамического воздействия сжатой дуги на поверхность металла анода. Библиогр. 13, табл. 1, рис. 10.

*Ключевые слова:* сжатая (плазменная) дуга, свободногорящая дуга, тугоплавкий катод, водоохлаждаемый анод, столб дуги, анодная область, характеристики дуговой плазмы, математическое моделирование

Одним из способов повышения эффективности электродугового воздействия на металлы и, как следствие, увеличения глубины проплавления и скорости сварки неплавящимся электродом является использование сжатой (плазменной) дуги вместо свободногорящей. Ограничение поперечных размеров столба дуги с тугоплавким катодом стенкой канала сопла плазмотрона может приводить к существенному повышению плотности электрического тока и теплового потока, вводимого дугой в свариваемый металл, а изменение расхода плазмообразующего газа дает возможность в широких пределах варьировать динамическое воздействие потока дуговой плазмы на поверхность сварочной ванны. Для эффективного практического использования плазменной дуги в качестве сварочного источника тепла необходимо располагать достоверной информацией о распределенных характеристиках плазмы сжатой дуги, а также характеристиках ее теплового, электромагнитного и газодинамического воздействия на свариваемый металл. Поскольку экспериментальное определение таких, важных с практической точки зрения, характеристик плазменной дуги, как распределения плотности электрического тока, теплового потока и газодинамического давления плазмы по поверхности сварочной ванны, затруднено вслед-

ствие высоких значений температуры дуговой плазмы и температуры указанной поверхности, малости геометрических размеров анодной области дуги и ряда других факторов, весьма актуальным представляется исследование плазменной дуги методами математического моделирования (см., например, [1–6]). Поэтому целью настоящей работы является детальный численный анализ распределенных характеристик плазмы столба и анодной области сжатой дуги в зависимости от режима ее горения, а также их сравнение с соответствующими характеристиками для свободногорящей дуги.

Рассмотрим стационарную электрическую дугу с тугоплавким катодом (W) и водоохлаждаемым (неиспаряющимся) анодом (Cu), горящую в потоке аргона при атмосферном давлении. Будем исследовать два варианта — плазменную дугу, сжатую стенкой цилиндрического канала сопла плазмотрона (рис. 1, а), и свободногорящую дугу (рис. 1, б). При выборе математической модели дуговой плазмы будем предполагать, что плазма столба дуги в обоих случаях является изотермической и однокомпонентной, содержащей только частицы защитного или плазмообразующего газа (Ar). Для численного анализа характеристик такой плазмы можно использовать самосогласованную математическую модель процессов энерго-, массо- и электропереноса в столбе и анодной области сварочной дуги, предложенную в работе [7] и редуцированную с учетом указанных предположений как описано в [8]. Предполагая также, что распределения характеристик плазмы как сжатой,

\* По материалам доклада, представленного на VIII Международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», 18–23 сентября 2016 г., г. Одесса, Украина.

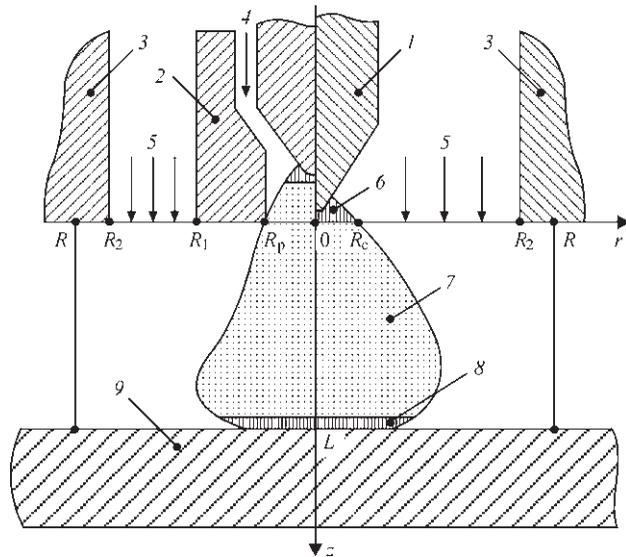


Рис. 1. Схема к расчету характеристик сжатой (плазменной) (а) и свободногорящей (б) дуги с тугоплавким катодом: 1 — термокатод; 2 — плазмоформирующее сопло; 3 — сопло для подачи защитного газа; 4 — плазмообразующий газ; 5 — защитный газ; 6 — катодная область; 7 — столб дуги; 8 — анодный слой; 9 — водоохлаждаемый анод

так и свободногорящей дуги являются осесимметричными, для расчета тепловых, газодинамических и электромагнитных характеристик в обоих случаях можно использовать одну и ту же систему уравнений, явный вид которых в цилиндрической системе координат приведен в работе [8]. Граничные условия для искомых функций  $\{v, u, T, \phi\}$ , здесь  $v, u$  — радиальная и аксиальная компоненты скорости дуговой плазмы,  $T$  — ее температура,  $\phi$  — электрический потенциал плазмы, задаются на границах расчетной области  $\Omega = \{0 < r < R, 0 < z < L\}$ , где  $R$  — радиус расчетной области,  $L$  — длина свободногорящей дуги/открытого участка сжатой дуги (см. рис. 1), следующим образом.

Условия для скорости, температуры плазмы и электрического потенциала на оси симметрии системы ( $r = 0$ ) задаются тривиальным образом:

$$v|_{r=0} = 0; \frac{\partial u}{\partial r}|_{r=0} = \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=0} = \frac{\partial \phi}{\partial r}|_{r=0} = 0. \quad (1)$$

На внешней границе расчетной области ( $r = R$ ) для скорости плазмы и электрического потенциала можем записать [8]:

$$\frac{\partial(\rho v r)}{\partial r}|_{r=R} = 0; u|_{r=R} = 0; \frac{\partial \phi}{\partial r}|_{r=R} = 0, \quad (2)$$

где  $\rho$  — массовая плотность плазмы.

Граничное условие для температуры плазмы при  $r = R$  зададим в зависимости от направления движения потока плазмы на этой границе [8]:

$$\begin{aligned} T|_{r=R} &= T_0, \text{ при } v|_{r=R} \leq 0; \\ \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R} &= 0, \text{ при } v|_{r=R} > 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $T_0$  — температура окружающего газа.

На границе плазмы столба дуги с анодным слоем, который предполагается бесконечно тонким ( $z = L$ ), используем условие энергетического баланса [7, 8], скорректированное с учетом работы выхода материала анода  $\phi_m$ :

$$-\chi \frac{\partial T}{\partial z}|_{z=L} + j_a \frac{k}{e} \left( \frac{5}{2} - \delta \right) T|_{z=L} = (\Delta\phi - \phi_m) j_a + q_a, \quad (4)$$

где  $\chi$  — коэффициент теплопроводности плазмы;  $j_a = -j_z|_{z=L}$  — плотность электрического тока на аноде;  $k$  — постоянная Больцмана;  $e$  — заряд электрона;  $\delta$  — постоянная термодиффузии электронов в дуговой плазме;  $\Delta\phi$  — разность потенциалов между внешней границей анодного слоя и поверхностью анода;  $q_a$  — тепловой поток в анод, определяемые согласно модели анодной области [7] при  $T_{ea} = T_a$ , где  $T_{ea}$  — температура электронов в анодном слое,  $T_a = T|_{z=L}$  — температура дуговой плазмы на его границе со столбом дуги.

С хорошим приближением электрический потенциал поверхности анода можно считать постоянным и положить, например, равным нулю, тогда граничное условие для потенциала плазмы на границе столба дуги с анодным слоем ( $z = L$ ) можно записать в виде:

$$\phi|_{z=L} = \Delta\phi. \quad (5)$$

Граничные условия в плоскости  $z = 0$  для свободногорящей дуги задаются аналогично тому, как это было сделано в работе [8]. В частности, в зоне катодной привязки дуги ( $r \leq R_c$ ) (см. рис. 1, б) для температуры и электрического потенциала дуговой плазмы принимаются условия:

$$T|_{z=0} = T_c(r); \sigma \frac{\partial \phi}{\partial z}|_{z=0} = j_c(r), \quad (6)$$

где  $\sigma$  — удельная электропроводность плазмы, а распределения температуры плазмы  $T_c(r)$  и плотности тока  $j_c(r)$  на границе катодной области со столбом дуги выбираются согласно рекомендациям [9].

При  $R_c < r \leq R$  можем записать:

$$T|_{z=0} = T_0; \frac{\partial \phi}{\partial z}|_{z=0} = 0. \quad (7)$$

Радиальная компонента вектора скорости плазмы при  $z = 0$  полагается равной нулю, а условия для аксиальной компоненты вектора скорости задаются следующим образом:

$$\begin{aligned} u|_{z=0} &= u_0, \text{ при } r < R_2; \\ u|_{z=0} &= u_0, \text{ при } R_2 \leq r \leq R, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $u_0$  — скорость защитного газа, определяемая его расходом и внутренним радиусом защитного сопла  $R_2$  (см. рис. 1, б).

Что касается граничных условий во входном сечении расчетной области ( $z = 0$ ) для сжатой

(плазменной) дуги, то они задаются следующим образом. Предполагая, что расстояние от рабочего конца катода до среза плазмформирующего канала (см. рис. 1, *a*) существенно превышает его радиус  $R_p$ , можно считать, что на выходе из канала реализуется одномерное (в направлении оси  $OZ$ ) течение дуговой плазмы, температура и скорость которой зависят только от радиальной координаты, радиальные компоненты скорости плазмы и напряженности электрического поля равны нулю, а градиент давления  $dp/dz$  и аксиальная компонента электрического поля  $E_z$  являются постоянными по сечению канала [1]. В этом случае распределения температуры  $T(r)$  и аксиальной компоненты скорости плазмы  $u(r)$  на срезе канала ( $r \leq R_p$ ) находятся путем решения одномерных уравнений:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \chi \frac{dT}{dr} \right) + \sigma E_z^2 - \psi = 0; \quad (9)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \eta \frac{du}{dr} \right) - \frac{dp}{dz} = 0. \quad (10)$$

Здесь  $\psi$  — потери энергии плазмы на излучение;  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости плазмы, а величина аксиальной компоненты электрического поля (градиента электрического потенциала)  $E_z = -(d\phi/dz)$  и градиента давления  $dp/dz$  определяются из интегральных соотношений:

$$I = 2\pi E_z \int_0^{R_p} \sigma r dr; \quad G = 2\pi \int_0^{R_p} \rho u r dr, \quad (11)$$

где  $I$  — ток дуги;  $G$  — массовый расход плазмобразующего газа.

Краевые условия для уравнений (9), (10) выбираются в соответствии с условиями симметрии течения (1) и условиями «прилипания» на охлаждаемой стенке плазмформирующего канала, что дает:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} &= \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=0}, \text{ при } r = 0; \\ T &= T_0; \quad u = 0, \text{ при } r = R_p. \end{aligned} \quad (12)$$

При  $R_p < r \leq R$  граничные условия для температуры и электрического потенциала совпадают с (7), радиальная компонента вектора скорости плазмы полагается равной нулю, а условия для аксиальной компоненты скорости задаются следующим образом:

$$\begin{aligned} u \Big|_{z=0} &= 0, \text{ при } R_p \leq r \leq R_1; \\ u \Big|_{z=0} &= u_0, \text{ при } R_1 < r < R_2; \\ u \Big|_{z=0} &= 0, \text{ при } R_2 \leq r \leq R, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $u_0$  — скорость защитного газа в случае сжатой дуги, определяемая его расходом, а также внутренним  $R_1$  и внешним  $R_2$  радиусами сопла для его подачи (см. рис. 1, *a*).

Исходная система уравнений [8], совместно с граничными условиями (1) – (8) для свободногорящей дуги и (1) – (5), (9) – (13) для плазменной дуги решалась численно, методом конечных разностей. При определении температурных зависимостей термодинамических свойств, транспортных коэффициентов и излучательной способности дуговой плазмы использовались расчетные данные для изотермической аргоновой плазмы атмосферного давления, приведенные в работе [10]. При численном решении газодинамической и тепловой задач использовался совместный лагранжево-эйлеровый метод [11, 12], адаптированный к условиям сжимаемой среды.

Сравнительный численный анализ характеристик дуговой плазмы, а также характеристик ее теплового, электромагнитного и газодинамического воздействия на поверхность анода для сжатой (плазменной) и свободногорящей дуги проводился при следующих параметрах: ток дуги  $I = 100, 150, 200$  А; длина свободногорящей дуги/длина открытого участка плазменной дуги  $L = 3$  мм; диаметр канала сопла плазмотрона  $d = 2R_p = 2, 3, 4$  мм; массовый расход плазмобразующего газа (Ar) варьировался в диапазоне  $G = 0,10 \dots 0,75 \cdot 10^{-4}$  кг/с, что соответствует объемному расходу  $0,34 \dots 2,55$  л/мин. В случае плазменной дуги внутренний и внешний радиусы кольцевого сопла для подачи защитного газа (Ar)  $R_1 = 4,4$  мм,  $R_2 = 7,7$  мм (см. рис. 1, *a*); скорость защитного газа  $u_0 = 0,65$  м/с. В случае свободногорящей дуги  $R_2 = 7,7$  мм (см. рис. 1, *b*);  $u_0 = 0,5$  м/с. В обоих случаях радиус расчетной области  $R$  выбирался равным 8 мм; температура поверхности охлаждаемого анода, температура стенок плазмформирующего и защитного сопел, а также температура подаваемого защитного газа  $T_0$  принималась равной 500 К.

На рис. 2 приведены изолинии температуры плазмы столба сжатой (см. рис. 2, *a*) и свободногорящей (см. рис. 2, *b*) дуги. Как следует из представленных на этом рисунке расчетных данных обжатие начального участка плазменной дуги стенкой канала, продуваемого потоком плазмобразующего газа, приводит к некоторому вытягиванию изотерм вдоль оси дуги и, соответственно, к увеличению длины высокотемпературной ( $T \geq 16000$  К) области столба по сравнению со свободногорящей дугой. Что касается радиальных распределений температуры дуговой плазмы, то в случае 100-амперной дуги, формируемой плазмтроном с диаметром канала сопла 2 мм, температура в центре столба оказывается несколько выше соответствующей температуры для свободногорящей дуги, незначительно увеличиваясь с ростом расхода плазмобразующего газа (рис. 3, *a*). Для случая  $I = 200$  А,  $d = 4$  мм температура в центре

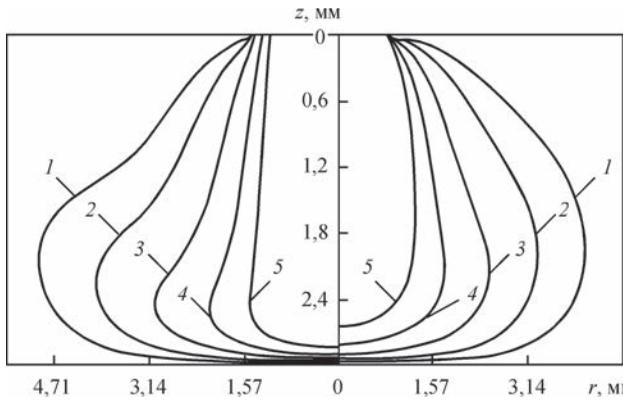


Рис. 2. Изолинии температуры плазмы столба сжатой (а) и свободногорящей (б) аргонной дуги с тугоплавким катодом (W) и водоохлаждаемым анодом (Cu) при токе  $I = 150$  А, длине дуги открытого участка  $L = 3$  мм, диаметре плазмформирующего канала  $d = 3$  мм и расходе плазмобразующего газа (Ar)  $G = 0,4 \cdot 10^{-4}$  кг/с (1,36 л/мин): 1 —  $T = 10$ ; 2 — 12; 3 — 14; 4 — 16; 5 — 18 кК

плазменной дуги оказывается немного ниже, чем для свободногорящей (при сохранении тенденции к слабому возрастанию осевого значения с ростом  $G$ , показанному на рис. 3, б), что свидетельству-

ет об ослаблении эффекта сжатия столба дуги при соответствующем увеличении тока и диаметра плазмформирующего канала.

Более ярко отмеченная особенность проявляется в расчетных распределениях плотности электрического тока в столбе дуги, приведенных на рис. 4, причем в обоих рассматриваемых случаях плотность тока в центре столба плазменной дуги оказывается меньше соответствующих значений для свободногорящей (см. рис. 4). Важным обстоятельством при этом является изменение характера радиального распределения величины  $|j_z|$  для сжатой дуги по сравнению со свободногорящей, а именно, появление «плато» в соответствующих распределениях вблизи оси столба (см. сплошные кривые на рис. 4).

На рис. 5 представлены радиальные распределения аксиальной компоненты скорости дуговой плазмы в среднем сечении столба сжатой и свободногорящей дуги ( $z = 1,5$  мм). Как следует из приведенных на этом рисунке расчетных данных, скорость плазмы в столбе сжатой дуги значительно превышает скорость дуговой плазмы

$T, \text{кК}$

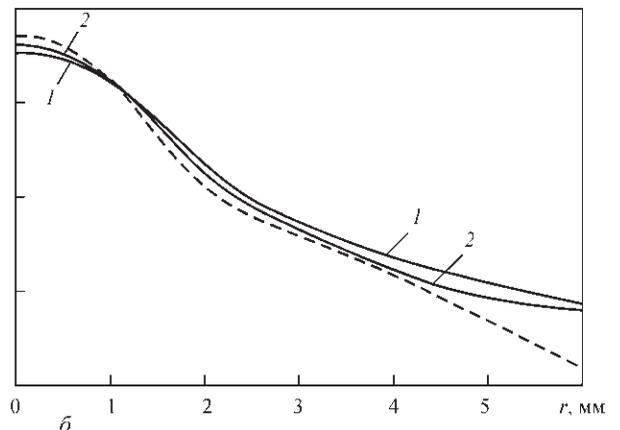
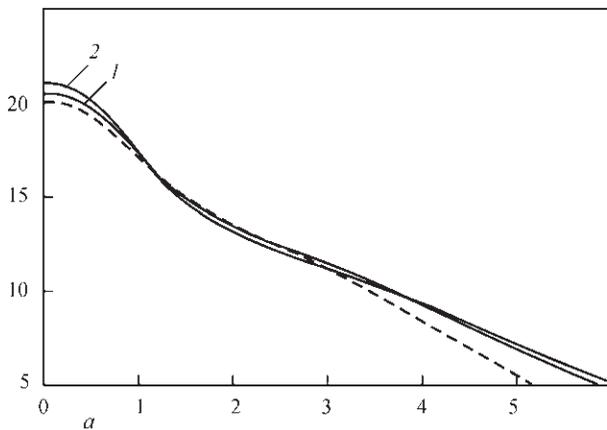


Рис. 3. Радиальные распределения температуры плазмы в сечении  $z = 1,5$  мм столба плазменной дуги: а —  $I = 100$  А;  $d = 2$  мм; 1 —  $G = 0,1 \cdot 10^{-4}$  кг/с (0,34 л/мин), 2 —  $G = 0,2 \cdot 10^{-4}$  кг/с (0,68 л/мин); б —  $I = 200$  А;  $d = 4$  мм; 1 —  $G = 0,4 \cdot 10^{-4}$  кг/с (1,36 л/мин), 2 —  $G = 0,75 \cdot 10^{-4}$  кг/с (2,55 л/мин) (штриховые кривые — соответствующие распределения для свободногорящей дуги)

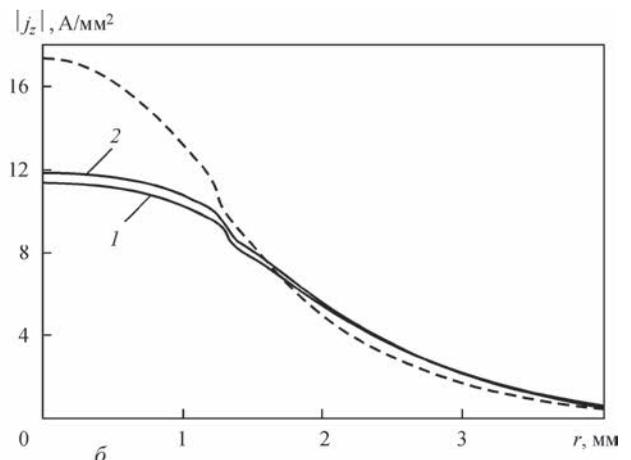
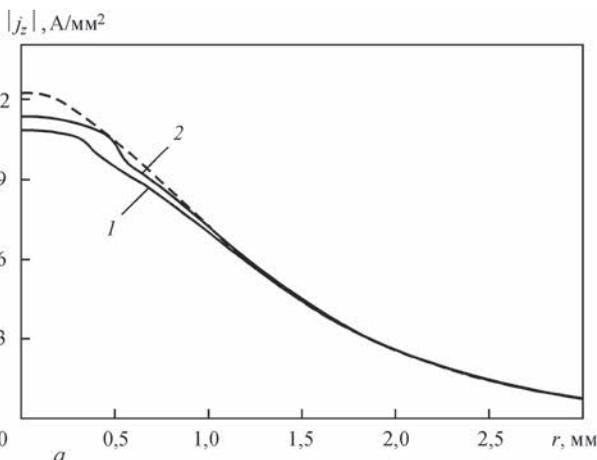


Рис. 4. Радиальные распределения аксиальной компоненты плотности электрического тока в сечении  $z = 1,5$  мм столба плазменной и свободногорящей дуги (параметры и обозначения те же, что и на рис. 3)

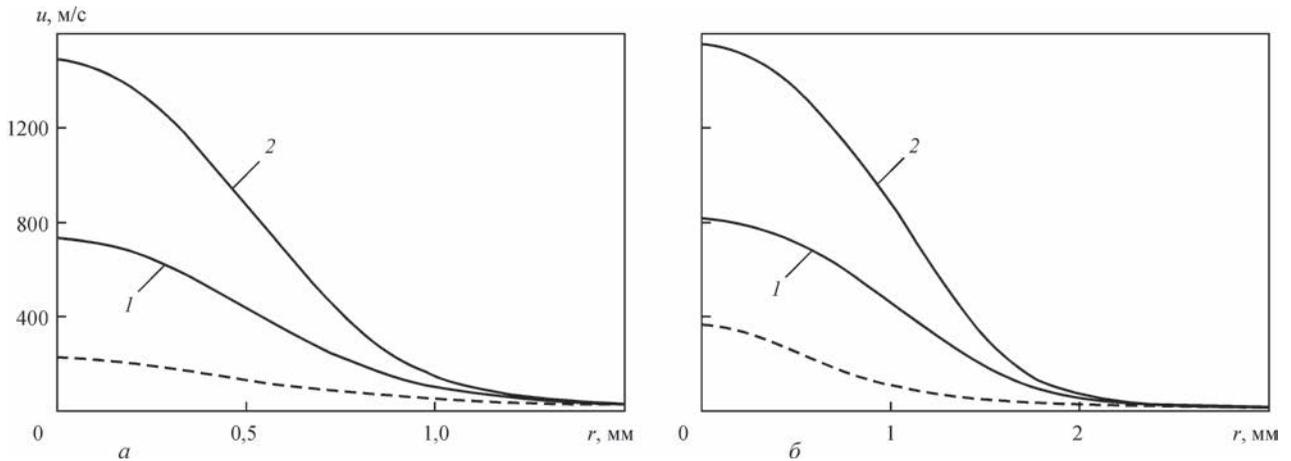


Рис. 5. Радиальные распределения аксиальной компоненты скорости плазмы в сечении  $z = 1,5$  мм столба плазменной и свободногорящей дуги (параметры и обозначения те же, что и на рис. 3)

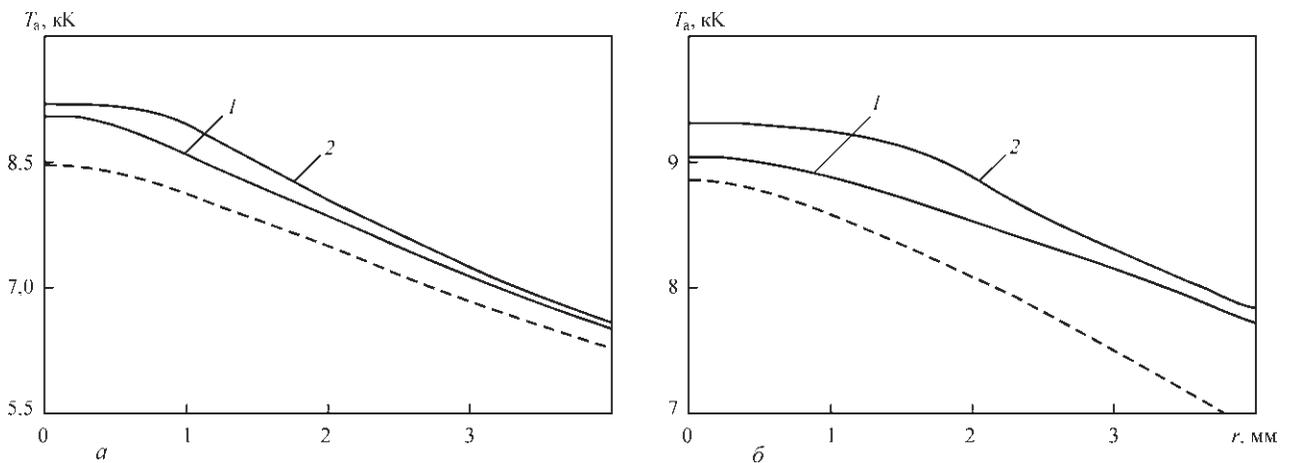


Рис. 6. Радиальные распределения температуры плазмы на границе анодного слоя плазменной дуги: *a* —  $I = 100$  А;  $d = 2$  мм;  $I$  —  $G = 0,1 \cdot 10^{-4}$  кг/с (0,34 л/мин),  $2$  —  $G = 0,2 \cdot 10^{-4}$  кг/с (0,68 л/мин); *б* —  $I = 200$  А;  $d = 4$  мм;  $I$  —  $G = 0,4 \cdot 10^{-4}$  кг/с (1,36 л/мин),  $2$  —  $G = 0,75 \cdot 10^{-4}$  кг/с (2,55 л/мин) (штриховые кривые – соответствующие распределения для свободногорящей дуги)

для свободногорящей дуги, несколько повышаясь с увеличением тока плазменной дуги и диаметра плазмоформирующего канала (ср. соответствующие сплошные кривые на рис. 5), и существенно (почти пропорционально) возрастая при увеличении расхода плазмообразующего газа (ср. кривые 1, 2 на рис. 5).

Прежде чем перейти к анализу характеристик прианодной плазмы необходимо отметить, что одной из причин описанных выше особенностей поведения радиальных распределений температуры плазмы и плотности электрического тока в столбе сжатой дуги при увеличении тока и диаметра плазмоформирующего канала по отношению к соответствующим распределениям для свободногорящей дуги может быть выбор граничных условий для температуры и скорости плазмы на срезе канала сопла плазматрона в виде (9), (10). Так, при малых значениях диаметра канала использование предположения об одномерности течения дуговой плазмы на выходе канала и, соответственно, использование условий (9), (10) представляется достаточно обоснованным, тогда как при уве-

личении  $R_p$  более корректные результаты могут быть получены путем решения исходных уравнений во всей области, включая область дуговой плазмы внутри канала сопла плазматрона (см. рис. 1, *a*), что предполагается сделать на следующем этапе исследований.

На рис. 6, 8 приведены расчетные распределения характеристик дуговой плазмы на границе анодного слоя со столбом дуги, а на рис. 7, 9, 10 — распределенные характеристики ее электрического, теплового и динамического воздействия на поверхность анода. В отличие от радиальных распределений температуры плазмы в столбе дуги (см. рис. 3), температура дуговой плазмы вблизи анода сжатой дуги оказывается заметно выше температуры прианодной плазмы для свободногорящей дуги, увеличиваясь с ростом расхода плазмообразующего газа, при этом профиль  $T_a(r)$  с возрастанием  $G$  становится более «наполненным» (см. рис. 6). Это связано с более эффективным переносом тепловой энергии в сторону анода высокоскоростным потоком плазмы сжатой дуги по сравнению с относительно слабым конвективным

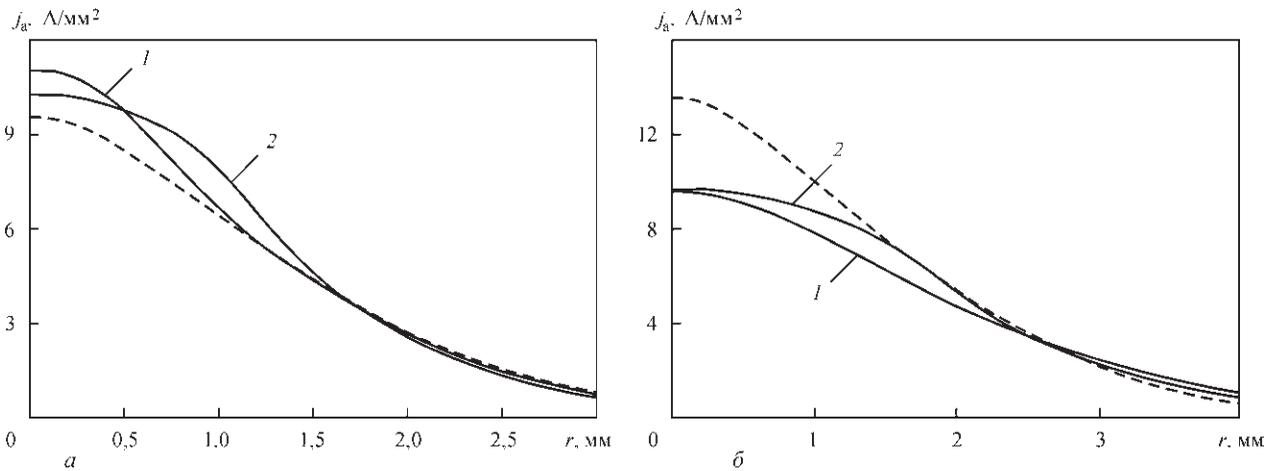


Рис. 7. Радиальные распределения плотности электрического тока на аноде плазменной и свободногорящей дуги (параметры и обозначения те же, что и на рис. 6)

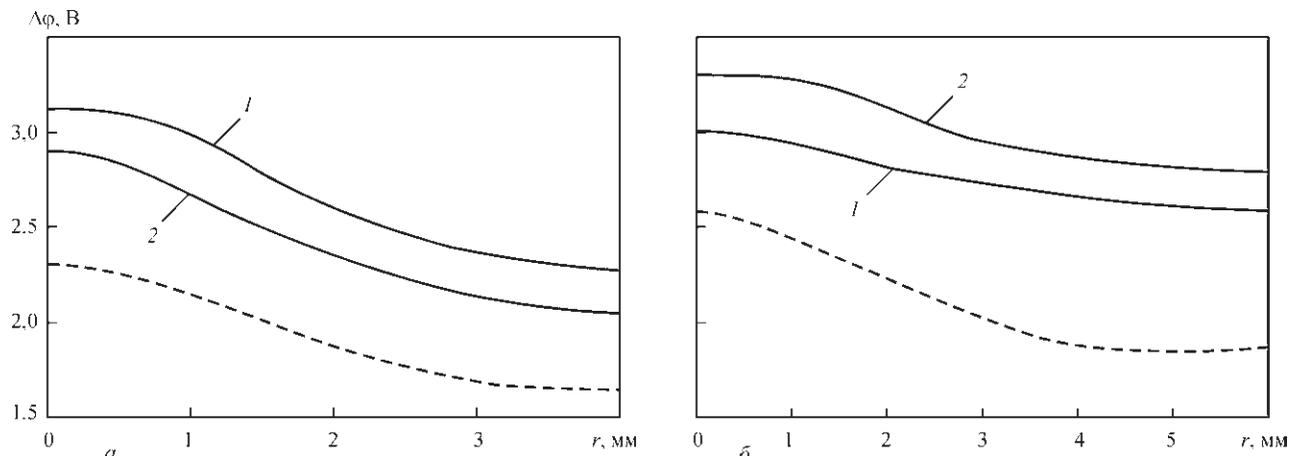


Рис. 8. Радиальные распределения потенциала плазмы на границе анодного слоя плазменной и свободногорящей дуги (потенциал поверхности анода принят постоянным и равным нулю, параметры и обозначения те же, что и на рис. 6)

переносом тепловой энергии в случае свободногорящей дуги (см. рис. 5).

Распределения  $j_a(r)$ , представленные на рис. 7, свидетельствуют о более высокой степени контрагирования анодной области 100-амперной плазменной дуги по сравнению со свободногорящей, тогда как при  $I = 200$  А наблюдается обратная картина (ср. рис. 7). Кроме того, аналогично радиальным распределениям температуры прианодной плазмы, профили распределения плотности электрического тока на аноде плазменной дуги с ростом расхода плазмообразующего газа становятся более «наполненными» за счет некоторого снижения плотности тока на оси (ср. кривые 1, 2 на рис. 7). Причиной этого являются не только отмеченные выше особенности поведения распределений  $T_a(r)$  для сжатой дуги (см. рис. 6), но и перестройка радиальных распределений потенциала плазмы на границе столба с анодным слоем плазменной дуги по сравнению со свободногорящей (рис. 8). Как показано в работе [13], это приводит к изменению радиальной компоненты напряженности электрического поля  $E_r = -(d\phi/dr)$ , в рассматриваемом случае — к ее уменьшению в

приосевой зоне анодной области (см. рис. 8), и, как следствие, вектора плотности электрического тока в прианодной дуговой плазме, определяющего картину протекания тока между плазмой и поверхностью анода.

На рис. 9 приведены радиальные распределения теплового потока, вводимого дугой в анод. В случае 100-амперной плазменной дуги ( $d = 2$  мм) величина  $q_a$  существенно превышает соответствующие значения для свободногорящей дуги, причем с ростом расхода плазмообразующего газа наблюдается непропорциональное по радиальной координате увеличение плотности теплового потока, приводящее к тому, что его профиль становится более наполненным (см. рис. 9, а). При  $I = 200$  А ( $d = 4$  мм) осевое значение теплового потока, вводимого в анод сжатой дугой, может быть как меньше величины  $q_a(0)$  для свободногорящей дуги (при малом расходе плазмообразующего газа), так и превышать его (при увеличении  $G$ ), как показано на рис. 9, б. Что касается интегральных значений мощности, вкладываемой дугой в анод  $Q_a = 2\pi \int_0^{\infty} q_a r dr$ , то во всех рассматриваемых

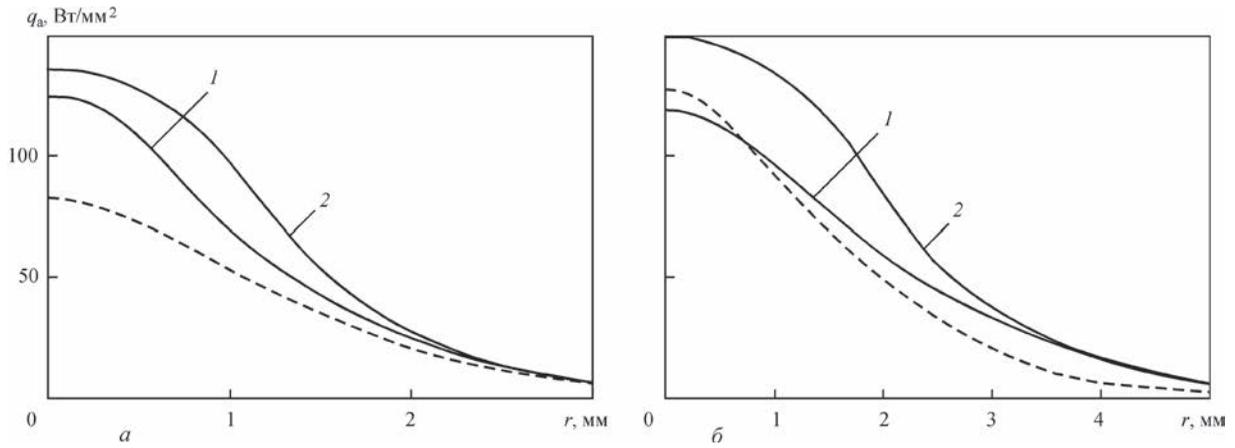


Рис. 9. Радиальные распределения теплового потока в анод для плазменной и свободногорящей дуги (параметры и обозначения те же, что и на рис. 6)

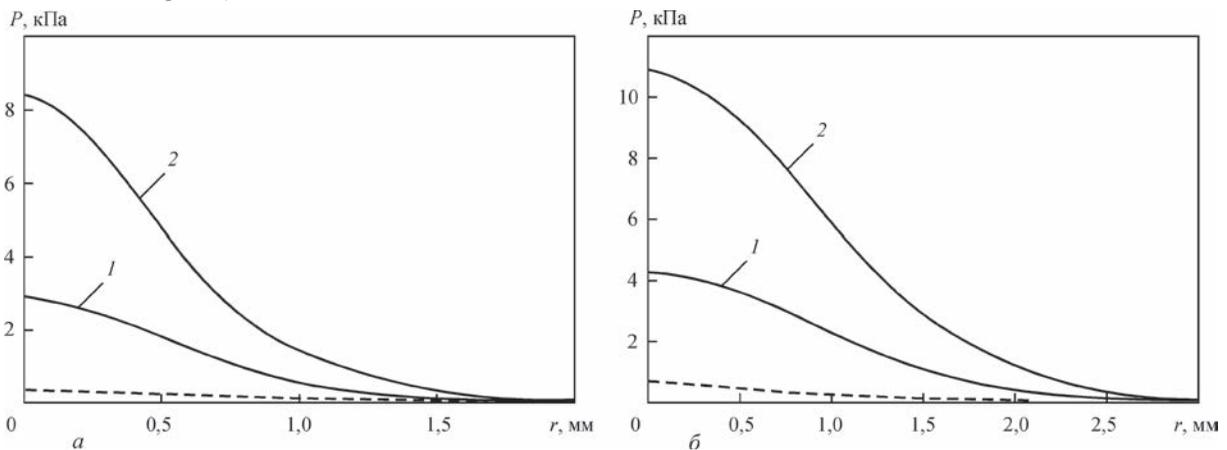


Рис. 10. Радиальные распределения газодинамического давления потока плазмы на поверхность анода для плазменной и свободногорящей дуги (параметры и обозначения те же, что и на рис. 6)

**Мощность  $Q_a$ , вкладываемая в анод сжатой (плазменной) и свободногорящей аргоновой дугой**

Тип дуги	$I = 100 \text{ A}$ ( $d = 2 \text{ мм}$ )	$I = 200 \text{ A}$ ( $d = 4 \text{ мм}$ )
Свободногорящая	789 Вт	1724 Вт
Сжатая (плазменная)	999 Вт ( $G = 0,34 \text{ л/мин}$ )	2518 Вт ( $G = 1,36 \text{ л/мин}$ )
	1187 Вт ( $G = 0,68 \text{ л/мин}$ )	3139 Вт ( $G = 2,55 \text{ л/мин}$ )

случаях эта величина для плазменной дуги оказывается существенно выше, чем для свободногорящей и возрастает с ростом расхода плазмообразующего газа, как следует из расчетных данных, представленных в таблице. Основной причиной этого является интенсивный перенос тепловой энергии из высокотемпературной области столба сжатой дуги в сторону анода, осуществляемый более высокоскоростным потоком дуговой плазмы, чем в случае свободногорящей дуги (см. рис. 5).

Еще одной важной характеристикой воздействия дуги на поверхность анода является газодинамическое давление  $P$  потока дуговой плазмы на указанную поверхность. Расчетные распределения величины  $P$  вдоль анодной поверхности приведены на рис. 10. Как следует из представленных на этом рисунке расчетных данных, газодинами-

ческое давление на поверхность анода плазмы сжатой дуги существенно превышает соответствующие значения для свободногорящей дуги, увеличиваясь с ростом тока плазменной дуги и диаметра канала сопла плазмотрона (ср. соответствующие сплошные кривые на рис. 10, а, б), и существенно возрастая при увеличении расхода плазмообразующего газа (ср. кривые 1 и 2 на рис. 10, а, 10, б).

В целом, результаты моделирования, представленные в таблице и на рис. 7, 9, 10, позволяют сделать вывод о том, что изменение расхода плазмообразующего газа при плазменной сварке является эффективным способом воздействия не только на величину и распределение газодинамического давления плазмы сжатой дуги на поверхность сварочной ванны, но и на соответствующие характеристики ее теплового и электромагнитного воздействия на свариваемый металл.

1. Низкотемпературная плазма / В. С. Энгельшт, В. Ц. Гурович, Г. А. Десятков [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1990. – Т. 1. Теория столба электрической дуги. – 376 с.
2. A two-dimensional nonequilibrium model of cascaded arc plasma flows / J. J. Beulens, D. Milojevic, D. C. Schram [et al.] // Phys. Fluids B. – 1991. – 3, № 9. – P. 2548–2557.
3. Dowden J. Plasma arc welding: a mathematical model of the arc / J. Dowden, P. Kapadia // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1994. – 27, № 5. – P. 902–910.

4. TIG and plasma arc modelling: a survey / J. Wendelstorf, I. Decker, H. Wohlfahrt [et al.] // *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 3*. – London: The Institute of Materials, 1996. – P. 848–897.
5. Jenista J. Numerical model of the anode region of high-current electric arcs / J. Jenista, J. V. R. Heberlein, E. Pfender // *IEEE Trans. on Plasma Science*. – 1997. – 25, No 5. – P. 883–890.
6. Schnick M. Numerical investigations of the influence of design parameters, gas composition and electric current in Plasma Arc Welding (PAW) / M. Schnick, U. Füssel, A. Spille-Kohoff // *Welding in the World*. – 2010. – 54, Is. 3. – P. 87–96.
7. Кривцун И. В. Модель процессов тепло-, массо- и электропереноса в анодной области и столбе сварочной дуги с тугоплавким катодом / И. В. Кривцун, В. Ф. Демченко, И. В. Крикент // *Автоматическая сварка*. – 2010. – № 6. – С. 3–11.
8. Крикент И. В. Моделирование процессов тепло-, массо- и электропереноса в столбе и анодной области дуги с тугоплавким катодом / И. В. Крикент, И. В. Кривцун, В. Ф. Демченко // *Автоматическая сварка*. – 2012. – № 3. – С. 7–11.
9. Investigation of cathode spot behaviour of atmospheric argon arcs by mathematical modeling / J. Wendelstorf, G. Simon, I. Decker [et al.] // *Proc. of the 12th Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications*. Germany, Greifswald, 1997. – Vol. 1. – P. 62–65.
10. Boulos M. I. *Thermal plasmas: Fundamentals and applications* / M. I. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender. – New York and London: Plenum Press, 1997. – Vol. 1. – 454 p.
11. Ляшко И. И. Вариант метода расщепления уравнений динамики вязкой несжимаемой жидкости на лагранжево-эйлеровых сетках / И. И. Ляшко, В. Ф. Демченко, С. А. Вакуленко // *Доклады АН УССР. Серия А*. – 1981. – № 7. – С. 43–47.
12. Демченко В. Ф. Лагранжево-эйлеровый метод численного решения многомерных задач конвективной диффузии / В. Ф. Демченко, А. Б. Лесной // *Доповіди НАНУ*. – 2000. – № 11. – С. 71–75.
13. Взаимодействие пучка излучения CO<sub>2</sub>-лазера с плазмой электрической дуги при гибридной (лазер+ТИГ) сварке / И. В. Кривцун, И. В. Крикент, В. Ф. Демченко [и др.] // *Автоматическая сварка*. – 2015. – № 3-4. – С. 7–16.

Поступила в редакцию 04.10.2016



## СВАРКА И РЕЗКА-2017

17-я Международная специализированная выставка  
«Оборудование, материалы, технологические процессы  
для сварочного производства, приборы контроля»

04.04.2017–07.04.2017

ЗАО «МинскЭкспо», г. Минск, Беларусь

Тематика:

- Материалы для сварки, наплавки и пайки
- Оборудование и технологии сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки
- Источники питания и системы управления сварочным оборудованием
- Оборудование для орбитальной сварки и обработки труб
- Электронно-лучевая, лазерная, плазменная сварка и резка
- Автоматизированные комплексные системы и агрегаты для сварки и резки
- Автоматизация сварочных производственных и технологических процессов, программное обеспечение
- Приборы для неразрушающего контроля сварных соединений
- Научное и информационное обеспечение сварки
- Система подготовки, переподготовки и аттестации сварщиков
- Охрана труда и экологическая безопасность в сварочном производстве
- Сертификация сварочного оборудования

Выставка проводится одновременно с международными специализированными выставками «Металлообработка» и «Порошковая металлургия».

Руководитель проекта: Федорова Елена Владимировна

Тел.: +375-17-226-98-58, 226-90-83

Факс: +375-17-226-98-58, 226-99-36

# СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПРОПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ДВУХФАЗНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА С ДИСПЕРСИОННЫМ УПРОЧНЕНИЕМ ПРИ АДС

Г. М. ГРИГОРЕНКО, С. В. АХОНИН, О. М. ЗАДОРОЖНЮК, И. Н. КЛОЧКОВ

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

Дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде аргона остается наиболее распространенным, относительно простым и универсальным способом изготовления конструкций из титановых сплавов. Сварку можно осуществлять в различных пространственных положениях и достаточно быстро перенастраивать оборудование при изменении типа соединения и толщины свариваемого металла. Целью данной работы являлось изучение и сравнение структуры и механических свойств проплавленного металла высокопрочных титановых сплавов с дисперсионным упрочнением и без, выполненных аргонодуговым способом. Показано, что в сравнении с титановым сплавом ВТ23, у опытного дисперсионно-упрочненного сплава показатели прочности проплавленного металла выше, но пластичность и ударная вязкость крайне низкие, поэтому для него этот вид сварки и термообработки не рекомендуются. Библиогр. 11, табл.6, рис.16.

*Ключевые слова:* аргонодуговая сварка, ТИГ, структура, дисперсионное упрочнение, силициды титана, механические свойства, термообработка

Конструкционные высокопрочные сплавы на основе титана благодаря своим уникальным характеристикам, таким как высокая удельная прочность при сохранении удовлетворительной пластичности и высокая коррозионная стойкость, нашли широкое применение в самолето- и ракетостроении, а также в производстве газотурбинных двигателей. Так, например, в конструкции планеров современных пассажирских самолетов сложнoleгированные титановые сплавы по массе составляют около 15 %, а в военных самолетах — до 40 %. Дальнейшее развитие авиационной и ракетной техники требует существенного повышения эксплуатационных характеристик титановых сплавов. Одним из путей повышения предела прочности таких сплавов является дисперсионное упрочнение металла за счет выделения дисперсных частиц из твердого раствора [1–5].

Дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде аргона до сих пор остается наиболее распространенным, относительно простым и универсальным способом изготовления конструкций из титановых сплавов [6].

Помимо экспериментального ( $\alpha+\beta$ )-сплава (близкого по составу к известному Ti-1008) [7] (табл. 1), были исследованы структура, фазовый состав и механические свойства соединений про-

мышленного высокопрочного сплава ВТ23, выполненного аргонодуговой сваркой. Это средне-легированный ( $\alpha+\beta$ )-сплав мартенситного класса, который после закалки из  $\beta$ -фазы переходит в  $\alpha$ -мартенситную форму. Этот сплав отличается от других повышенной технологической пластичностью, что позволяет в процессе изготовления деталей использовать прокатку, вальцовку, вытяжку, ковку, штамповку, отбортовку и др. операции, связанные с обработкой давлением [8].

При увеличении степени легирования сплавов повышается их чувствительность к термическому циклу сварки и опасность хрупкого разрушения сварных соединений из-за пониженной пластичности. Двухфазные ( $\alpha+\beta$ )-сплавы титана значительно повышают прочностные характеристики после старения и закалки. Однако высокую прочность этих сплавов, за редким исключением, не удается реализовать в сварных конструкциях, что обусловлено трудностями, возникающими в процессе закалки и старения конструкций, и главным образом пониженной пластичностью сварных соединений в термически упрочненном состоянии [9].

Целью данного исследования являлось изучение влияния ТИГ-метода сварки на свариваемость титановых сплавов с дисперсионным упрочнением. Результаты исследования структуры, фазового состава

**Таблица 1.** Химический состав исследуемых сплавов, мас. %

Сплав	Тип сплава	Al	Sn	Zr	Nb	Mo	V	Cr	Fe	Si
№ 6	( $\alpha + \beta$ )	4,29	4,39	5,95	4,26	1,57	0,68	0,00	0,00	0,35
ВТ23	( $\alpha + \beta$ )	4,55	0,00	<0,35	<0,15	2,05	4,50	1,2	0,60	<0,15

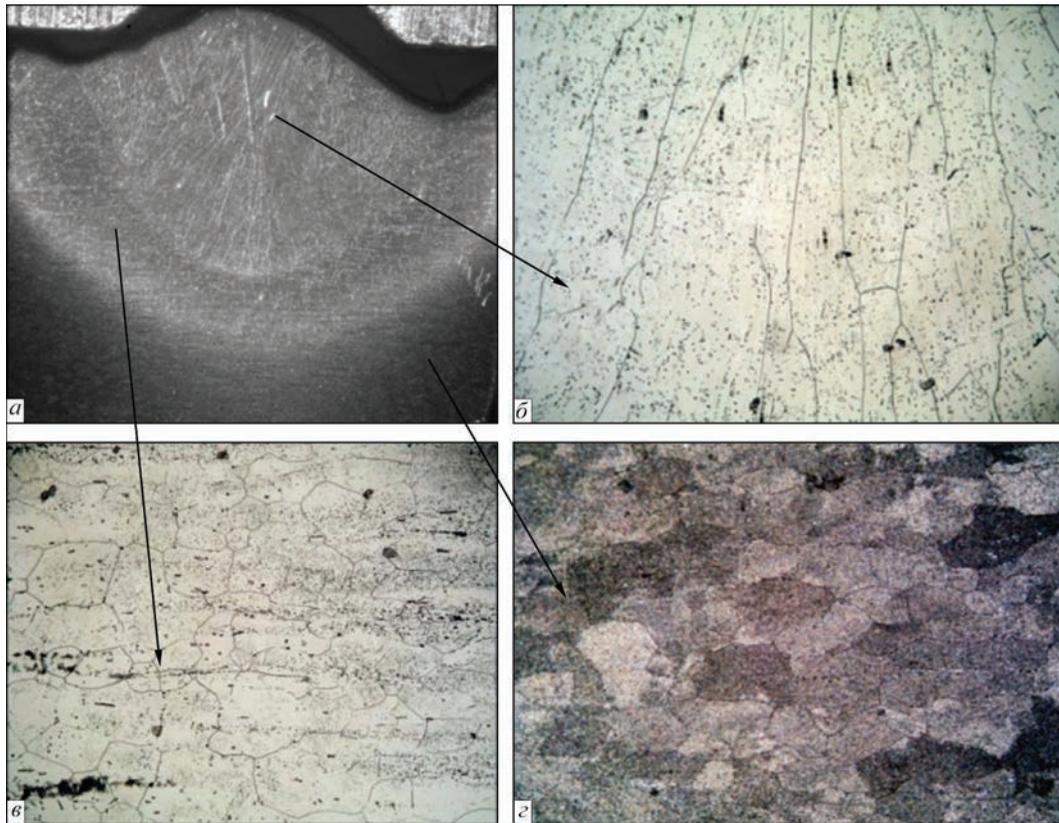


Рис. 1. Различные участки сплава № 6 с проплавленным металлом,  $\times 10$  (а); микроструктура проплавленного металла,  $\times 100$  (б); микроструктура металла ЗТВ,  $\times 100$  (в); микроструктура основного металла,  $\times 100$  (з)

и механических свойств основного металла опытного сплава подробно описаны в работе [7].

Сварочный нагрев выполнялся вольфрамовым неплавящимся электродом (присадочная проволока отсутствует) без сквозного проплавления металла. Ток сварки составлял 350 А, скорость сварки 10 м/ч, напряжение дуги 12 В.

Химический состав исследуемых сплавов приведен в табл. 1.

Микроструктура проплавленного металла экспериментального сплава № 6 представляет собой крупные вытянутые зерна по нормали к линии сплавления (рис. 1). Структура и фазовый состав определяются термическим циклом аргонодуговой сварки (рис. 2).

Микротвердость проплавленного металла составила 3680 МПа, в то время, как в металле ЗТВ она снизилась до 3430 МПа, и затем к основному металлу ее значение возросло до 4010 МПа. При исследованиях на СЭМ установки JAMP 9500F было обнаружено, что в шве дисперсные частицы сложных силицидов, которые были обнаружены в основном металле опытного сплава [7], в процессе проплавления металла практически полностью растворились, вследствие чего не было возможности их идентифицировать. Найдено некоторое количество наночастиц алюмосилицидов титана, расположенных по границам зерен (рис. 3, а). Это объясняет понижение микротвердости в про-

плавленном металле по сравнению с основным металлом.

На участке сплавления проплавленного металла с основным металлом данного образца наблюдается чередование полос шириной порядка 150 мкм без частиц и полос шириной около 83 мкм со значительным количеством дисперсных частиц (рис. 3, б). В данной области происходят основные фазовые превращения (температурный интервал 890...1668 °С на рис. 2). Микротвердость этого участка у линии сплавления составляет 3730 МПа, что, по-видимому, связано с наличием упрочняющих частиц алюмосилицидов титана в месте измерения микротвердости.

В отличие от структуры проплавленного металла, в металле ЗТВ наблюдается значительное увеличение количества частиц. Размеры частиц сложных силицидов колеблются от 50 нм до 1 мкм. Они расположены преимущественно равномерно как по телу зерен, так и по границам. Форма зерен приближается к равновесной, образуя тройную границу в вершине их соприкосновения (рис. 4).

В основном металле наблюдается наиболее равномерное распределение частиц и максимальная микротвердость (до 4010 МПа). Эти частицы также расположены как по телу зерен, так и по границам. Размеры частиц варьируются в пределах 70...150 нм (рис. 5).

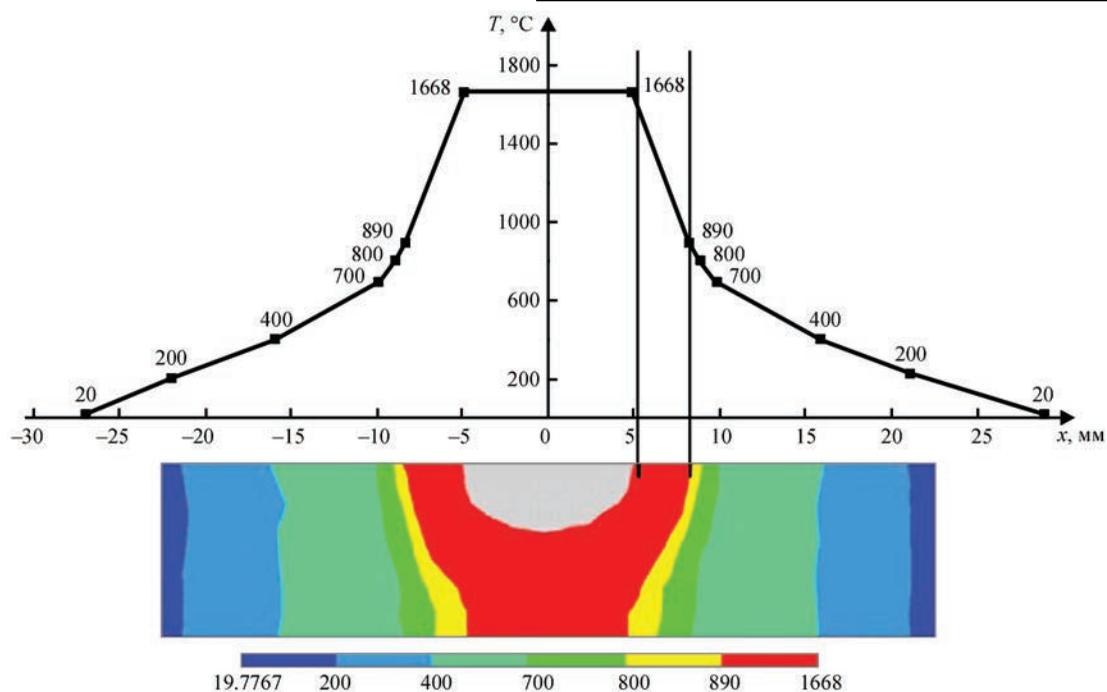


Рис. 2. Термический цикл аргонодуговой сварки  $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов

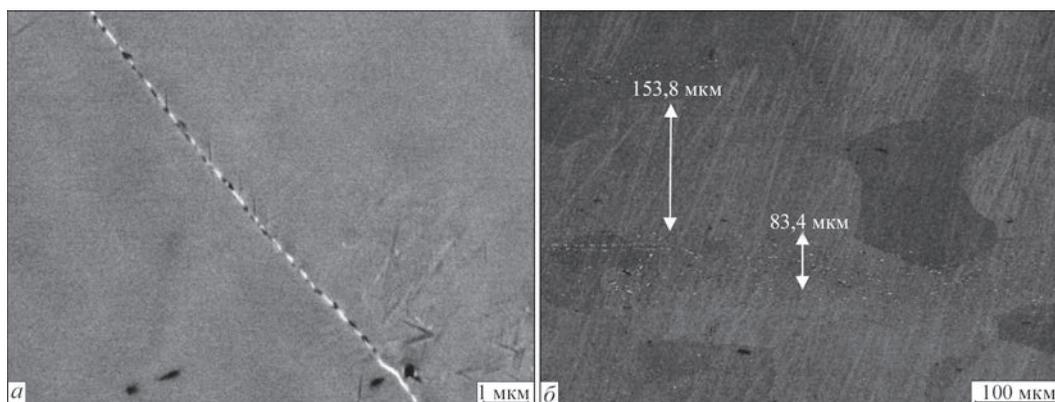


Рис. 3. Микроструктура проплавленного металла опытного сплава: *a* — граница зерен в участке проплавленного металла,  $\times 10000$ ; *b* — участок линии сплавления,  $\times 200$

С помощью программного обеспечения STIMAN была посчитана объемная доля частиц. Как было показано выше, в шве частицы практически отсутствуют. По линии сплавления их объемная доля составила 0,9 %. В металле ЗТВ их

размеры и количество возросло до 1,4 %, а в основном металле — 1,9 %.

Для качественного определения фазового состава был выбран участок, содержащий все структурные составляющие. Химический состав дис-

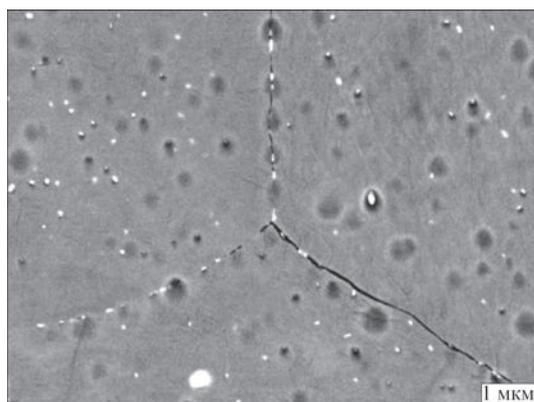


Рис. 4. Тройная граница зерен в металле ЗТВ опытного сплава,  $\times 5000$

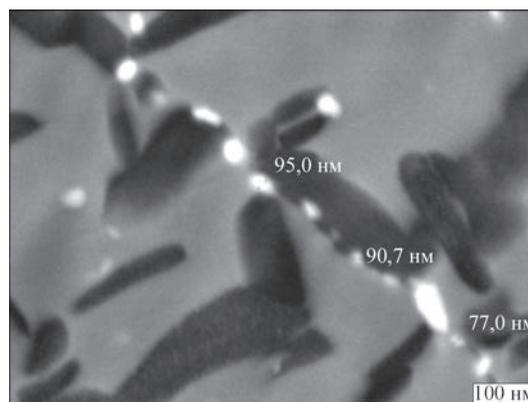


Рис. 5. Характер расположения частиц по границе зерен основного металла опытного сплава,  $\times 30000$

Таблица 2. Химический состав фазовых составляющих опытного сплава (мас. %)

Участок анализа (номер спектра)	Al	Si	Ti	V	Zr	Nb	Mo	Sn	Всего
1	4,24	5,36	38,70	0,00	27,24	4,61	2,50	4,28	100,00
2	3,71	1,98	51,78	0,86	15,11	6,31	8,32	4,00	100,00
3	2,97	0,31	58,05	5,19	7,34	9,53	13,17	2,17	100,00
4	9,40	0,18	67,15	0,67	6,73	4,07	1,33	7,42	100,00

персных упрочняющих частиц,  $\alpha$ -фазы и  $\beta$ -фазы сварного соединения опытного сплава приведен в табл. 2. Характеристические спектры собирались с участков анализа, отмеченных на рис. 6.

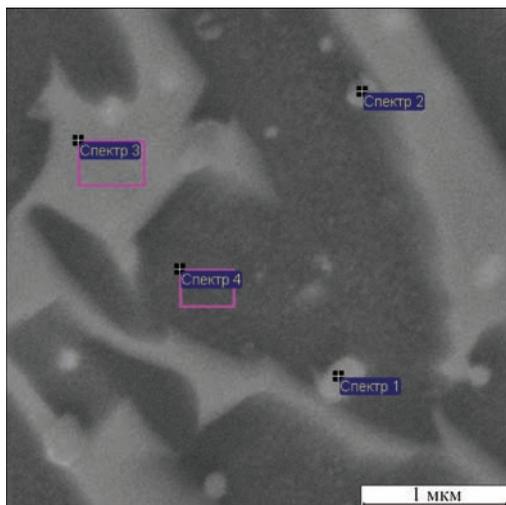


Рис. 6. Электронное изображение участков анализа для энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС),  $\times 20000$

Как показывают результаты микрорентгеновского анализа, анализ спектров 1 и 2 проводился в участках сложных силицидов (повышенное содержание кремния и циркония), спектра 3 — в участке  $\beta$ -фазы (повышенное содержание тяжелых элементов ниобия, молибдена и ванадия, которые отличаются светлой окраской на изображении СЭМ), а спектра 4, соответственно, в участке  $\alpha$ -фазы с повышенным содержанием алюминия.

После проведенных исследований структуры и фазового состава проплавленного металла опытного сплава выполнялась имитация послесварочной печной термической обработки (ТО). Режим нагрева: до температуры 1000 °С (1 ч), охлаждение до 600...650 °С (1 ч) с последующим охлаждением до комнатной температуры.

Микроструктура проплавленного металла опытного сплава после ТО представляет собой такие же крупные вытянутые зерна, как и до ТО, но в проплавленном металле обнаружена трещина (рис. 7).

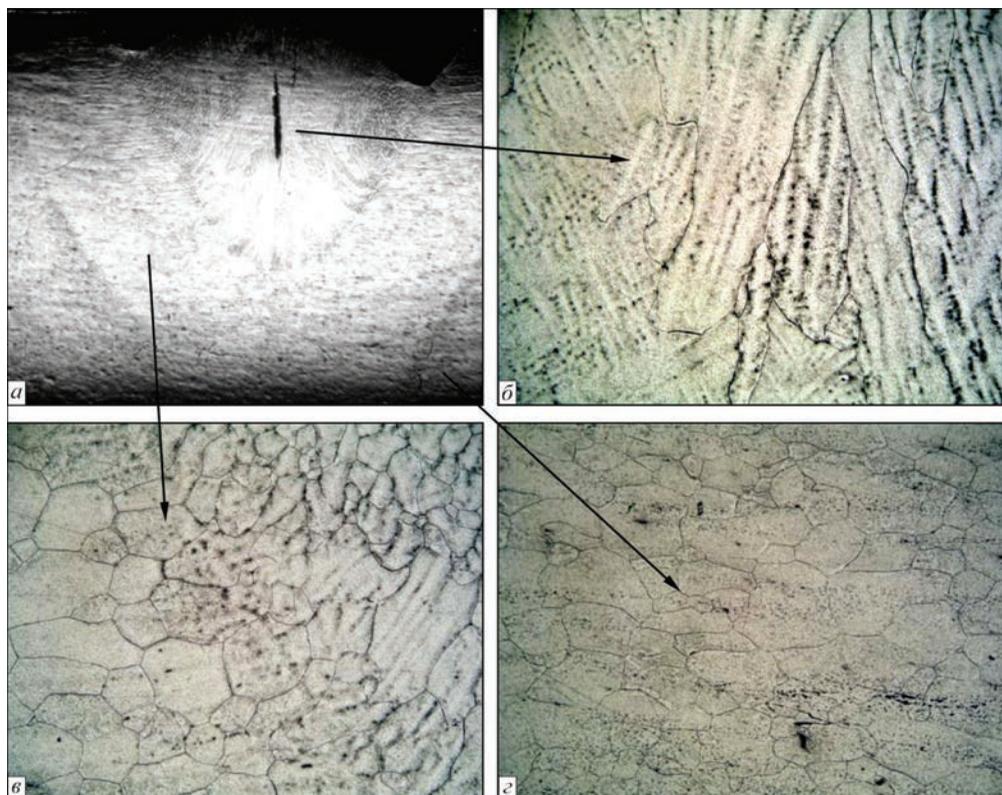


Рис. 7. Макроструктура проплавленного металла опытного сплава после ТО,  $\times 10$  (а); микроструктура участка проплавленного металла,  $\times 100$  (б); микроструктура металла ЗТВ,  $\times 100$  (в); микроструктура основного металла,  $\times 100$  (г)

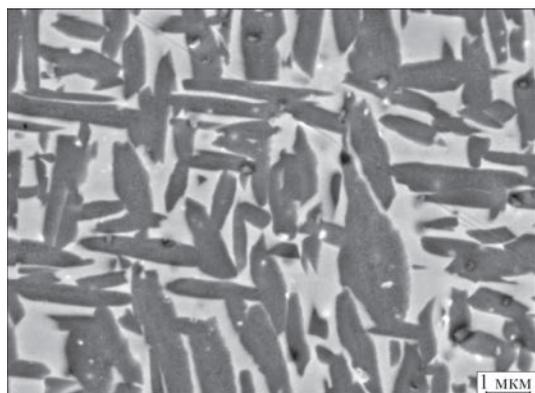


Рис. 8. Распределение дисперсных частиц сложных силицидов на поверхности шлифа опытного сплава после ТО,  $\times 10000$

Микротвердость проплавленного металла составляет 3860 МПа, в то время как в металле ЗТВ она снижается до значений 3600...3200 МПа, а в основном металле незначительно возрастает до

значения 3580 МПа. Таким образом, проплавленный металл после ТО характеризуется максимальной твердостью и прочностью, но при этом низкой пластичностью, что приводит к образованию трещины.

На участке проплавленного металла после термообработки обнаружено значительное количество равномерно расположенных упрочняющих дисперсных частиц разного размера (рис. 8), что обеспечивает повышенное значение микротвердости по сравнению с ЗТВ и основным металлом.

В ЗТВ частицы обнаружены в меньшем количестве и меньшего размера. В основном металле наблюдаются частицы более крупных размеров. Объемная доля частиц на участке проплавленного металла составляет 1,9 %, в ЗТВ — 1,7 %, а в основном металле 2,1 %. Это, возможно, свидетельствует о том, что большое количество частиц в проплавленном металле увеличиваются в разме-

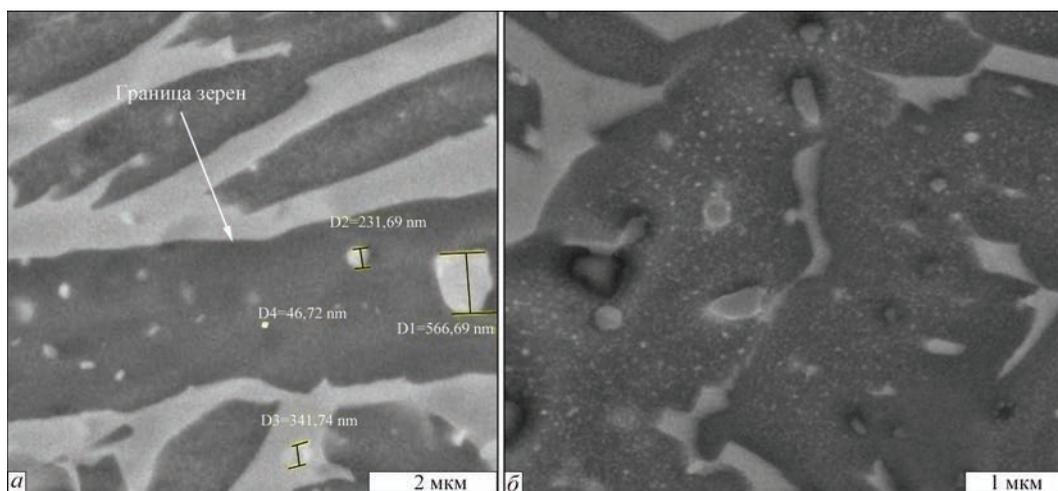


Рис. 9. Изображение в обратнорассеянных электронах границы зерен на участке проплавленного металла сплава № 6 после ТО: *a* — участок границы зерен с частицами,  $\times 7000$ ; *б* — коагулированные силициды по границе зерен,  $\times 20000$

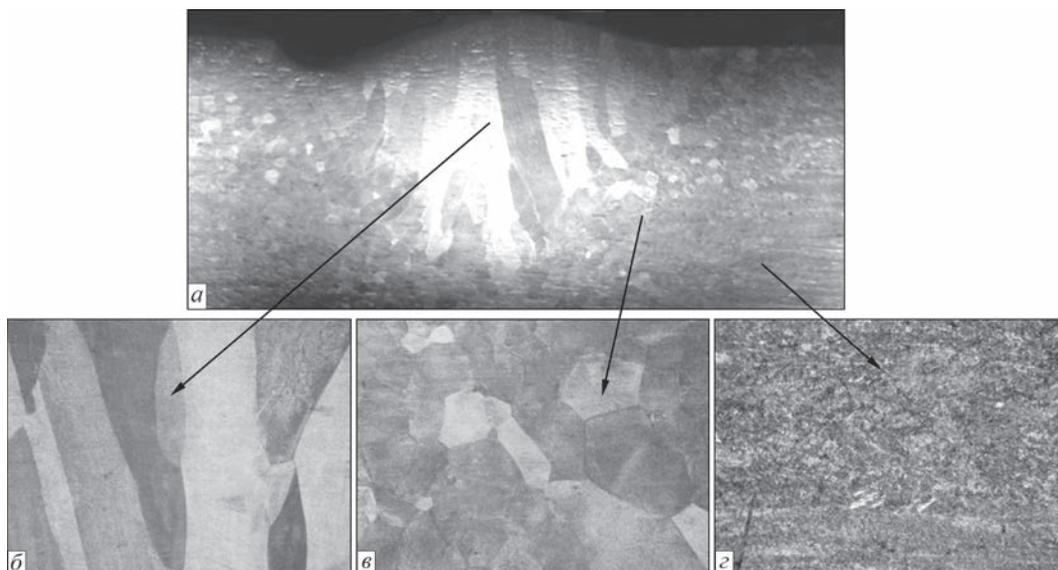


Рис. 10. Макроструктура проплавленного металла сплава ВТ23,  $\times 10$  (*a*); микроструктура в центре проплавленного металла,  $\times 50$  (*б*); микроструктура участка металла ЗТВ,  $\times 50$  (*в*); микроструктура основного металла,  $\times 100$  (*г*)

Таблица 3. Химический состав  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз проплавленного металла сплава ВТ23 (мас. %)

Участок анализа (номер спектра)	Al	Si	Ti	V	Cr	Fe	Mo	Всего
1	4,21	0,20	82,03	5,63	1,23	0,65	3,92	100,00
2	3,51	0,34	76,22	8,06	2,20	2,20	5,04	100,00

рах за счет высокой температуры в процессе ТО. В основном металле их объемная доля несколько выше вследствие укрупнения их размеров.

Исследования границ зерен и химического состава частиц опытного сплава после ТО проводились на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU с системой микроанализа OXFORD INSTRUMENTS INCA ENERGY+.

По границам зерен шва наблюдается значительное скопление упрочняющих частиц сферической формы. Их размеры варьируются в широких пределах — от 50 нм до 1 мкм (рис. 9, а). Также по границам обнаружены коагулированные силициды (рис. 9, б). Такие конгломераты по границам зерен вызывают большие внутренние напряжения, что возможно, является причиной образования трещины.

Результаты исследований проплавленного металла экспериментального двухфазного сплава сравнивали с результатами исследований промышленного сплава ВТ23.

Макроструктура проплавленного металла сплава ВТ23 практически не отличается от макроструктуры экспериментального сплава (рис. 10, а). Наблюдаются аналогичные вытянутые крупные зерна по нормали к линии сплавления (рис. 10, б). Микротвердость участка проплавленного металла составляет 3550...3560 МПа. При переходе в ЗТВ наблюдаются также участки крупного зерна, но уже более равноосного типа (рис. 10, в). Микротвердость в металле ЗТВ повышается до значений 3750...3950 МПа. В основном металле сварного соединения сплава ВТ23 наблюдаются

двухфазная структура (рис. 10, з) со значением микротвердости порядка 3200 МПа. Такое распределение микротвердости связано с тем, что в проплавленном металле и металле ЗТВ образуется метастабильная  $\alpha''$ -фаза мартенситного типа, которая отличается высокой твердостью. Помимо этого, в проплавленном металле имеет место выделение  $\alpha_n$ -фазы (низкотемпературной модификации  $\alpha$ -фазы), которая более пластична [10].

Исследования структуры проплавленного металла промышленно освоенного сплава ВТ23, проведенные на СЭМ TESCAN MIRA 3 LMU, показали, что и на участке проплавленного металла, и в ЗТВ, и в основном металле наблюдаются чистые границы зерен без охрупчивающих выделений, пор и микротрещин (рис. 11).

Также как и в случае опытного сплава был проведен анализ химического состава проплавленного металла сплава ВТ23 (табл. 3 по рис. 11).

Проплавленный металл титановых сплавов № 6 и ВТ23 после имитации аргонодуговой сварки подвергался испытаниям на растяжение и ударную вязкость. Результаты механических испытаний приведены в табл. 4.

Образец сплава № 6 при испытании на растяжение цилиндрических образцов разорвался в месте захвата. Это, возможно, связано с тем, что вся нагрузка пришлось на участок с микротрещинами. Вследствие этого была получена низкая, нехарактерная для данного сплава прочность. Поэтому были проведены дополнительные испытания на сжатие (на испытательной машине UTM-100 с максимальной нагрузкой 100 кН). Результаты механических испытаний на сжатие приведены в табл. 5.

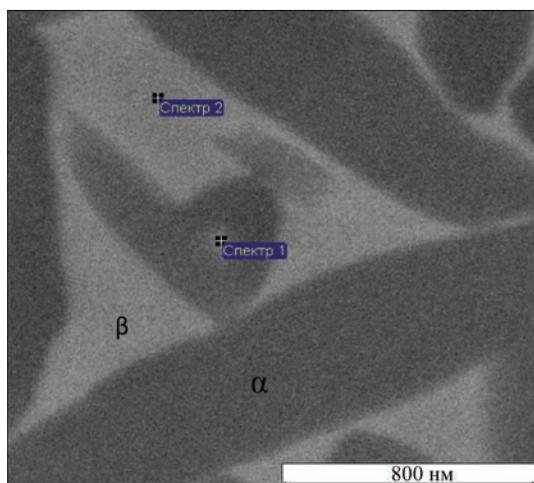


Рис. 11. Изображение в обратнорассеянных электронах микроструктуры границы зерен в шве сварного соединения ВТ23,  $\times 30000$

Таблица 4. Механические свойства основного металла и проплавленного сплавов № 6 и ВТ23

Сплав		$\sigma_{rp}$ МПа	$\sigma_{в\beta}$ МПа	$KCV$ , Дж/см <sup>2</sup>	$\delta$ , %
ВТ23	ОМ	1050	1200	42	5
	Проплавленный металл	1084	1128	29,6	1,3
№ 6	ОМ	1330	1420	4	1
	Проплавленный металл	-	560	< 1	< 1

Таблица 5. Механические свойства основного металла и проплавленного сплава №6 при испытании на сжатие

Сплав		$\sigma_{rp}$ МПа	$\sigma_{в\beta}$ МПа	$\psi$ , %
№ 6	ОМ	1220	1850	6
	Проплавленный металл	1315	1440	2,5

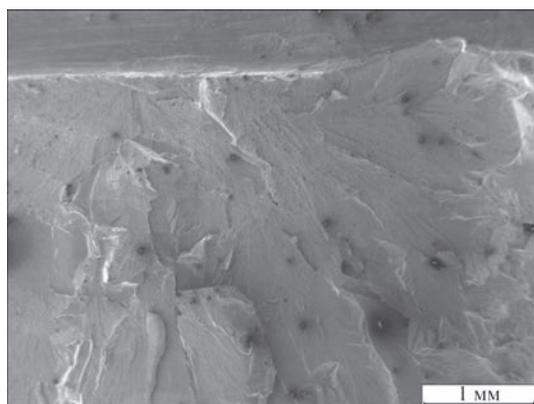


Рис. 12. Поверхность разрушения проплавленного металла опытного сплава,  $\times 25$

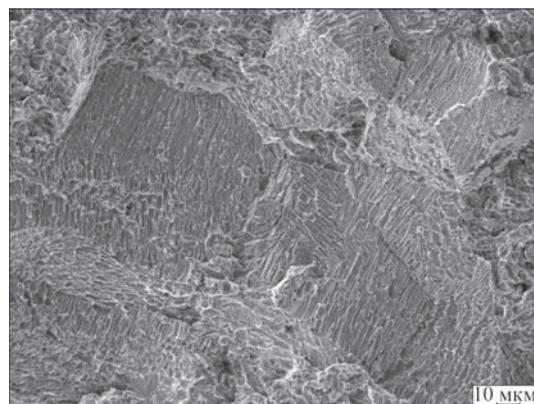


Рис. 14. Поверхность излома образца опытного сплава после ТО,  $\times 500$

Таблица 6. Химический состав структурных составляющих излома проплавленного металла сплава № 6 после ТО, мас. % (по рис. 15, а)

Участок анализа (номер спектра)	Al	Si	Ti	V	Zr	Nb	Mo	Sn	Всего
1	3,83	8,45	38,89	1,21	35,63	3,48	1,38	4,77	100,00
2	3,72	9,44	38,94	0,38	38,75	1,84	0,43	4,57	100,00
3	8,50	0,24	70,43	1,52	6,10	3,55	0,73	7,79	100,00

Таким образом, при испытании на сжатие получили предел прочности проплавленного металла, который составляет 80 % предела прочности основного металла ( $K_b = 0,8$ ), а предел текучести проплавленного металла даже превысил показатели основного металла.

Поверхность разрушения после испытаний на ударную вязкость образцов Шарпи в области проплавленного металла представляет собой локальный участок, образованный по механизму микроскопа (рис. 12). Его наличие свидетельствует о квазихрупком характере разрушения данного участка металла. При больших увеличениях видны микротрещины (рис. 13).

Как и в случае исследования шлифа, на поверхности излома не были обнаружены дисперсные частицы алюмосилицидов титана. Это подтверждает ранее высказанную мысль о том, что вследствие высокой температуры и длительности процесса аргонодуговой сварки эти частицы частично растворяются и мы не можем их идентифицировать. Это согласуется с возможностью об-

ратимого течения дисперсионного механизма [11]. Химический состав участка проплавленного металла соответствует составу матрицы, и частицы не обнаружены.

После проведения ТО проплавленного металла сплава № 6 также подвергался механическим испытаниям на ударную вязкость и растяжение. При небольших увеличениях видны скользящие участки с равноосной крупнозеренной структурой (рис. 14).

Если непосредственно после аргонодуговой имитации сварки были обнаружены только микротрещины при больших увеличениях, то тут отчетливо видны вторичные межзеренные трещины даже при увеличении 500 крат. Это указывает на высокую чувствительность данного сплава к нагреву в процессе ТО.

При больших увеличениях обнаружено значительное количество дисперсных упрочняющих частиц, а также микротрещин, которые идут как по границам, так и по телу зерен. В процессе ТО частицы увеличились в размерах до значений, кото-

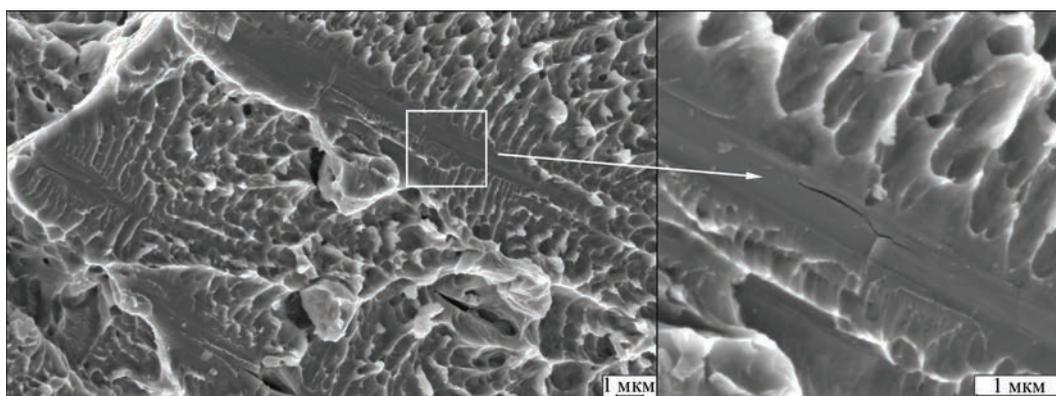


Рис. 13. Участок излома опытного сплава с микротрещинами,  $\times 5000$  ( $\times 20000$ )

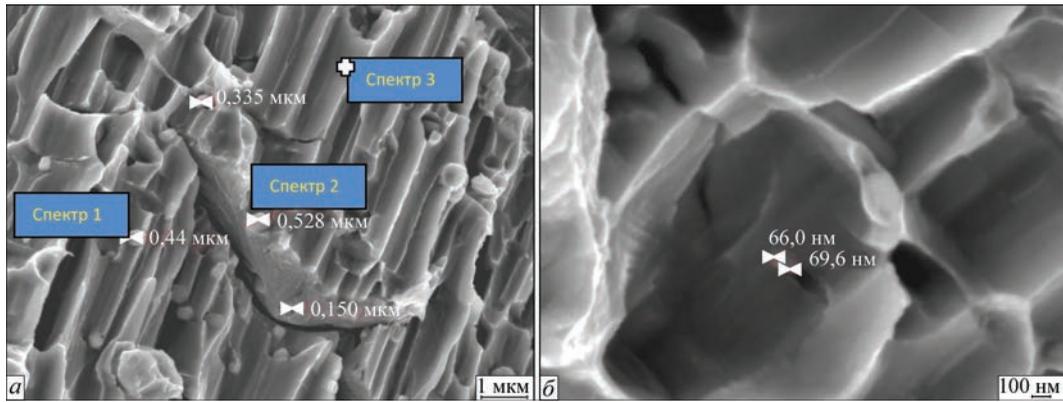


Рис. 15. Излом проплавленного металла опытного сплава после ТО: *a* — упрочняющие частицы и микротрещины,  $\times 10000$ ; *b* — наночастицы в ямке излома и наноразмерные трещины,  $\times 40000$

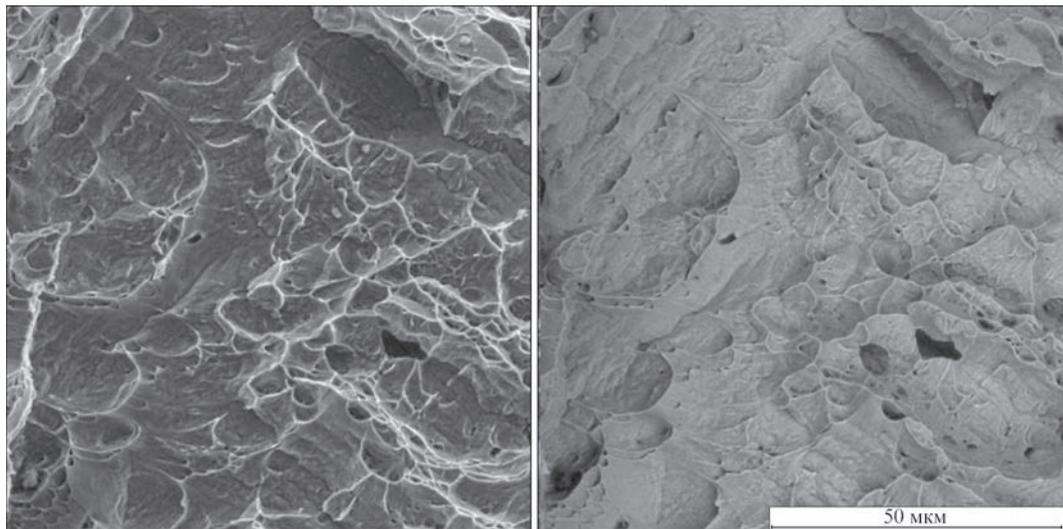


Рис. 16. Излом проплавленного металла сплава ВТ23: *a* — во вторичных электронах; *b* — в обратнорассеянных,  $\times 4000$

рые можно идентифицировать с помощью СЭМ. Они расположены в ямках излома, что указывает на более вязкий тип разрушения металла. Низкий уровень пластичности данного материала может быть связан с увеличением количества и протяженности микротрещин вследствие градиента температур при нагреве во время ТО. Обнаруженные частицы имеют разные размеры — от 1 мкм до 50 нм. Характер распределения частиц и химический анализ фазовых составляющих представлены на рис. 15 и в табл. 6 (по рис. 15, *a*).

Результаты химического анализа показывают, что все частицы, которые обнаружены на поверхности излома сплава после ТО — алюмосилициды титана. ТО способствует увеличению их размеров до 50 нм и выше.

После механических испытаний промышленного высокопрочного сплава ВТ23 также выполняли фрактографический анализ поверхности разрушения.

Поверхность излома менее хрупкая в сравнении с экспериментальным сплавом (рис. 16), что подтверждает более высокие показатели ударной вязкости и пластичности.

Таким образом, после изучения проплавленного металла экспериментального дисперсионно-упрочненного ( $\alpha+\beta$ )-титанового сплава и промышленного высокопрочного ( $\alpha+\beta$ )-титанового сплава ВТ23, выполненных ТИГ-методом, можно заключить следующее:

- непосредственно после имитации сварки дисперсные упрочняющие алюмосилициды титана на участке проплавленного металла частично растворяются вследствие длительного воздействия высокой температуры, т. е. после ТИГ проплавленный металл экспериментального сплава является не дисперсионно-упрочненным, а твердорастворным упрочнением. Помимо этого, при больших увеличениях наблюдаются микротрещины, обусловленные послесварочными напряжениями;

- после ТО происходит укрупнение упрочняющих частиц за счет коагуляционных процессов. Эти частицы обуславливают более вязкий излом по ямочному механизму отрыва. Микротрещины увеличиваются в размерах и в количестве и приводят к трещине по центру проплавленного металла.

Это происходит вследствие градиента температур при нагреве во время ТО;

– в сравнении с промышленным высокопрочным ( $\alpha+\beta$ )-титановым сплавом ВТ23, у опытного дисперсионно-упрочненного сплава показатели прочности выше, но пластичность и ударная вязкость крайне низкие, поэтому для него нельзя рекомендовать этот вид сварки и ТО.

1. Гольдштейн М. И. Специальные стали: учебник для вузов / М. И. Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
2. Ржевская С. В. Материаловедение: учебник / С. В. Ржевская. – [4-е изд.]. – М.: Логос, 2004. – 413 с.
3. Металлы и сплавы. Справочник: под ред. Ю. П. Солнцева; С.-Пб: НПО «Профессионал», 2003. – 1066 с.
4. Трефилов В. И. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов / В. И. Трефилов, 1987. – 248 с.
5. Повышение прочности или упрочнение материалов [Электронный ресурс] / А. А. Бочвар. – 2012. – Режим

доступа к статье: <http://do.gendocs.ru/docs/index-223261.html>

6. Замков В. Н. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / В. Н. Замков. – [2-е изд.]. – К.: Наукова думка, 1986. – 240 с.
7. Дисперсионно-упрочненные титановые сплавы системы Ti-Si-X / Г. М. Григоренко, С. В. Ахонин, Т. Г. Таранова [и др.] // Современная электрометаллургия. – 2012. – № 1. – С. 45–53.
8. НПО «Титан». Справка. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к справочнику: <http://www.npctitan.ru/spravka/alloys/23/>.
9. Глазунов С. Г. Конструкционные титановые сплавы / С. Г. Глазунов, В. Н. Моисеев. – М.: Металлургия, 1974. – 368 с.
10. Математическое моделирование структурных превращений в ЗТВ титанового сплава ВТ23 при сварке ТИГ / С. В. Ахонин, В. Ю. Белоус, А. Ф. Мужиченко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2013. – № 3. – С. 26–29.
11. Григоренко Г. М. Дисперсионное упрочнение – путь к повышению прочностных свойств титановых сплавов нового поколения (Обзор) / Г. М. Григоренко, О. М. Задорожнюк // Современная электрометаллургия. – 2012. – № 4. – С. 42–50.

Поступила в редакцию 12.04.2016



Национальная академия наук Украины  
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины  
Международная Ассоциация «СВАРКА»

## Международная конференция СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — СЕГОДНЯ И В БУДУЩЕМ

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины

5–6 декабря 2018 г.

г. Киев

### Научные направления конференции

- ◆ Технологии, материалы и оборудование для сварки и родственных процессов
- ◆ Прочность сварных конструкций, теоретические и экспериментальные исследования напряженно-деформированных состояний
- ◆ Усовершенствование сварных конструкций, автоматизация их расчетов и проектирования, оценка и продление ресурса
- ◆ Новые конструкционные материалы
- ◆ Неразрушающий контроль и техническая диагностика
- ◆ Инженерия поверхности
- ◆ Сварка в медицине — технологии, оборудование; наноматериалы и нанотехнологии
- ◆ Проблемы экологии сварочного производства
- ◆ Специальная электрометаллургия
- ◆ Стандартизация, сертификация продукции сварочного производства; подготовка и аттестация специалистов

Тезисы докладов направлять до **01.11.2017 г.** в адрес оргкомитета:

**E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)**  
**[www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com)**

# ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ Порошковой проволокой на проплавление основного металла и формирование наплавленного металла

А. А. БАБИНЕЦ<sup>1</sup>, И. А. РЯБЦЕВ<sup>1</sup>, А. И. ПАНФИЛОВ<sup>2</sup>, В. А. ЖДАНОВ<sup>1</sup>, И. И. РЯБЦЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ООО «Стил Ворк». 50005, г. Кривой Рог, ул. Тбилисская, 13

Исследовано влияние способов автоматической дуговой наплавки на проплавление основного металла, качество формирования и геометрические размеры наплавленных валиков. В экспериментах использовали девять партий порошковых проволок (тип наплавленного металла 25Х5ФМС) диаметром 1,8; 2,4 и 2,8 мм для наплавки под флюсом, в защитных газах и открытой дугой. Наплавка осуществлялась в широком диапазоне режимов:  $I_n = 150 \dots 450$  А;  $U_n = 20 \dots 34$  В, при одной скорости наплавки 20 м/ч. Установлено, что наибольшее влияние на формирование наплавленных валиков оказывает напряжение дуги. При этом диапазон значений напряжений  $\Delta U_p$ , при котором обеспечивается хорошее формирование наплавленных валиков и отсутствие пор, не совпадает при наплавке разными способами проволокой одного диаметра. Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы при выборе способа дуговой наплавки, режимов наплавки, которые в наибольшей степени удовлетворяют условиям эксплуатации и требованиям к наплавленному металлу для конкретных деталей. Эти результаты будут также использоваться в базах данных при разработке компьютерных программ для роботизированных аддитивных технологий дуговой наплавки. Библиогр. 13, табл. 1, рис. 6.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, режимы наплавки, аддитивные технологии наплавки, порошковая проволока, наплавленный металл, проплавление, формирование наплавленного металла

Порошковая проволока является одним из наиболее универсальных электродных материалов для механизированной и автоматизированной дуговой наплавки (сварки) [1–3]. К основным преимуществам порошковой проволоки, по сравнению с другими электродными материалами, можно отнести достаточно простую адаптацию ее химического состава к составу и свойствам наплаваемых деталей, высокую стабильность горения дуги, относительно небольшое разбрызгивание электродного металла и хорошее формирование наплавленных валиков [4–8].

В зависимости от способа наплавки порошковые проволоки можно разделить на три класса: для наплавки под флюсом, в среде защитных газов и открытой дугой (самозащитные) [1, 9].

Широко известно, что режимы наплавки оказывают существенное влияние на проплавление основного металла и качество формирования наплавленного металла [1–10]. Однако в большинстве случаев данные, представленные в отмеченных работах, носят разрозненный характер, так как описывают свойства наплавленного металла, полученного разными способами с применением различных наплавочных материалов и режимов наплавки. Кроме того, при разработке технологии наплавки различных деталей часто необходимо

обеспечить не только качество и заданные свойства наплавленного металла, но и определенные геометрические размеры наплавленных валиков, долю основного металла в наплавленном (ДОМН) и т. п. [9].

Целью данной работы является системное исследование влияния различных способов автоматической дуговой наплавки и параметров режима наплавки на проплавление основного металла, качество формирования и геометрические размеры наплавленных валиков при использовании наплавочных материалов одного химического состава и одинаковых диаметров.

Накопление баз данных по режимам разных способов дуговой наплавки, геометрическим размерам наплавленных валиков, значениям ДОМН и величине проплавления с учетом ранее разработанных экспертных систем по технологиям наплавки [11, 12] и предложенной компьютерной системе-советчике по выбору технологии наплавки типовых деталей [13] может послужить в дальнейшем основой для разработки компьютерных программ для роботизированных аддитивных технологий дуговой наплавки.

**Материалы и методики исследований.** Для проведения исследований было изготовлено девять партий опытных порошковых проволок для

наплавки под флюсом (АН-26П), в защитных газах (82 % Ar+ 18 % CO<sub>2</sub>) и открытой дугой самозащитной порошковой проволокой (система защиты CaO+TiO<sub>2</sub>+MgO+CaF<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) диаметрами 1,8; 2,4 и 2,8 мм. Металлическую часть шихты порошковых проволок рассчитывали таким образом, чтобы получить наплавленный металл одного типа — 25Х5ФМС. Для наплавки использовали универсальную наплавочную установку У-653, укомплектованную источником питания ВДУ-506. Наплавка порошковыми проволоками различных типов и диаметров осуществлялась на пластины из стали Ст.3 толщиной 15 мм в широком диапазоне режимов: ток наплавки  $I_n$  от 150 до 450 А; напряжение  $U_n$  от 20 до 34 В. Регистрацию и контроль электрических параметров режима наплавки осуществляли при помощи разработанной компьютерной информационно-измерительной системы [13]. Скорость наплавки во всех экспериментах оставалась постоянной — 20 м/ч, так как в диапазоне 20...40 м/ч при прочих неизменных параметрах скорость наплавки практически не влияет на геометрические размеры наплавленных валиков [9].

В процессе экспериментов проводили экспертную оценку качества формирования наплавленных валиков, наличие пор и др. Для замеров основных геометрических параметров наплавленных валиков на макрошлифах, вырезанных из наплавленных заготовок, использовали инструментальный микроскоп БМИ-1. Среднее значение  $\gamma_o$  (ДОМН) определяли по шести-восьми поперечным сечениям для каждого наплавленного валика по формуле

$$\gamma_o = \frac{F_o}{F_o + F_n} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $F_o, F_n$  — площади сечения расплавленного основного и наплавленного металлов, соответственно.

Полученные данные заносили в общую для каждого способа таблицу. В качестве примера ниже приведена таблица с характеристиками отдельных валиков, наплавленных под флюсом, в среде защитных газов и открытой дугой порошковыми проволоками диаметром 1,8 мм.

**Влияние способов и режимов наплавки на геометрические размеры наплавленных валиков и ДОМН.** Основными параметрами режима наплавки являются: значение, полярность и род тока; напряжение дуги; скорость наплавки; диаметр электрода и шаг наплавки [9]. При наплавке тел вращения к основным параметрам также относят смещение с зенита (наплавка наружных поверхностей) или надира (наплавка внутренних поверхностей).

Одними из важнейших характеристик способа наплавки являются величина проплавления и доля основного металла. Широко известно, что с уменьшением проплавления и ДОМН не только сокращается расход дорогостоящих наплавочных материалов, но и улучшается качество и эксплуатационные свойства наплавленных деталей. Согласно (1), величина ДОМН зависит от площади поперечного сечения расплавленного основного и наплавленного металлов. Таким образом, ДОМН будет уменьшаться, если рост площади наплавки происходит быстрее, чем рост площади расплавленного основного металла.

На рис. 1–3 приведены экспериментальные данные о глубине проплавления основного металла, ширине наплавленных валиков и ДОМН для проволок диаметром 1,8 мм (сплошные линии) и диаметром 2,8 мм (штриховые линии) при наплавке тремя разными способами: под флюсом (а), в среде защитных газов (б) и открытой дугой (в).

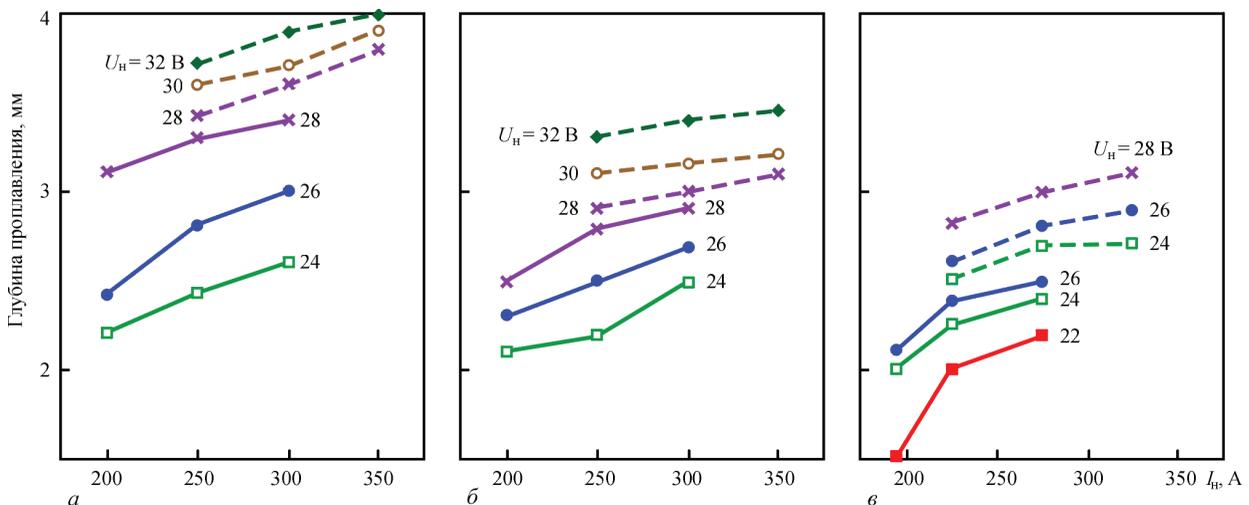


Рис. 1. Влияние тока на глубину проплавления при наплавке под флюсом (а), в защитных газах (б) и открытой дугой (в) (сплошные линии — проволока диаметром 1,8; штриховые — 2,8 мм)

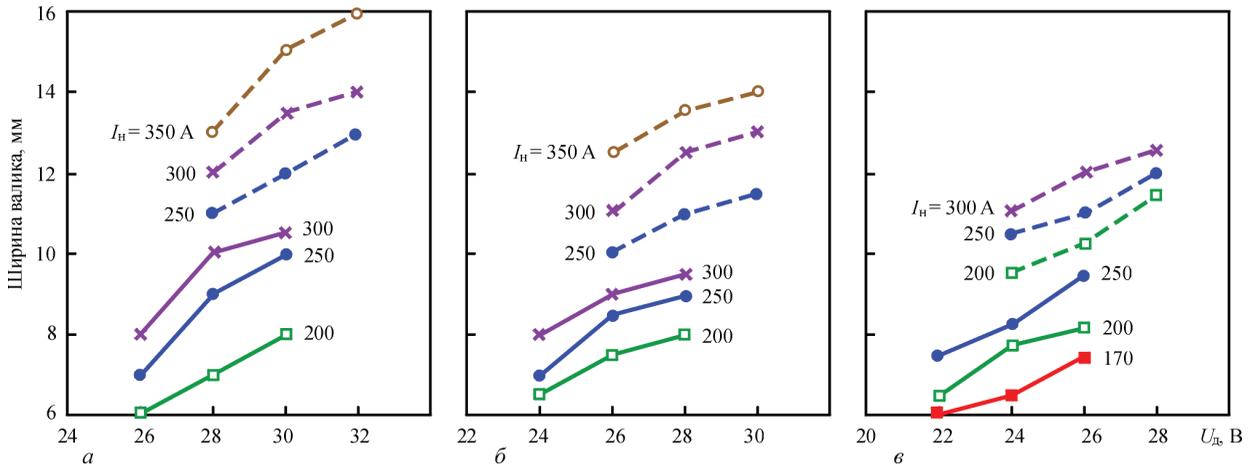


Рис. 2. Влияние напряжения дуги на ширину валика при наплавке под флюсом (а), в защитных газах (б) и открытой дугой (в) (сплошные линии — проволока диаметром 1,8; штриховые — 2,8 мм)

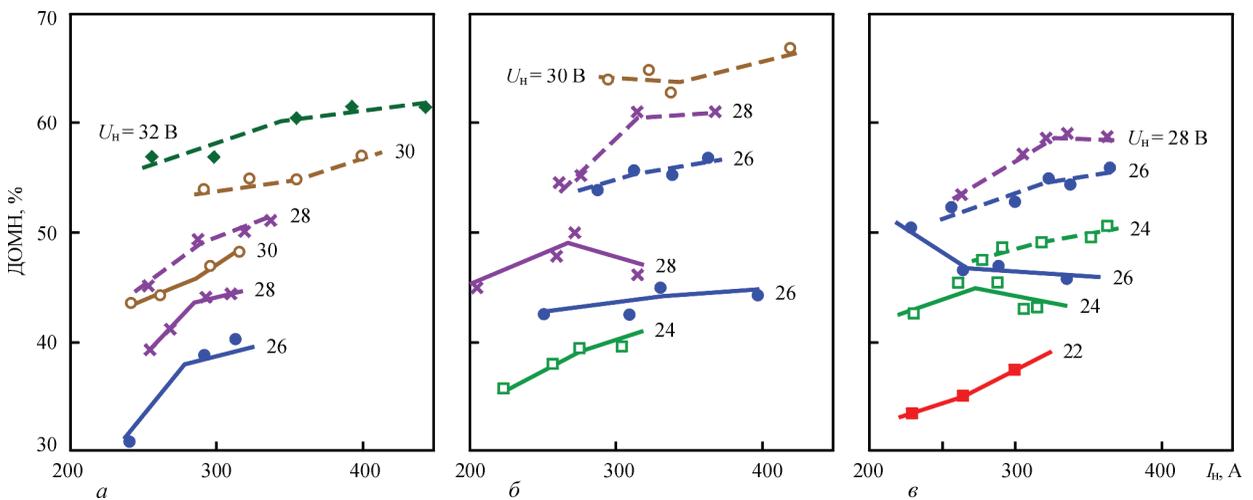


Рис. 3. Влияние тока и напряжения дуги на ДОМН при наплавке под флюсом (а), в защитных газах (б) и открытой дугой (в) (сплошные линии — проволока диаметром 1,8; штриховые — 2,8 мм)

Как видно из рис. 1 и 2, увеличение электрических параметров режима наплавки приводит к росту глубины проплавления основного металла и ширины наплавленных валиков. Наиболее существенно это проявляется при наплавке под флюсом. Увеличение тока и напряжения приводит к практически пропорциональному росту ДОМН (рис. 3). Это объясняется тем, что увеличение силы тока приводит к увеличению эффективной тепловой мощности дуги, вследствие чего увеличиваются глубина проплавления и скорость плавления электрода.

Установлено, что при одинаковом режиме наплавки проволокой одного диаметра меньшее значение ДОМН можно получить при наплавке под флюсом. Очевидно, это связано с большим тепловым КПД данного процесса за счет лучшего теплообмена между дугой и основным металлом и отсутствием теплопотерь на излучение и разбрызгивание электродного металла. Как следствие, рост площади наплавки происходит быстрее роста площади расплавленного основного металла.

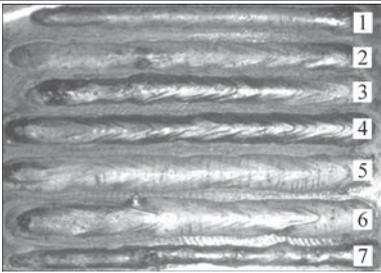
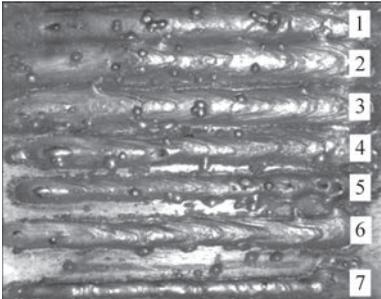
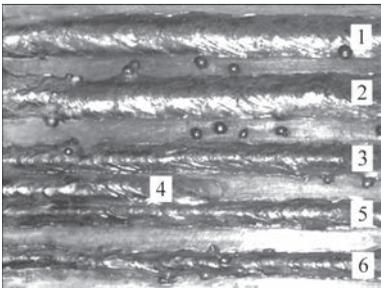
При этом обеспечить минимально возможное проплавление с учетом качественного формирова-

ния наплавленных валиков (см. ниже) возможно в случае наплавки открытой дугой проволокой диаметром 1,8 мм. Также следует отметить, что для каждого способа характерны области с практически неизменной или даже уменьшающейся величиной ДОМН при росте тока и напряжения, что также объясняется соотношением величин электрических параметров режимов наплавки.

**Влияние способов и режимов наплавки на качество формирования наплавленных валиков.** *Наплавка под флюсом.* При использовании порошковой проволоки диаметром 1,8 мм хорошее формирование наблюдается на режимах:  $I_n = 220 \dots 300$  А,  $U_n = 28 \dots 30$  В; для проволоки диаметром 2,4 мм:  $I_n = 250 \dots 350$  А, при таком же напряжении. Уменьшение  $U_n < 28$  В, как и увеличение  $U_n > 30$  В для проволок указанных диаметров приводит к получению, соответственно, слишком узких или слишком широких валиков с неравномерным формированием.

Для проволоки диаметром 2,8 мм оптимальный режим наплавки соответствует значениям  $U_n = 28 \dots 32$  В и  $I_n = 250 \dots 400$  А. При значениях на-

**Влияние режима наплавки порошковыми проволоками диаметром 1,8 мм на формирование наплавленного металла и ДОМН в зависимости от способа наплавки**

Номер п/п	Режим наплавки		Формирование (наличие пор)	ДОМН, %	Внешний вид наплавленных валиков
	$I_n$ , А	$U_n$ , В			
Наплавка под флюсом					
1	241	26,9	Удовлетворительное. Узкий валик	30,5	
2	245	27,9	Хорошее	44,0	
3	290	27,8	Плохое	44,5	
4	298	27,7	Плохое	51,3	
5	301	28,9	Хорошее	44,0	
6	311	28,6	Удовлетворительное	48,5	
7	224	26,5	Плохое. Узкий валик	25,5	
Наплавка в защитном газе					
1	237	26,5	Хорошее	42,5	
2	331	26,5	Хорошее	50,0	
3	316	27,3	Хорошее	46,0	
4	272	27,6	Удовлетворительное (поры)	50,0	
5	171	28,3	Удовлетворительное (поры)	49,3	
6	161	26,7	Удовлетворительное	50,0	
7	172	23,0	Удовлетворительное. Узкий валик	25,8	
Наплавка открытой дугой					
1	256	23,4	Хорошее	47,5	
2	239	23,7	Хорошее	45,5	
3	227	22,3	Хорошее. Узкий валик	48,0	
4	236	22,2	Хорошее. Узкий валик	38,5	
5	218	22,3	Хорошее. Узкий валик	51,5	
6	232	23,3	Удовлетворительное. Узкий валик	26,5	

пряжения  $U_n < 28$  В и  $U_n > 32$  В формирование валиков ухудшается, однако и на таких «неблагоприятных» режимах отмечается отсутствие дефектов в наплавленном металле.

*Наплавка в среде защитных газов.* При наплавке порошковой проволокой диаметром 1,8 мм хорошее формирование наплавленных валиков наблюдается в диапазоне режимов  $U_n = 25...27$  В;  $I_n = 250...320$  А. При напряжении  $U_n < 25$  В и  $U_n > 27$  В отмечается удовлетворительное формирование и отсутствие пор, а при повышении напряжения более 28 В — в наплавленном металле появляются поры, а формирование валиков плохое.

Для проволоки диаметром 2,4 мм диапазон режимов, при которых достигается качественное формирование наплавленных валиков, соответствует  $U_n = 26...28$  В;  $I_n = 270...350$  А. При напряжении  $U_n < 25$  В и  $U_n > 28$  В формирование удовлетворительное, поры отсутствуют.

Наплавку проволокой диаметром 2,8 мм рекомендуется вести на режимах:  $U_n = 27...29$  В;  $I_n = 270...350$  А. В диапазонах  $U_n = 25...26$  В и  $U_n = 30...32$  В формирование наплавленных валиков удовлетворительное, поры отсутствуют. При напряжении  $U_n < 25$  В и  $U_n > 32$  В отмечается плохое формирование наплавленного металла и наличие пор.

*Наплавка открытой дугой.* Для данного способа наплавки хорошее формирование и отсутствие пор в большинстве случаев характерны только для определенного диапазона режима наплавки. Однако при наплавке открытой дугой следует различать два диапазона режимов по напряжению дуги:  $\Delta U_T$  — диапазон, при котором обеспечивается хорошее формирование, минимальное разбрызгивание, допустимая ДОМН и  $\Delta U_{оп}$  — диапазон, при котором отсутствуют поры [4].

Для разных типов наплавленного металла и составов шихты порошковых проволок  $\Delta U_T$  и  $\Delta U_{оп}$  могут значительно отличаться друг от друга по величине. При этом диапазон режимов, в котором

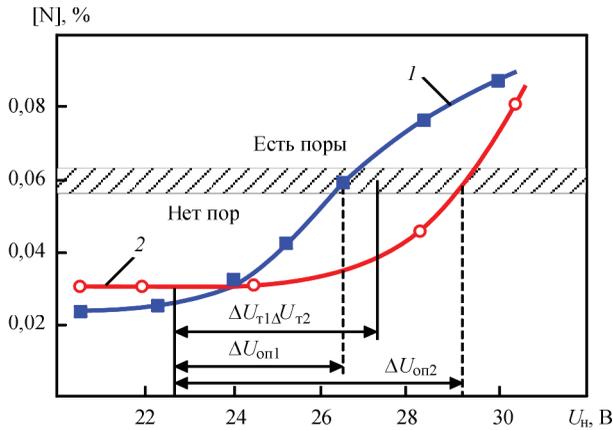


Рис. 4. Влияние напряжения дуги на пористость в наплавленном металле [4] (обозначения см. в тексте)

$\Delta U_T$  и  $\Delta U_{оп}$  совпадают — является наиболее предпочтительным для наплавки. В качестве иллюстрации, на рис. 4 показано влияние напряжения дуги на пористость наплавленного металла при наплавке самозащитными проволоками с одинаковым содержанием металлической части шихты, но с разным составом газо- и шлакообразующих материалов: 1 — рутил, мрамор, флюорит; 2 — рутил, флюорит, фторцирконат кальция, слюда [4].

Проведенные исследования показали, что для самозащитной проволоки диаметром 1,8 мм хорошее формирование наплавленных валиков и отсутствие пор характерно для режимов  $U_n = 22...24$  В при токе  $I_n = 200...250$  А. При напряжении  $U_n < 22$  В форма валиков узкая, формирование удовлетворительное. При  $U_n > 24$  В практически во всем диапазоне токов отмечается значительное количество пор и плохое формирование валиков. Также с повышением тока и напряжения увеличивается разбрызгивание металла.

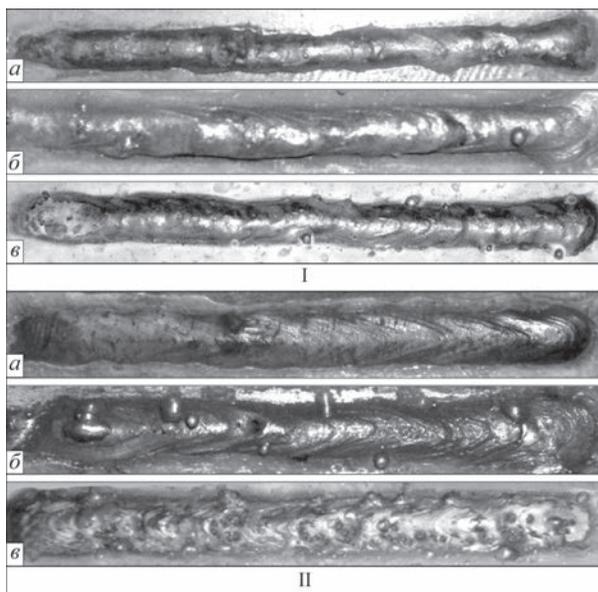


Рис. 5. Внешний вид валиков, наплавленных порошковой проволокой диаметром 1,8 мм под флюсом (а), в защитных газах (б) и открытой дугой (в) на режимах: I —  $U_n = 24$  В,  $I_n = 225$  А; II —  $U_n = 28$  В,  $I_n = 250$  А

При наплавке самозащитными порошковыми проволоками диаметром 2,4 и 2,8 мм устойчивый процесс с хорошим формированием наплавленных валиков и отсутствием в них пор характерен для режимов наплавки  $U_n = 23...25$  В;  $I_n = 220...300$  А. Для валиков, наплавленных на режимах  $U_n < 23$  В и  $U_n = 25...27$  В, также характерно отсутствие пор, однако их форму и качество поверхности можно признать недостаточно хорошими. При напряжении  $U_n > 27$  В процесс становится нестабильным, валики характеризуются плохим формированием и наличием многочисленных пор.

Таким образом, для исследуемых самозащитных проволок диапазоны  $\Delta U_T$  и  $\Delta U_{оп}$  практически совпадают. Внешний вид наиболее характерных валиков, наплавленных порошковыми проволоками диаметром 1,8 и 2,8 мм на одинаковых режимах тремя разными способами, представлен на рис. 5 и 6.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что на проплавление основного металла главным образом влияет ток наплавки, а на качество формирования наплавленного металла и на стабильность процесса наплавки напряжение дуги. При этом каждому диаметру проволоки соответствует определенный, довольно узкий диапазон  $\Delta U_T$ , при котором обеспечивается хорошее формирование наплавленных валиков с минимальным проплавлением основного металла. Кроме того, как видно из рис. 5 и 6, этот диапазон для разных способов наплавки проволокой одного состава и диаметра не совпадает. Например, при наплавке проволокой диаметром 1,8 мм на режиме  $U_n = 24$  В формирование валика, полученного при наплавке под флюсом — плохое, при наплавке в защитных газах — удовлетворительное, а

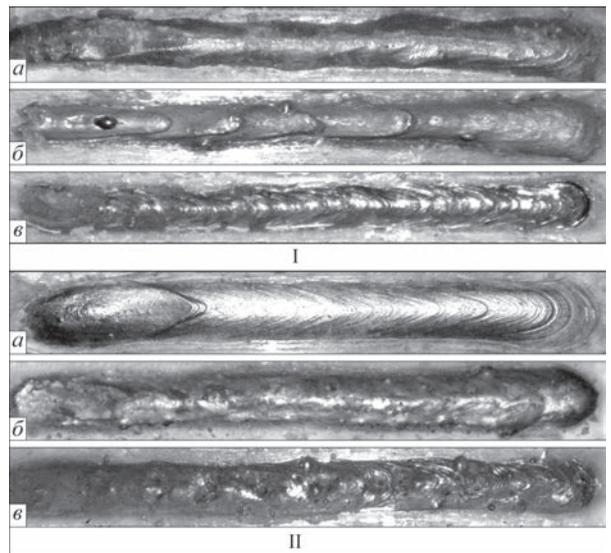


Рис. 6. Внешний вид валиков, наплавленных порошковой проволокой диаметром 2,8 мм под флюсом (а), в защитных газах (б) и открытой дугой (в) на режимах: I —  $U_n = 24$  В,  $I_n = 250$  А; II —  $U_n = 28$  В,  $I_n = 275$  А

при наплавке самозащитной проволокой — хорошее (рис. 5, режим I). Обратная зависимость видна при повышении напряжения до 28 В (рис. 5, режим II). Такая же закономерность характерна и при наплавке проволоками диаметром 2,4 и 2,8 мм (рис. 6).

Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы при выборе режимов наплавки, которые в наибольшей степени удовлетворяют условиям эксплуатации и требованиям к наплавленному металлу для конкретных деталей, а также будут использоваться в базах данных при разработке компьютерных программ для роботизированных аддитивных технологий дуговой наплавки.

### Выводы

1. Установлено, что наибольшее влияние на качество формирования наплавленных валиков оказывает напряжение дуги. При этом диапазон значений напряжения  $\Delta U_{\text{т}}$ , при котором обеспечивается хорошее формирование наплавленных валиков, не совпадает при дуговой наплавке разными способами проволокой одного диаметра.

2. Наиболее существенно влияние режимов наплавки на геометрические размеры валиков и проплавление основного металла проявляется при наплавке под флюсом. Данный способ обеспечивает наиболее широкий диапазон  $\Delta U_{\text{т}}$ , однако вместе с тем, для него характерна также большая глубина проплавления основного металла. Обеспечить минимально возможное проплавление при качественном формировании наплавленных валиков возможно в случае наплавки открытой дугой проволокой диаметром 1,8 мм.

3. Определены оптимальные диапазоны режимов наплавки порошковыми проволоками, обеспечивающие получение качественного напла-

вленного металла типа 25Х5ФМС с минимальным проплавлением основного металла.

1. Походня И. К. Сварка порошковой проволокой / И. К. Походня, А. М. Суптель, В. Н. Шлепаков. – К.: Наукова думка, 1972. – 223 с.
2. Металлургия дуговой сварки, взаимодействие металла с газами / И. К. Походня, И. Р. Явлошин, А. П. Пальцевич [и др.]. – К.: Наукова думка, 1994. – 444 с.
3. Исследования и разработки ИЭС им. Е. О. Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой (Обзор) / И. К. Походня, В. Н. Шлепаков, С. Ю. Максимов [и др.] // Автоматическая сварка. – 2010. – № 12. – С. 34–42.
4. Юзвенко Ю. А. Наплавка порошковой проволокой / Ю. А. Юзвенко, Г. А. Кирилук. – М.: Машиностроение, 1973. – 45 с.
5. Шлепаков В. Н. Современное состояние разработки и применения порошковых проволок для сварки углеродистых и низколегированных сталей / В. Н. Шлепаков, Ю. А. Гаврилюк, А. С. Котельчук // Автоматическая сварка. – 2010. – № 3. – С. 46–51.
6. Шлепаков В. Н. Физико-металлургические и сварочно-технологические свойства газозащитных порошковых проволок для сварки конструкционных сталей / В. Н. Шлепаков // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6-7. – С. 56–59.
7. Розерт Р. Применение порошковых проволок для сварки в промышленных условиях / Р. Розерт // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6-7. – С. 60–64.
8. Кондратьев И. А. Порошковые проволоки для наплавки стальных валков горячей прокатки / И. А. Кондратьев, И. А. Рябцев // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6-7. – С. 99–100.
9. Рябцев И. А. Наплавка деталей машин и механизмов / И. А. Рябцев. – К.: Екотехнологія, 2004. – 160 с.
10. Разиков М. И. Автоматическая наплавка в среде углекислого газа / М. И. Разиков. – М.: Машиностроение, 1962. – 212 с.
11. Демченко В. Ф. Компьютерная система проектирования технологий дуговой наплавки / В. Ф. Демченко, И. А. Рябцев, С. С. Козлигина // Автоматическая сварка. – 1998. – № 11. – С. 61–66.
12. Демченко В. Ф. Компьютерная система проектирования технологий восстановления и упрочнения деталей металлургического оборудования / В. Ф. Демченко, И. А. Рябцев, С. С. Козлигина // Тяжелое машиностроение. – 1999. – № 2. – С. 25–26.
13. Компьютерная информационно-измерительная система для исследования процессов дуговой наплавки / И. А. Рябцев, Ю. Н. Ланкин, В. Г. Соловьев [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015. – № 9. – С. 34–37.

Поступила в редакцию 15.09.2016

## WRTYS 2017

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

23–26 мая 2017 г.

Киевская область

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

Контакты: [www.wrtys.com.ua](http://www.wrtys.com.ua), E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Тел.: +38 (044) 200-47-83, факс: +38 (044) 528-04-86

## ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ ВАЛИКА ПРИ ОДНОСЛОЙНОЙ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКЕ НА КРОМКИ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ГТД\*

П. Д. ЖЕМАНЮК<sup>1</sup>, И. А. ПЕТРИК<sup>1</sup>, С. Л. ЧИГИЛЕЙЧИК<sup>1</sup>, А. В. ЯРОВИЦЫН<sup>2</sup>, Г. Д. ХРУЩОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Мотор Сич». 69068, г. Запорожье, пр. Моторостроителей, 15. E-mail: motor@motorsich.com

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

Ввиду необходимости увеличения размеров восстанавливаемых наплавкой поврежденных участков кромок лопаток авиационных ГТД из никелевых жаропрочных сплавов на высоту 5...15 мм при микроплазменной порошковой наплавке на узкую подложку менее 3 мм требуется уточнение закономерностей формообразования наплавляемого металла. Для условий соответствующей однослойной наплавки исследован диапазон изменения энергетических показателей процесса в системе «эффективная тепловая мощность дуги–погонная энергия–площадь поперечного сечения наплавленного валика» и оценена действенность технологического управления поперечным сечением наплавляемого слоя. Установлено, что в условиях ограниченной глубины проплавления основного металла площадь поперечного сечения наплавляемого валика наиболее эффективно регулируется за счет изменения погонной энергии в диапазоне 100...1600 Дж/мм. Предполагается, что установленная технологическая взаимосвязь между величиной погонной энергии, высотой и площадью поперечного сечения наплавляемого валика будет способствовать формированию дополнительных критериев предотвращения образования трещин в сварном соединении «основной – наплавленный металл» при восстановлении деталей авиационных двигателей из никелевых жаропрочных сплавов многослойной микроплазменной порошковой наплавкой. Библиогр. 18, табл. 4, рис. 8.

*Ключевые слова:* микроплазменная порошковая наплавка, никелевый жаропрочный и кобальтовый жаростойкий сплав, узкая подложка, эффективная тепловая мощность дуги, погонная энергия, термический КПД, площадь поперечного сечения наплавленного валика

Одной из областей применения дуговой наплавки на узкую подложку [1] шириной до 3 мм является серийный ремонт поврежденных или изношенных кромок лопаток авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) [2–8]. Рабочие лопатки серийно ремонтируемых авиационных двигателей Д18Т, Д436, АИ222, АИ-450 изготовлены из никелевых жаропрочных сплавов с поликристаллической структурой (ЖС6У-ВИ, ЖС6К-ВИ) или из сплавов с направленной кристаллизацией (ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ) [9]. Данные высоколегированные материалы, содержащие 55 и более об. %  $\gamma'$ -фазы, предназначены для эксплуатации при температурах 1000...1100 °С и отличаются высокой склонностью к образованию трещин при сварке плавлением и/или при последующей термической обработке [9, 10]. Аргонодуговая сварка применялась для восстановления таких деталей более 40 лет, однако ремонт кромок лопаток был ограничен глубиной до 2 мм, а присадочный металл уступал основному металлу по жаропрочности [2, 3].

Более 10 лет в АО «Мотор Сич» и ГП «Ивченко-Прогресс» для ремонта авиационных рабочих лопаток из данных сплавов с наработкой более

3...5 тыс. ч успешно применяется микроплазменная порошковая наплавка [4–8]. В данном процессе широко используются несколько марок присадочных порошков — в частности никелевый жаропрочный сплав ЖС32 [4–8] и кобальтовый жаростойкий и износостойкий сплав ВЗК [5, 8].

На сегодняшний день серийное ремонтное производство ставит требования к увеличению размеров восстанавливаемых наплавкой поврежденных участков лопаток (торцы бандажных полок, лабиринтных гребешков, Z-образных профилей и пера лопаток) на высоту до 5...15 мм ввиду соответствующего увеличения размеров зон износа, прогаров и термоусталостных трещин, развивающихся в процессе эксплуатации данных деталей. Их реставрацию можно охарактеризовать как процесс многослойной наплавки, в котором сварное соединение «основной-наплавленный металл» может быть в определенных условиях склонным к образованию микро- и макротрещин [6, 10, 11]. В свою очередь многослойную наплавку с некоторым приближением можно представить как совокупность однослойных валиков. Соответственно, актуально расширение представлений о границах диапазона энергетических показателей однослойной наплавки с целью рационального выбора такого уровня и способов дозирования тепловложений в изделие, при которых обеспечивается

\* По материалам доклада, представленного на международной конференции «Современные технологии сварки», 13–15 июля 2016 г., г. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

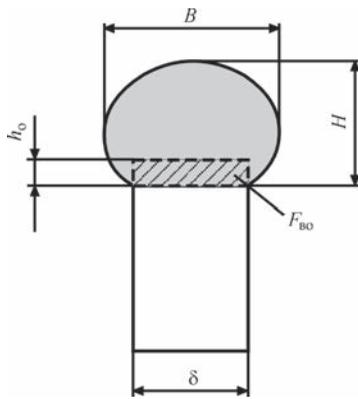


Рис. 1. Схема измерения размеров наплавленного валика:  $\delta$  — ширина узкой подложки;  $B$  — ширина валика;  $H$  — высота валика;  $h_0$ ,  $F_{во}$  — глубина проплавления и площадь поперечного сечения переплавленного основного металла

технологическая прочность данного сварного соединения, т. е. не проявляется склонность выше указанных материалов к образованию трещин при сварке плавлением.

Одной из составляющих данной задачи является выявление закономерностей и дальнейшая оптимизация технологического управления формой валика, наплаваемого на узкую подложку. Помимо рационального выбора объема наплаваемого металла при ручной и автоматической (роботизированной) наплавке это позволит также оптимизировать размеры боковых усилений валика  $p = 0,5(B - \delta)$  в его поперечном сечении (рис. 1).

В свою очередь боковые усиления наплавленного валика являются припусками, удаляемыми механической обработкой при формировании заданной геометрии восстановленного наплавкой элемента. Ввиду опасности образования прижогов и шлифовочных трещин абразивную обработку деталей из никелевых жаропрочных сплавов проводят с использованием специальных режимов, оборудования и абразивных кругов [12, 13]. При этом используют пониженные скорости вращения абразивного инструмента (до 25 м/с) и подачи (350...750 мм/мин), ограничивая интенсивность съема обрабатываемого материала [13]. Таким образом, механическая обработка наплавленного металла, помимо технической сложности формообразования соответствующих профильных поверхностей лопатки, является весьма трудоемким процессом, дополнительно требующим привлечения высококвалифицированных специалистов, дорогостоящих оборудования и материалов. Соответственно, уменьшение ширины наплаваемого валика в значительной мере способствует уменьшению трудоемкости и повышению экономической эффективности ремонта лопатки.

Целью данной работы являлась оценка диапазона эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги (предварительно определялась по методике проточного калориметрирования

[1] для соответствующего значения сварочного тока) и погонной энергии для условий однослойной наплавки на узкую подложку шириной  $\delta = 0,3...3,0$  мм на режимах, близких к оптимальным, и установление базовых закономерностей технологического управления формой поперечного сечения наплаваемого валика.

В качестве основного металла использовались образцы из стали 12X18H10T размерами 90...100×30...40 мм толщиной 0,3...3,0 мм. Наплавка на режимах, описанных ранее в работе [8], выполнялась в условиях свободного формирования валика на торце пластины, установленной вертикально в тисках. Расстояние от наплаваемой поверхности до медных губок тисков составляло не менее 20 мм, от внешнего среза плазмотрона до образца — 5 мм. В качестве присадки применялись порошки сплавов ЖС32 и В3К фракцией соответственно 63...–160 мкм и 53...–150 мкм, с разной температурой плавления (примерно на 70...90 °С) и жидкотекучестью расплавленного металла сварочной ванны. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа использовался аргон высшего сорта по ГОСТ 10157–79. Эксперименты проводились на двух типах оборудования, различающихся видом подачи дисперсной присадки, степенью сжатия микроплазменной дуги и скважностью  $S$  импульсного сварочного тока:

- установка STARWELD 190H, плазмотрон НРН80 (диаметры каналов сопел: плазменного  $d_{пл} = 2$  мм, фокусирующего  $d_{ф} = 3$  мм), фирма Kenametal Stellite GmbH – непрерывная подача порошка (расход транспортирующего газа  $Q_{тр} = 3$  л/мин),  $S \approx 1,5$ ;

- установка УПНС304M2/M3, плазмотрон ППС04 ( $d_{пл} = 2,5$  мм,  $d_{ф} = 4,5$  мм) — порционная подача порошка ( $Q_{тр} = 2$  л/мин),  $S \approx 4,5$ .

Обработка экспериментальных данных проводилась с помощью регрессионных зависимостей величины эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги  $q_{и}$  от сварочного тока  $I$ , ранее полученных с использованием методики проточного калориметрирования [1]. Погонная энергия  $q_{и}/v$  определялась по методике работы [11]:

$$q_{и}/v = Q_{\Sigma}/L, \quad (1)$$

где  $Q_{\Sigma}$  — тепловложения в анод с учетом эффективного КПД нагрева изделия [1, 11];  $L$  — приведенная длина эллиптического цилиндра валика. Площади поперечного сечения наплавленного валика  $F_{в}$  и наплавленного металла в нем  $F_{вн} = F_{в} - F_{во}$  определялись расчетом по методике работы [14] на основании измерений ширины, высоты валика и глубины проплавления основного металла с точностью до 0,05 мм согласно рис. 1. Термический КПД для наплаваемого металла ЖС32 опреде-

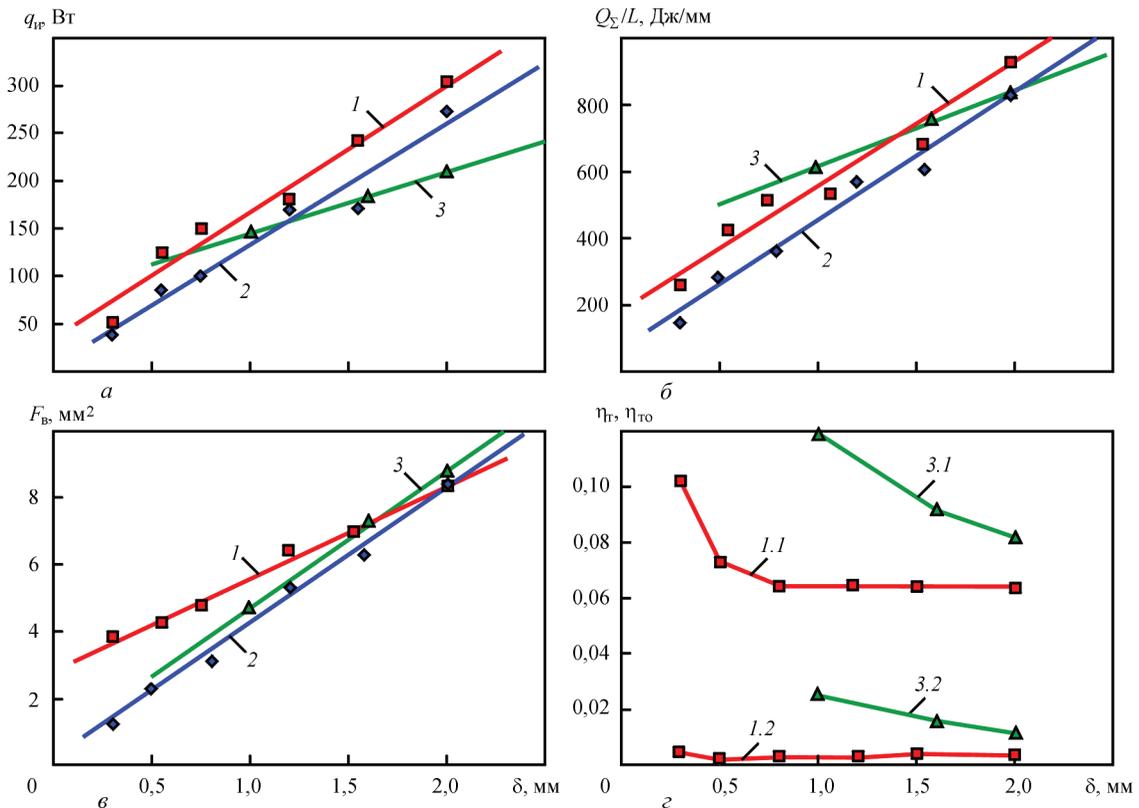


Рис. 2. Влияние ширины узкой подложки  $\delta$  на эффективную тепловую мощность микроплазменной дуги  $q_{\text{и}}$  (а), погонную энергию  $Q_{\Sigma}/L$  (б), площадь поперечного сечения наплавленного валика  $F_{\text{в}}$  (г) и термический КПД  $\eta_t$  (з): 1 — наплавка сплава ЖС32, установка Starweld 190Н, непрерывная подача порошка, защитный газ Ar; 1.1 — полный термический КПД процесса  $\eta_t$ ; 1.2 — составляющая термического КПД, расходуемая на плавление основного металла; 2 — наплавка сплава ВЗК, установка Starweld 190Н, постоянная подача порошка, защитный газ Ar; 3 — наплавка сплава ЖС32, установка УПНС-304М2/М3, порционная подача порошка, защитный газ 95 % Ar + 5 % H<sub>2</sub>; 3.1 — полный термический КПД процесса  $\eta_t$ ; 3.2 — составляющая термического КПД, расходуемая на плавление основного металла

лялся расчетным путем [11] исходя из площади его поперечного сечения  $F_{\text{вн}}$ :

$$\eta_{\text{тн}} = \frac{M H_{\text{м}}}{q_{\text{и}}}, \quad (2)$$

где  $H_{\text{м}} = 861,2$  и  $1312,6$  Дж — удельная энтальпия 1 г соответственно наплавленного металла ЖС32 и основного металла 12Х18Н10Т.

Первоначально были оценены закономерности изменения энергетических показателей процесса микроплазменной порошковой наплавки и показателей формы валика для узкой подложки  $\delta = 0,3 \dots 2,0$  мм (рис. 2 и табл. 1). Установлено, что эффективная тепловая мощность микроплазменной дуги изменяется в диапазоне 30...330 Вт, погонная энергия процесса 100...1000 Дж/мм, производительность наплавки 0,3...1,3 г/мин; площадь поперечного сечения валика 1...9 мм<sup>2</sup>. Зависимости  $q_{\text{и}}(\delta)$ ,  $Q_{\Sigma}/L(\delta)$  и  $F_{\text{в}}(\delta)$  близки к линейной. Полученные результаты свидетельствуют об определенном влиянии на энергетические показатели процесса химического состава присадки (ЖС32, ВЗК) и способ подачи дисперсной присадки (непрерывный, порционный), что позволяет расширить представления об известных способах тех-

нологического регулирования тепловложений в изделие (сварочный ток, степень сжатия плазменной дуги, рациональный выбор состава защитного газа [1, 4]). Указанные технологические факторы в диапазоне  $q_{\text{и}} < 150$  Вт и  $\delta < 1,2$  мм также оказывают заметное влияние на уменьшение поперечного сечения наплаваемого валика. Полный термический КПД процесса наплавки на узкую подложку  $\delta = 0,3 \dots 2,0$  мм, как правило, не превышает  $\eta_t = 6 \dots 10$  %, причем часть эффективной мощности  $q_{\text{и}}$ , расходуемая на плавление основного металла, составляет  $\eta_{\text{то}} = 0,16 \dots 2,5$  %. Доля основного металла в наплавленном ограничена в диапазоне 5...15 %, что соотносится с оптимальными режимами плазменно-порошковой наплавки [1].

Установленный диапазон значений коэффициента формы валика В/Н в пределах 0,77...1,22 (см. табл. 1) позволил уточнить технологически вероятные схемы формообразования наплаваемого валика [14] при варьировании ряда технологических факторов микроплазменной порошковой наплавки: ширины узкой подложки; эффективной тепловой мощности дуги и производительности. Для  $\delta = 0,3 \dots 2,0$  мм в зависимости от вязкости расплавленного металла сварочной ванны (т. е. наплаваемого металла, так как  $\gamma_0 \rightarrow \min$ ) характер-

**Таблица 1.** Влияние ширины узкой подложки  $\delta$  на долю основного металла  $\gamma_o$ , производительность наплавки  $M_H$  и коэффициент формы валика  $B/H$  при микроплазменной порошковой наплавке сплавов ЖС32 и ВЗК

$\delta$ , мм	$\gamma_o$ , %			$B/H$			$M_H$ , г/мин		
	ЖС32 (н)	ЖС32 (п)	ВЗК (н)	ЖС32 (н)	ЖС32 (п)	ВЗК (н)	ЖС32 (н)	ЖС32 (п)	ВЗК (н)
0,3	9,97	—	9,26	0,787	—	1,054	0,351	—	0,157
0,55	5,11	—	5,04	0,772	—	1,041	0,645	—	0,333
0,75	8,98	—	8,5	0,857	—	0,930	0,639	—	0,366
1,0	—	14,16	—	—	1,201	—	—	1,043	—
1,2	11,46	—	13,55	0,933	—	0,936	0,826	—	0,534
1,55	12,11	13,37	15,39	1,216	1,113	1,000	1,013	0,872	0,711
2,0	11,19	10,64	10,31	1,032	1,206	0,969	1,276	0,958	1,261

Примечание: (н) и (п) – соответственно непрерывная и порционная подача порошка.

ны следующие изменения формы поперечного сечения наплавленных валиков:

– при повышенной вязкости (сплав ЖС32) — по закону увеличивающегося эллипса с  $H > B$  при  $\delta < 0,8$  мм и  $B > H$  при  $\delta > 1,5$  мм;

– при повышенной жидкотекучести (сплав ВЗК) — по закону увеличивающегося круга с  $H \approx B$ .

Рассмотренные выше способы технологического влияния на форму и размеры наплаваемого на узкую подложку валика следует отнести к пассивным, так как они могут быть выбраны лишь до начала наплавки. Известно [1, 4], что технологическим параметром сжатой дуги, в первую очередь определяющим ее эффективную тепловую мощность, является сварочный ток. Соответственно, она достаточно легко может технологически управляться в процессе восстановительной наплавки, в частности — при изменении ширины узкой подложки при локальном ремонте лопаток сложной геометрии [4–8]. Поэтому в данной работе также оценивалась возможность управления формой валика за счет применения импульсного сварочного тока с различной скважностью  $S$ .

Исследования проводились параллельно для дисперсных присадочных материалов ВЗК (установка STARWELD 190Н,  $S \approx 1,5$ ) и ЖС32 (установка УПНС304М2/М3,  $S \approx 4,5$ ). Дополнительно, кроме наплавки постоянным сварочным током (режим 1), рассматривалось 2 типа импульсных режимов:

режим 2:  $I_{имп} < I_{б}, I_{п} < I_{б};$

режим 3:  $I_{имп} > I_{б}, I_{п} < I_{б};$

где  $I_{б}$  — базовое значение величины постоянного сварочного тока;  $I_{имп}, I_{п}$  — соответственно значения сварочного тока при импульсе и паузе.

Закономерности изменения энергетических показателей процесса микроплазменной порошковой наплавки и формы валика для узкой подложки  $\delta = 0,3 \dots 2,0$  мм представлены на рис. 3, табл. 2 и рис. 4, табл. 3 для условий наплавки сплавов ВЗК и ЖС32, соответственно. В зависимости от величины скважности импульса сварочного тока при наплавке на узкую подложку  $\delta \leq 2$  мм на режиме 3 отмечено различное положение зависимостей

$q_H(\delta), Q_{\Sigma}/L(\delta)$  и  $F_B(\delta)$  относительно аналогичных при наплавке на постоянном токе (см. рис. 3, 4).

Полученные результаты свидетельствуют о возможности эффективного управления размерами поперечного сечения валика, наплаваемого

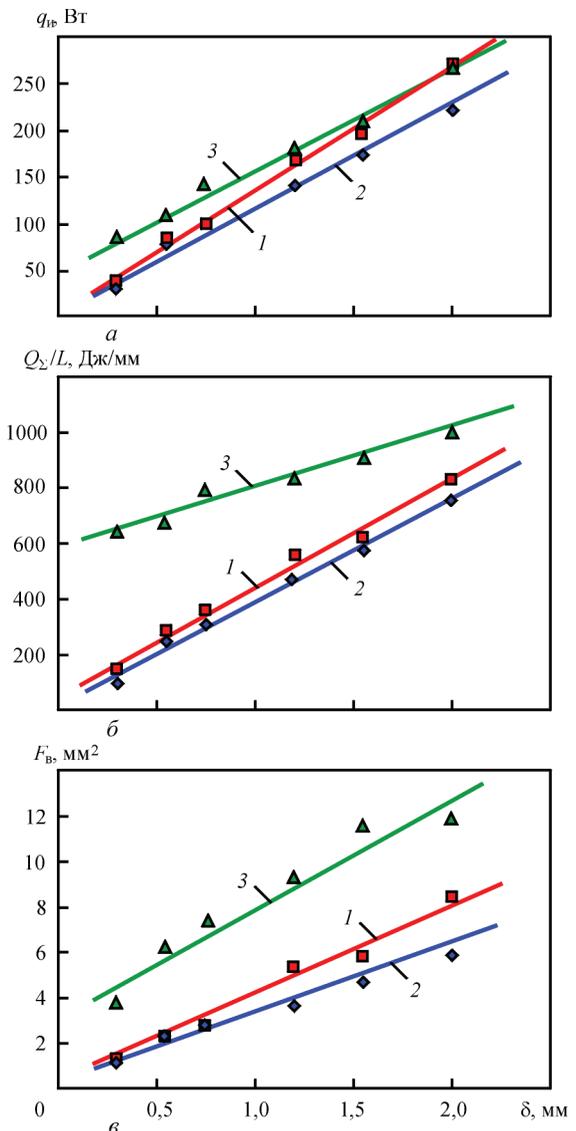


Рис. 3. Влияние ширины узкой подложки  $\delta$  на эффективную тепловую мощность микроплазменной дуги  $q_H$  (а), погонную энергию  $Q_{\Sigma}/L$  (б), площадь поперечного сечения наплавленного валика  $F_B$  (в). Наплавка сплава ВЗК, защитный газ Ar, установка Starweld 190Н, непрерывная подача порошка: 1 — постоянный; 2, 3 — импульсный сварочный ток

Таблица 2. Влияние ширины узкой подложки  $\delta$  на долю основного металла  $\gamma_o$ , производительность наплавки  $M_n$  и коэффициент формы валика  $B/H$  при микроплазменной порошковой наплавке сплава ВЗК на постоянном (режим 1) и импульсном токе (режим 2, 3)

$\delta$ , мм	$\gamma_o$ , %			$M_n$ , г/мин			$B/H$		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 1	Режим 2	Режим 3
0,3	9,26	7,47	4,73	0,157	0,116	0,251	1,05	0,71	0,72
0,55	5,04	7,31	1,67	0,333	0,287	0,332	1,04	0,90	0,85
0,75	8,50	13,37	4,64	0,366	0,329	0,456	0,93	1,06	0,74
1,2	13,55	14,12	8,20	0,534	0,485	0,785	0,94	0,92	0,83
1,55	15,39	8,47	6,48	0,711	0,616	1,042	1,00	0,92	0,79
2,0	10,31	11,32	6,74	1,260	0,678	1,496	0,97	1,16	0,80

на узкую подложку, за счет рационального выбора параметров импульсного сварочного тока. Также при наплавке на импульсном сварочном токе сплава ВЗК несколько уменьшается (на 2...5 %) доля основного металла по сравнению с наплавкой на постоянном токе (см. табл. 2) и становится возможным формирование наплавляемого валика по закону увеличивающегося эллипса с  $H > B$  для всего диапазона ширины узкой подложки  $\delta = 0,3...2,0$  мм. При наплавке на импульсном токе сплава ЖС32 возможности уменьшения доли основного металла и управления коэффициентом формы валика за счет применения импульсных режимов несколько ограничены (см. табл. 3).

Исследования влияния скорости микроплазменной порошковой наплавки сплавов ЖС32 и ВЗК на энергетические показатели процесса и площадь поперечного сечения валика выполнялись в режиме автоматической наплавки постоянным сварочным током на роботизированной установке 190НР. Установлено (рис. 5), что при увеличении скорости наплавки на узкую подложку шириной  $\delta = 0,3...3,0$  мм с 1,2 до 3,6 м/ч площадь поперечного сечения наплавленного валика  $F_B$  снижается в среднем в 3 раза, а погонные тепловложения в изделие  $Q_{\Sigma}/L$  – в 4 раза. Производительность наплавки на узкую подложку  $\delta = 3,0$  мм в рассматриваемом диапазоне скоростей по данным рис. 5 составляет примерно 3 г/мин

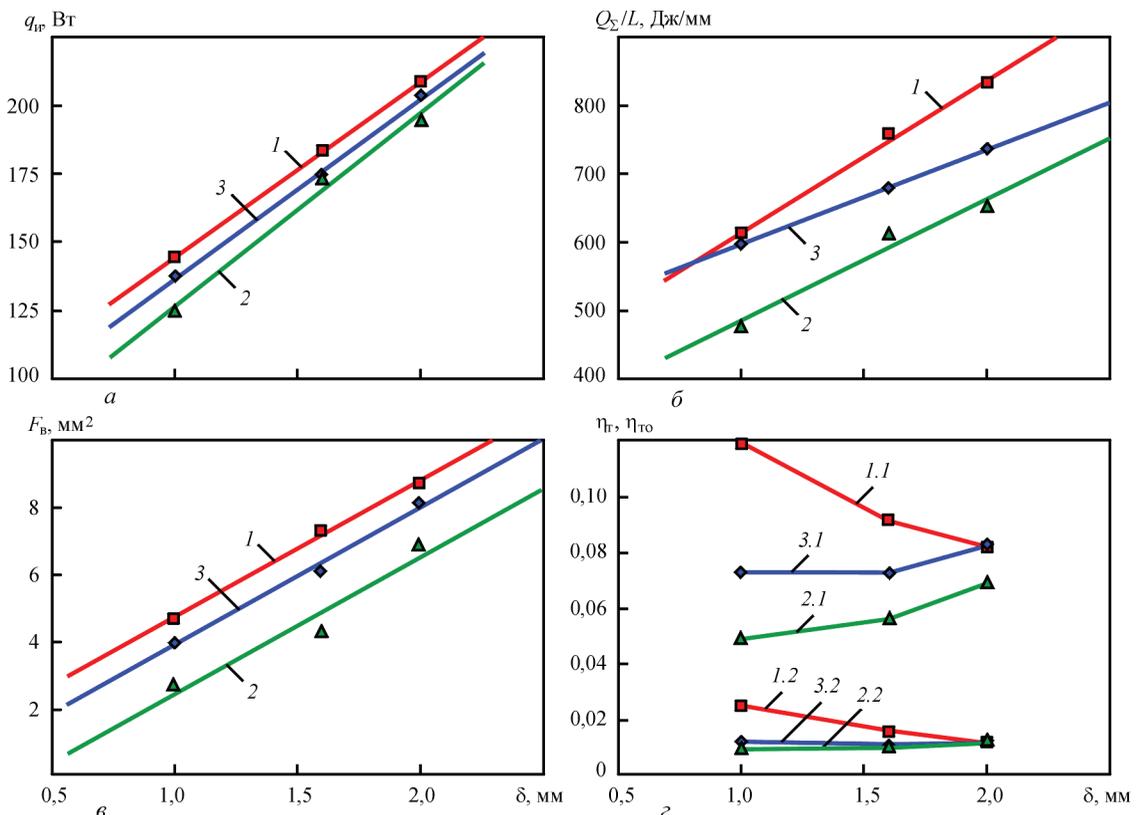


Рис. 4. Влияние ширины узкой подложки  $\delta$  на эффективную тепловую мощность микроплазменной дуги  $q_n$  (а), погонную энергию  $Q_{\Sigma}/L$  (б), площадь поперечного сечения наплавленного валика  $F_B$  (в) и термический КПД  $\eta_T$  (г) при изменении ширины узкой подложки  $\delta$ . Наплавка сплава ЖС32, защитный газ 95 % Ar + 5 % H<sub>2</sub>, установка УПНС-304М2/М3, порционная подача порошка: 1 — постоянный сварочный ток; 2, 3 — импульсный сварочный ток (режимы 2 и 3); 1.1, 2.1, 3.1 — полный термический КПД процесса  $\eta_T$ ; 1.2, 2.2, 3.2 — составляющая термического КПД  $\eta_{то}$ , расходуемая на плавление основного металла

Таблица 3. Влияние ширины узкой подложки  $\delta$  на долю основного металла  $\gamma_o$ , производительность наплавки  $M_H$  и коэффициент формы валика  $B/H$  при микроплазменной порошковой наплавке сплава ЖС32 на постоянном (режим 1) и импульсном токе (режим 2, 3)

$\delta$ , мм	$\gamma_o$ , %			$M_H$ , г/мин			$B/H$		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 1	Режим 2	Режим 3
1,0	17,17	15,09	11,57	0,950	0,344	0,585	1,04	0,89	0,79
1,55	12,61	15,9	13,64	0,970	0,557	0,750	1,11	1,07	1,22
2,0	10,63	13,7	11,08	1,020	0,773	1,004	1,21	1,11	1,07

и приближается к производительности подачи порошка.

Дополнительно показано (см. табл. 4), что применение дисперсной присадки при микроплазменной наплавке является более предпочтительным

по сравнению с присадкой из микропроволоки, так как позволяет снизить эффективную тепловую мощность дуги более чем в 2 раза, погонную энергию — в 1,8 раза, а производительность наплавки повысить в 1,8 раза. Также, исходя из данных работы [15], снижение погонных тепловложений до уровня лазерно-порошковой наплавки при микроплазменной порошковой наплавке возможно с увеличением ее скорости примерно до 22,6 м/ч.

Оценка совместного и отдельного влияния технологических факторов эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги и погонной энергии на форму поперечного сечения валика выполнялась путем анализа целевых функций [18]  $\epsilon_{q_n}$ ,  $\epsilon_{Q_\Sigma/L}$  и  $\epsilon_F$  в виде отношения величин эф-

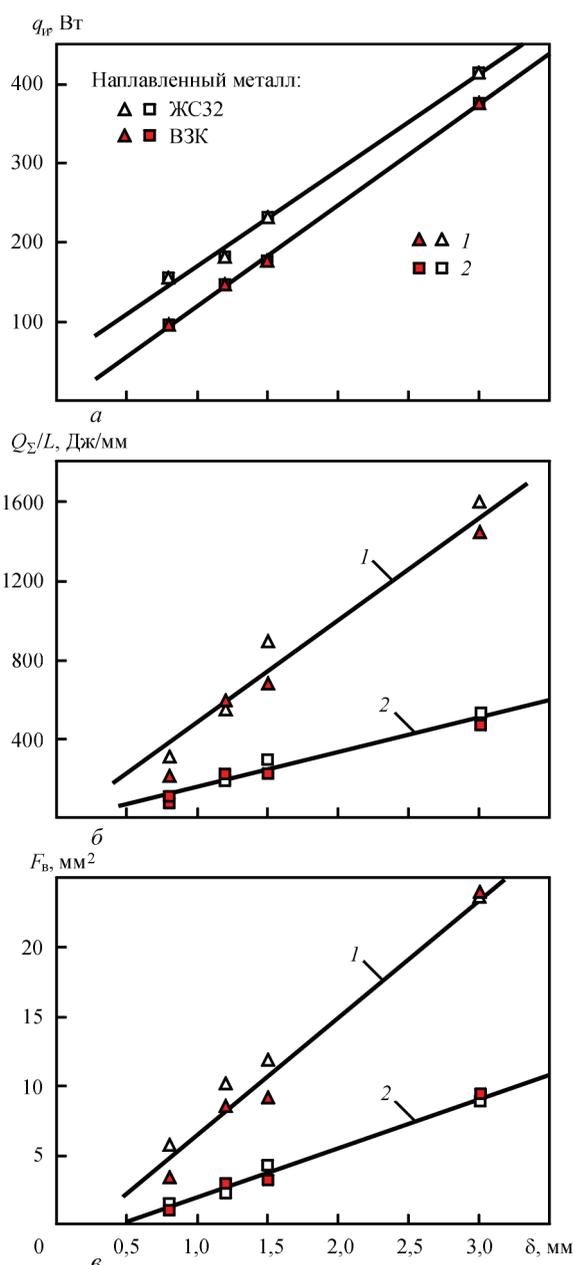


Рис. 5. Влияние ширины узкой подложки  $\delta$  и средней скорости наплавки на эффективную тепловую мощность микроплазменной дуги  $q_n$  (а), погонную энергию  $Q_\Sigma/L$  (б), площадь поперечного сечения наплавленного валика  $F_b$  (в): 1 — 1,2; 2 — 3,6 м/ч. Роботизированная установка Starweld 190Н, постоянная подача порошка, защитный газ Ar

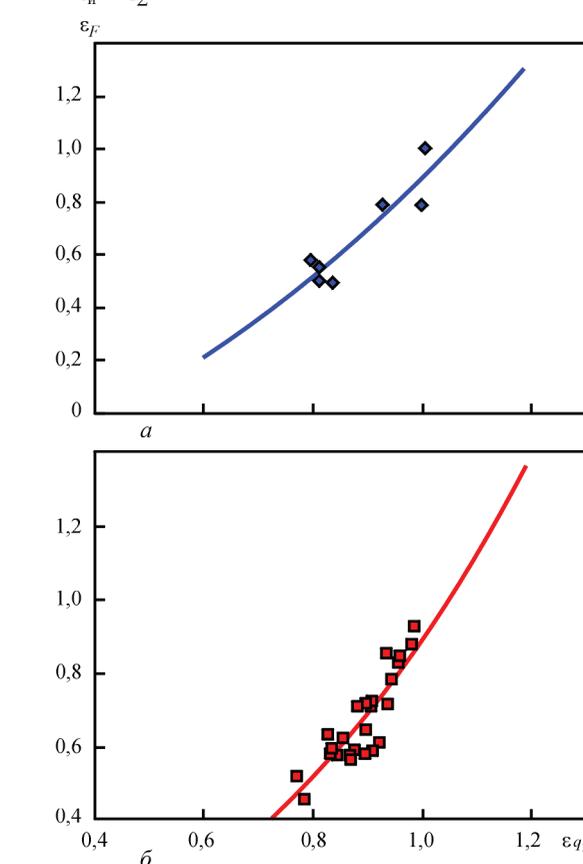


Рис. 6. Зависимость относительной площади поперечного сечения наплавленного валика  $\epsilon_F$  от относительной эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги  $\epsilon_{q_n}$  при микроплазменной порошковой наплавке на узкую подложку: а — сплав ВЗК, установка Starweld 190Н, непрерывная подача порошка, защитный газ Ar,  $\delta = 0,3...3,0$  мм; б — установка УПНС-304М2/М3, порционная подача порошка, защитный газ 95 % Ar + 5 % H<sub>2</sub>,  $\delta = 1,0...2,0$  мм

Т а б л и ц а 4. Сравнение характеристик поперечного сечения валика ( $B, H, \gamma_0$ ), эффективной мощности нагрева изделия  $q_n$ , погонной энергии  $Q_{\Sigma}/L$  и производительности наплавки  $M_n$  при микроплазменной и лазерной наплавке

Процесс наплавки	Наплавляемый материал	$B, \text{мм}$	$H, \text{мм}$	$q_n, \text{Вт}$	$\gamma_0, \%$	$Q_{\Sigma}/L, \text{Дж/мм}$	$M_n, \text{г/мин}$	Источник
Микроплазменная, $\approx 22,6 \text{ м/ч}$	Порошок H13 tool steel	2,0	0,2	$\approx 280^{*1}$	---	$\approx 45^{*1}$	1,0	[15] <sup>*3</sup>
Микроплазменная, $\approx 3,6 \text{ м/ч}$	Проволока AISI P20 $\varnothing 0,3 \text{ мм}$	$1,9 \pm 0,06$	$0,9 \pm 0,04$	400	$5,12 \pm 0,12$	380,95	0,47	[16] <sup>*3</sup>
	Порошок ВЗК, 53...–160 мкм	2,0	1,8	150	$\approx 15$	211,7	0,87	Данная работа <sup>*2</sup>
Yb:YAG Laser $\approx 24 \text{ м/ч}$	Порошок Ti–6Al–4V	$1,9...2,1$	$0,15...0,22$	400	---	48	1,00	[17] <sup>*3</sup>

Примечания: <sup>\*1</sup> – оценка авторов статьи по данным параметров режимов [15]; <sup>\*2</sup> – однослойная наплавка на узкую подложку  $\delta = 1,2 \text{ мм}$ ; <sup>\*3</sup> – многослойная наплавка.

эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги, погонной энергии и площадей поперечного сечения наплавленного валика при текущем режиме наплавки и базовом, соответственно. Базовым режимом, как правило, являлся режим наплавки на постоянном сварочном токе. Значения целевой функции  $\epsilon_F$  оценивали при варьирующихся технологических факторах в виде различных режимов импульсного сварочного тока ( $I_{\text{имп}} < I_0, I_n < I_0$  и  $I_{\text{имп}} > I_0, I_n < I_0$ ) и скорости наплавки, которые учитывались через показатели эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги и погонной энергии. Регрессионные зависимости изменения целевых функций  $\epsilon_F = f(\epsilon_{q_n})$  и  $\epsilon_F = f(\epsilon_{q_n}, \epsilon_{Q_{\Sigma}/L})$  относительно их базового уровня ( $\epsilon_{q_n} = 1; \epsilon_{Q_{\Sigma}/L} = 1; \epsilon_F = 1$ ) представлены в виде двухмерного и трехмерного (контурного) графиков на рис. 6, 7.

Установлено, что снижение эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги на 20 % вызывает уменьшение площади поперечного сечения наплавленного валика на 30...50 % соответственно для сплавов ВЗК и ЖС32. При этом для импульсного сварочного тока соотношения ширины  $B$  к высоте наплавленного валика  $H$ , как правило, находится в пределах 0,7...0,92.

Изменение погонной энергии наплавки (преимущественно за счет ее скорости), особенно в со-

четании с некоторым увеличением эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги, более существенно влияет на форму валика, наплавляемого на узкую подложку (см. рис. 6, 7). При наплавке с непрерывной подачей порошка увеличение погонной энергии в 2...3 раза позволяет на столько же увеличить площадь поперечного сечения валика, а в сочетании с одновременным увеличением эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги на 70 % — до 3,6 раз (см. рис. 7, а). При наплавке с порционной подачей порошка увеличение погонной энергии в 2,5 раза позволяет увеличить площадь поперечного сечения наплавленного валика до 3,5 раз, а в сочетании с одновременным увеличением эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги на 10...30 % — до 5,5...6 раз (см. рис. 7, б). Одновременное снижение эффективной мощности микроплазменной дуги и погонной энергии на 20...30 % относительно базового уровня значений  $\epsilon_{q_n}, \epsilon_{Q_{\Sigma}/L}$  позволяет уменьшить площадь поперечного сечения валика в 1,5...2,0 раза (см. рис. 7).

Проведенный анализ экспериментальных данных, приведенных на рис. 2–7, позволил выделить 3 базовых закона изменения поперечного сечения валика, наплавленного на узкую подложку шириной  $\delta = 0,5...3,0 \text{ мм}$ . Первый из них обусловлен изменением ширины узкой подложки (рис. 8, а)

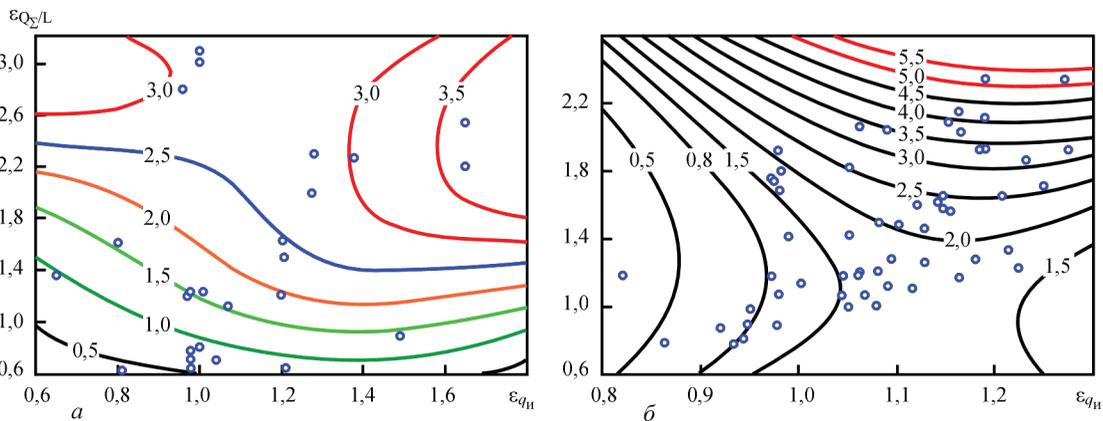


Рис. 7. Контурный график изменения относительной площади поперечного сечения наплавленного валика  $\epsilon_F$  от относительной эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги  $\epsilon_{q_n}$  и относительной погонной энергии микроплазменной наплавки  $\epsilon_{Q_{\Sigma}/L}$ : а — сплава ВЗК, установка Starweld 190Н, непрерывная подача порошка, защитный газ Ar,  $\delta = 0,3...3,0 \text{ мм}$ ; б — установка УПНС-304М2/М3, порционная подача порошка, защитный газ 95 % Ar + 5 % H<sub>2</sub>,  $\delta = 1,0...2,0 \text{ мм}$

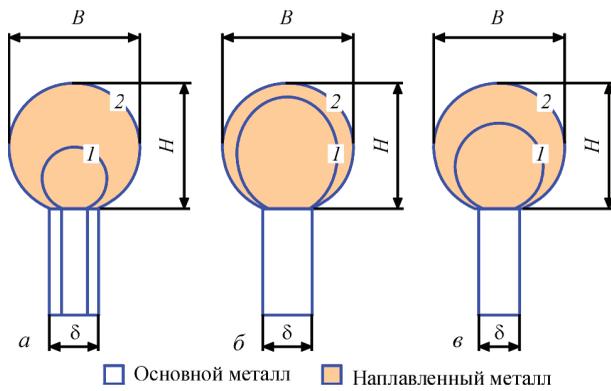


Рис. 8. Базовые закономерности изменения формы поперечного сечения валика при наплавке на узкую подложку в зависимости от: ширины узкой подложки (а), изменяющейся эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги (б), изменяющейся погонной энергии (в); 1→2 — направление изменения сечения валика

при постоянной скорости наплавки: при ее расширении в 6 раз необходимая для наплавки эффективная тепловая мощность микроплазменной дуги увеличивается в 4...8 раз, что сопровождается увеличением площади поперечного сечения валика в 8...12 раз. Второй обусловлен изменением эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги на  $\pm 20\%$  при постоянной ширине узкой подложки и скорости наплавки (рис. 8, б), что сопровождается изменением площади поперечного сечения валика в 1,3...2,0 раза. Третий обусловлен изменением в 3...4 раза погонной энергии наплавки за счет ее скорости при постоянных ширине узкой подложки и эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги (рис. 8, в), что сопровождается соответствующим изменением площади поперечного сечения валика в 3...4 раза. Данные законы изменения поперечного сечения валика, как правило, на практике одновременно сочетаются в той или иной степени.

Ранее для аргонодуговой сварки считалось [2, 3, 10], что технологическая прочность при сварке никелевых жаропрочных сплавов с высоким содержанием упрочняющей  $\gamma'$ -фазы определяется условием предельного ограничения сварочного тока и глубины проплавления основного металла. Опыт использования микроплазменной порошковой наплавки [4–8] свидетельствует, что технологическая прочность при однослойной наплавке кромок лопаток обеспечивается в довольно широком диапазоне параметров режимов ( $I = 2...35$  А,  $v = 0,2...5,0$  м/ч,  $F_b < 30...35$  мм<sup>2</sup>), где глубина проплавления основного металла, как правило, не превышает 1 мм.

Анализ соответствующих режимов наплавки на узкую подложку  $\delta \leq 3$  мм, считающихся близкими к оптимальным, показал, что при изменении площади поперечного сечения наплавляемого валика в 2...4 раза доля основного металла в наплавленном изменяется незначительно и не превышает

15 %. Соответственно, доля тепла, расходуемого на плавление основного металла, не превышает 2,5 % от эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги. Поэтому при переходе к многослойной наплавке кромки лопатки актуально формирование дополнительных критериев обеспечения технологической прочности.

Исходя из установленной в работах [11, 14] взаимосвязи склонности к образованию трещин для рассматриваемых сварных соединений и суммарных тепловложений в изделие, а также из изложенных в данной работе закономерностей управления поперечным сечением наплавляемого валика, таким дополнительным критерием технологической прочности может являться погонная энергия наплавки. Соответственно, с учетом ее величины для определенной ширины узкой подложки и необходимо выбирать площадь поперечного сечения наплавленного слоя при многослойной наплавке.

### Выводы

1. Уточнен технологический диапазон энергетических показателей однослойной микроплазменной порошковой наплавки на узкую подложку шириной менее 3 мм, где при соблюдении прочих технологических рекомендаций обеспечивается технологическая прочность сварного соединения «основной-наплавленный металл», в котором по крайней мере один из материалов является никелевым жаропрочным сплавом и содержит более 55 об. %  $\gamma'$ -фазы: эффективная тепловая мощность микроплазменной дуги — 30...420 Вт; погонная энергия наплавки — 100...1600 Дж/мм; производительность наплавки — 0,3...3,0 г/мин; площадь поперечного сечения наплавленного валика — 1...25 мм<sup>2</sup>.

2. В данном диапазоне в условиях ограниченной глубины проплавления основного металла технологическое управление формой и размерами поперечного сечения наплавляемого валика может осуществляться путем изменения эффективной тепловой мощности микроплазменной дуги, погонной энергии наплавки, рационального выбора химического состава наплавленного металла и способа подачи порошка (порционная, непрерывная). Наиболее эффективными из них при постоянной ширине узкой подложки являются: погонная энергия — изменение до 2,5...4 раз, эффективная тепловая мощность микроплазменной дуги — изменение на 30...50 %, а также их сочетание — изменение до 3,5...6 раз. Выявленные закономерности управления формой валика применяются на АО «Мотор Сич» в условиях серийного ремонта лопаток авиационных ГТД.

3. Дополнительными критериями обеспечения технологической прочности при восстановительной многослойной микроплазменной порошковой наплавке кромок лопаток из никелевых жаропрочных сплавов могут являться величина погонной энергии и связанные с ней высота и площадь поперечного сечения слоя наплавляемого металла.

1. Гладкий П. В. Плазменная наплавка / П. В. Гладкий, Е. Ф. Переpletчиков, И. А. Рябцев. – К.: Екотехнологія, 2007. – 292 с.
2. Перемиловский И. А. Восстановление наплавкой турбинных лопаток авиационных двигателей / И. А. Перемиловский, В. С. Гейченко, И. И. Фрумин // Автоматическая сварка. – 1976. – № 5. – С. 54–56.
3. Петрик И. А. Дальнейшее развитие технологии упрочнения жароміцних нікелевих сплавів з вмістом  $\gamma'$ -фази 45..65 %: автореферат дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології» / О. В. Яровицин. – Київ, ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2009 р. – 21 с.
5. Технологический семинар Deloro Stellite в Запорожье // Автоматическая сварка. – 2010. – № 1. – С. 59–62.
6. Разработка технологии восстановления торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигателя Д18Т методом микроплазменной порошковой наплавки / К. А. Ющенко, В. С. Савченко, А. В. Яровицын [и др.] // Автоматическая сварка. – 2010. – № 8. – С. 25–29.
7. Ющенко К. А. Совершенствование технологии восстановления верхней бандажной полки рабочих лопаток авиационного ГТД / К. А. Ющенко, А. В. Яровицын // Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин»: збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2010–2012 рр. – ІЕЗ ім. Є. О. Патона, Київ, 2012. – 612 с. – С. 506–509.
8. Жеманюк П. Д. Опыт внедрения восстановительной микроплазменной порошковой наплавки при ремонте лопаток турбин высокого давления в условиях серийного производства / П. Д. Жеманюк, И. А. Петрик, С. Л. Чигилейчик // Автоматическая сварка. – 2015. – № 8. – С. 43–46.
9. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. часть II / В. А. Богуслаев, В. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк [и др.]. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2003. – 420 с.
10. Сорокин Л. И. Свариваемость литейных жаропрочных сплавов типа ЖС6 / Л. И. Сорокин, В. И. Лукин, Ю. С. Багдасаров // Сварочное производство. – 1997. – № 6. – С. 12–17.
11. Яровицын А. В. Энергетический подход при анализе режимов микроплазменной порошковой наплавки / А. В. Яровицын // Автоматическая сварка. – 2015. – № 5-6. – С. 18–25.
12. Попов С.А. Шлифовальные работы / С. А. Попов. – М.: Высшая школа, 1987. – 383 с.
13. Профильное глубинное шлифование деталей газотурбинных двигателей / Э. В. Кондратюк, В. А. Леонтьев, А. В. Шуша [и др.] // Промышленность в фокусе. – 2013. – № 5. – С. 22–24.
14. Анализ процесса формообразования валика для условий наплавки на узкую положку / К. А. Ющенко, А. В. Яровицын, Г. Д. Хрущов [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015. – № 9. – С. 22–29.
15. Microplasma powder deposition as a new solid freeform fabrication process / H. Wang, W. Jiang, M. Vallant M. [et al.] // Proc. Instn. Mech. Engrs. – 2003. – vol. 217. – Part B. J. [Engineering Manufacture]. – P. 1641–1650.
16. Jhavar Suyog. Development of micro-plasma transferred arc ( $\mu$ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications / Suyog Jhavar, N. K. Jain, C. P. Paul // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – vol. 214, № 5. – P. 1102–1110.
17. Influence of various process conditions on surface finishes induced by direct metal deposition laser technique on a Ti–6Al–4V alloy/ Gharbi M., Peyre P., Gorny C. [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – vol. 213, № 5. – P. 791–800.
18. Математический энциклопедический словарь / [гл. ред. Ю. В. Прохоров]. – М.: Современная энциклопедия, 1988. – 848 с.

Поступила в редакцию 06.07.2016

14-я МЕЖДУНАРОДНАЯ  
ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПО ГРАЖДАНСКОМУ СУДОСТРОЕНИЮ, СУДОХОДСТВУ,  
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОРТОВ И ОСВОЕНИЮ ОКЕАНА И ШЕЛЬФА

НЕВА 2017

РОССИЯ ■ САНКТ-ПЕТЕРБУРГ ■ 19 – 22 СЕНТЯБРЯ 2017

## ВЛИЯНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ

В. Ю. ХАСКИН<sup>1,2</sup>, В. Н. КОРЖИК<sup>1,2</sup>, Т. Г. ЧИЖСКАЯ<sup>3</sup>, В. Н. СИДОРЕЦ<sup>2</sup>, ЛО ЗИЕ<sup>1</sup>

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

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

<sup>3</sup>НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоя Сикорского», г. Киев-56, пр-т Победы, 37.

В связи с высокой отражающей способностью меди принято считать, что лазерная сварка изделий из этого материала нецелесообразна. Однако в современной промышленности периодически возникают задачи соединения деталей из меди и ее сплавов узкими сварными швами с глубоким кинжальным проплавлением. При этом по техническим причинам использование электронно-лучевой сварки не всегда возможно, а достаточно широкая доступность волоконных (длина волны 1,07 мкм) и дисковых (длина волны 1,03 мкм) технологических лазеров последнего поколения делает задачу лазерной сварки таких материалов актуальной. Поэтому целью работы служило изучение условий поглощения лазерного излучения с длиной волны 1,03...1,07 мкм медью и ее сплавами при лазерной сварке с глубоким проплавлением, а также определение основных параметров режима сварки и оценка эффективности процесса. В работе показано, что для определенного сочетания толщины медного сплава и плотности мощности излучения с длиной волны 1,03...1,07 мкм, существует такая оптимальная скорость процесса сварки, при которой его технико-экономическая эффективность максимальна. Эта скорость должна быть такой, чтобы поглощательная способность (интегральная по пятну лазерного нагрева) составляла порядка 13...15 %. Превышение скорости сварки приводит к резкому снижению поглощательной способности, а, следовательно, необходимости повышения мощности излучения и удорожанию процесса. Уменьшение скорости сварки относительно оптимальной приводит к снижению производительности, перегреву металла в сварочной ванне и к таким дефектам формообразования шва, как провисание и выплески металла. Библиогр. 11, рис. 8.

*Ключевые слова:* лазерная сварка, медь, излучение твердотельного лазера, коэффициент поглощения, мощность излучения, скорость сварки

Одной из актуальных проблем современной науки и техники в области сварки металлов плавлением является создание новых источников тепла, которые позволяют управлять концентрацией тепловой энергии, вводимой в металл в процессе сварки. Это, в конечном итоге, дает возможность обеспечить требуемые производительность сварки, качество получаемого сварного соединения, стабильность процесса и воспроизводимость его результатов. В качестве такого управляемого источника тепла для сварки металлических материалов в последние десятилетия все чаще используется высококонцентрированный лазерный источник, который реализуется путем теплового воздействия на свариваемый металл сфокусированным лазерным пучком [1].

Вместе с тем закономерности влияния лазерного источника тепла на некоторые металлические материалы изучены пока что недостаточно. К таким материалам, в частности, относится медь и ее сплавы. В связи с высокой отражающей способностью меди принято считать, что лазерная сварка изделий из этого материала нецелесообразна. Однако в современной промышленности периодически возникают задачи соединения деталей из меди и ее сплавов

узкими сварными швами с глубоким кинжальным проплавлением. При этом по техническим причинам использование электронно-лучевой сварки не всегда возможно, а достаточно широкая доступность волоконных (длина волны 1,07 мкм) и дисковых (длина волны 1,03 мкм) технологических лазеров последнего поколения делает задачу лазерной сварки таких материалов актуальной [2].

Для решения этой задачи необходимо провести исследование физики процесса воздействия лазерного источника тепловой энергии на свариваемый металл с высокой теплопроводностью и отражающей способностью, которым является медь и ее сплавы, разработать соответствующие математические модели и выполнить компьютерное моделирование указанного процесса. При этом целесообразно оценить эффективность процесса лазерной сварки таких материалов путем определения основных параметров режима, т. е. необходимых затрат мощности излучения для сварки с соответствующей скоростью.

Поэтому целью данной работы является изучение условий поглощения лазерного излучения с длиной волны 1,03...1,07 мкм медью и ее сплавами при лазерной сварке с глубоким проплавлением.

нием, а также определение основных параметров режима сварки и оценка эффективности процесса.

Лазерная сварка характеризуется образованием парогазового канала проплавления в свариваемом металле. В работе [2] детально описано поведение этого канала в процессе сварки. В частности, отмечено, что на его передней стенке существует слой расплавленного металла, испытывающий постоянные «возмущения», как то образование искривления в виде ступеньки, которая периодически перемещается по высоте канала. При этом удаление материала с передней стенки осуществляется послойно при перемещении ступеньки сверху вниз. Это можно объяснить увеличением слоя расплавленного металла на передней стенке, происходящим за счет перехода энергии излучения в выделяющуюся на этой стенке тепловую энергию, в сочетании с происходящими в сварочной ванне гидродинамическими процессами.

Известно, что часть энергии излучения поглощается свариваемым металлом, а часть отражается от него. Доля поглощенного излучения тем больше, чем выше температура металла. Образовавшийся на передней стенке расплав хорошо поглощает излучение, однако за счет перемещения по ходу сварки передняя часть лазерного пучка все время попадает на слабо нагретый металл, что приводит к снижению коэффициента поглощения. Поэтому при лазерной сварке одновременно наблюдаются два процесса:

- улучшение условий поглощения лазерного излучения за счет попадания его на нагретый и расплавленный металл передней стенки парогазового канала, а также улавливания определенной доли излучения за счет его переотражения от стенок канала;

- интенсивное отражение лазерного излучения слабо нагретым металлом, находящимся непосредственно перед парогазовым каналом по ходу сварки.

Для оценки условий поглощения сфокусированного лазерного излучения медью и ее сплавами при лазерной сварке предположим, что плоский образец нагревается источником тепла высокой интенсивности, а пространственное распределение теплового потока, вводимого в образец, симметрично относительно оси, перпендикулярной его поверхности (относительно оси лазерного пучка). Длину волны излучения, применяемого для сварки твердотельного лазера, принимаем равной  $\lambda = 1,06$  мкм, как входящую в исследуемый диапазон  $1,03 \dots 1,07$  мкм.

Для определения температурной зависимости коэффициента поглощения лазерного излучения металлическими материалами  $A(T_s)$  будем рассматривать исследуемый металл (медь) в рамках мо-

дели почти свободных электронов. В этом случае, согласно формулам Друде–Зинера [3], для действительной  $\epsilon_1$  и мнимой  $\epsilon_2$  частей комплексной диэлектрической проницаемости металла на частоте лазерного излучения  $\omega = 2\pi c/\lambda$ , где  $c$  — скорость света,  $\lambda$  — длина волны излучения, имеем:

$$\epsilon_1 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \omega_C^2}; \quad (1)$$

$$\epsilon_2 \omega = 4\pi\sigma = \frac{\omega_C \omega_p^2}{\omega^2 + \omega_C^2}. \quad (2)$$

Здесь  $\omega_p$  — частота плазменных колебаний свободных электронов металла,  $\omega_C$  — частота, численно равная обратному времени релаксации электронов проводимости. Величина плазменной частоты определяется по формуле:

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi n e N_e}{m_e^*}, \quad (3)$$

в которой  $e$  и  $m_e^*$  — заряд и эффективная масса электрона в металле [4]. Концентрация электронов проводимости  $N_e = V/\Omega$  определяется через валентность  $V$  и атомный объем  $\Omega$ . Значение валентности для меди принималось равным двум. Атомный объем был получен на основе экспериментальных данных по плотности меди, приведенных в работе [5].

В предельном случае постоянного поля, когда  $\omega = 0$ , высокочастотная оптическая проводимость  $\sigma$  превращается в статическую проводимость металла:

$$\sigma(0) = \frac{N_e e^2}{m_e \omega_C}. \quad (4)$$

Температурную зависимость частоты релаксации  $\omega_C$  для рассматриваемых металлов в твердом состоянии учитывали с помощью следующей формулы [6]:

$$\omega_C = K T^{\theta/5} \int_0^{\theta/T} \frac{z^4 dz}{e^z - 1}, \quad (5)$$

где  $\theta$  — температура Дебая. Значения  $\omega_C$  и, соответственно,  $K$  при комнатной температуре для меди выбирались в соответствии с данными работы [7]. Для меди в жидком состоянии использовались экспериментальные значения из работ [8, 9]. Полученные таким образом расчетные данные приведены на рис. 1.

Представленная на этом рисунке температурная зависимость имеет характерный разрыв при температуре плавления металла  $T_m$ . По формулам (1) и (2) с использованием (3)–(5) были построены температурные зависимости действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости для меди на частоте излучения твердотельного лазера ( $\lambda = 1,06$  мкм), изображен-

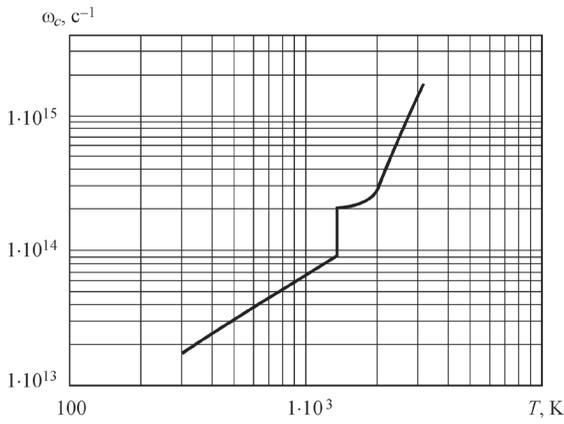


Рис. 1. Зависимость частоты релаксации  $\omega_c$  от температуры  $T$  для меди

ные на рис. 2 (здесь и далее температура выражена в градусах Кельвина).

Для дальнейших расчетов удобно ввести действительную  $n$  и мнимую  $k$  части комплексного показателя преломления металла на частоте лазерного излучения

$$\sqrt{\varepsilon} = \sqrt{\varepsilon_1 + i\varepsilon_2} = n + ik, \quad (6)$$

используя для этого следующие формулы:

$$n = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} + \varepsilon_1}{2}}, \quad (7)$$

$$k = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} - \varepsilon_1}{2}}. \quad (8)$$

Температурные зависимости действительной и мнимой части комплексного показателя преломления для меди представлены на рис. 3.

Используя полученные значения  $n$  и  $k$ , определим коэффициент поглощения лазерного излучения, нормально падающего на плоскую поверхность металла (поглощательную способность), по известной формуле

$$A = \frac{4n}{(1+n)^2 + k^2}. \quad (9)$$

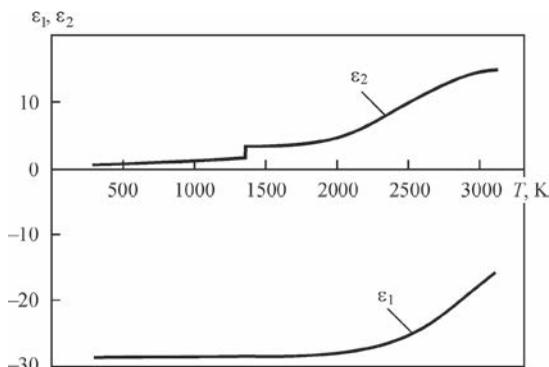


Рис. 2. Зависимости действительной  $\varepsilon_1$  и мнимой  $\varepsilon_2$  частей комплексной диэлектрической проницаемости меди от температуры  $T$  на частоте излучения твердотельного лазера ( $\lambda = 1,06$  мкм)

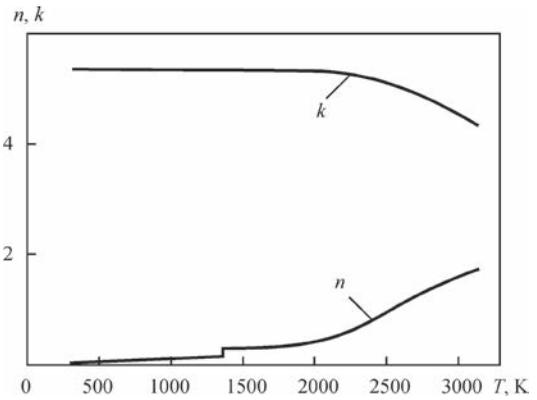


Рис. 3. Зависимости действительной  $n$  и мнимой  $k$  части комплексного показателя преломления меди от температуры  $T$  на частоте излучения твердотельного лазера ( $\lambda = 1,06$  мкм)

В некоторых случаях более важным параметром является коэффициент отражения (отражательная способность), который можно определить по формуле

$$R = 1 - A = \frac{(1-n)^2 + k^2}{(1+n)^2 + k^2}. \quad (10)$$

На рис. 4 представлены результаты расчетов температурных зависимостей коэффициента поглощения излучения твердотельного лазера для меди в диапазоне температур от комнатной до температуры кипения металла  $T_b$  и выше.

Полученная для выбранного типа излучения расчетная зависимость поглощательной способности сравнивалась с имеющимися экспериментальными данными [6–9], при этом совпадение было вполне удовлетворительным. Согласно зависимости, приведенной на рис. 5, для достижения максимальных значений коэффициента поглощения поверхности свариваемого медного сплава в зоне действия лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм, ее следует нагревать до температуры кипения  $T_b$ . Однако даже нагрева до температуры плавления  $T_m$  достаточно для резкого скачкообразного увеличения поглощательной способности с 2,0...2,5 до 4,5...5,0 %.

Для определения распределений температур по глубине и на поверхности свариваемого сфокуси-

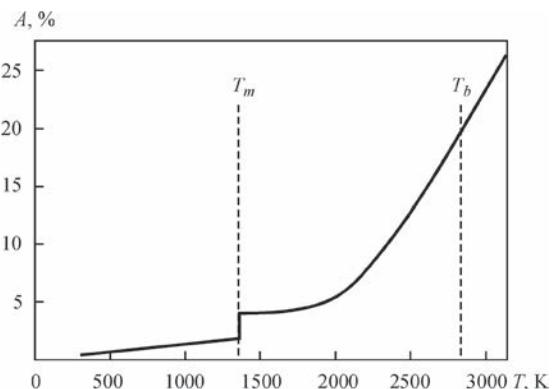


Рис. 4. Зависимости поглощательной способности  $A$  меди от температуры  $T$  для излучения с длиной волны 1,06 мкм

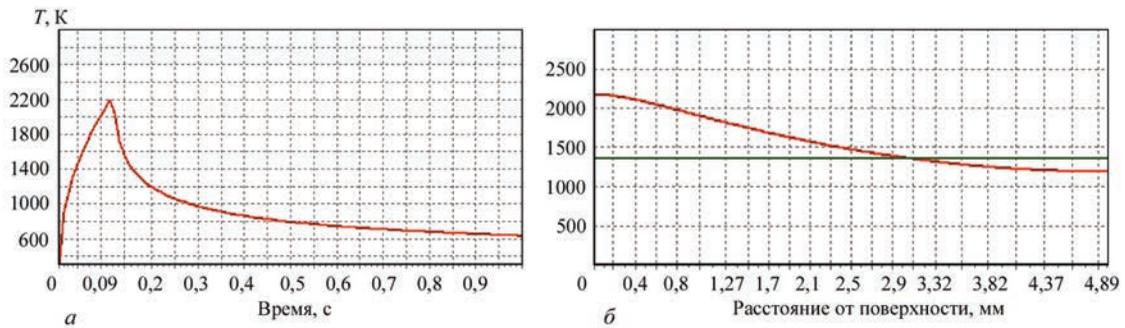


Рис. 5. Распределение температур  $T$  на поверхности (а) и по глубине (б) медной пластины толщиной 5 мм при лазерной сварке излучением твердотельного лазера ( $A = 13\%$ ) с плотностью мощности  $4,5 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> и скоростью  $v_{св} = 90$  м/ч (25 мм/с)

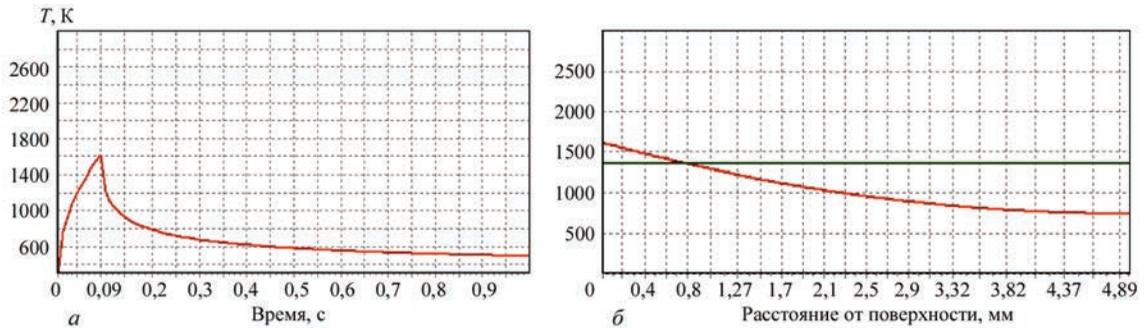


Рис. 6. Распределение температур  $T$  на поверхности (а) и по глубине (б) медной пластины толщиной 5 мм при лазерной сварке излучением твердотельного лазера ( $A = 10\%$ ) с плотностью мощности  $4,5 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> и скоростью  $v_{св} = 120$  м/ч (33,3 мм/с)

рованным лазерным излучением медного образца был проведен расчет методом конечных разностей с привлечением неявной разностной схемы. Для этого применили компьютерный программный продукт собственной разработки, основанный на расчетно-экспериментальной методике, описанной в работе [10]. При проведении расчетов использовали теплофизические характеристики меди, приведенные в работе [11]. Получаемые в процессе компьютерного моделирования данные сравнивались с результатами экспериментов. При проведении последних использовали дисковый лазер модели TruDisk 10002 (фирма «TRUMPF», Германия) мощностью до 10,0 кВт. Для перемещения сварочной головки использовали робот модели KR 60 HA (фирма «KUKA», Германия). Сварку образцов из меди типа M1 размером 100×50×3 мм выполняли в защите аргона наплавочными швами и встык с плотностью мощности лазерного излучения  $4,5 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>.

Исследования показывают, что для фиксированной толщины провариваемого образца (в нашем случае  $\delta = 3$  мм) можно подобрать такую скорость сварки  $v_{opt}$ , при которой не более одной трети длины теплового источника (т. е. диаметра лазерного излучения) постоянно действует на твердую поверхность меди, находящуюся непосредственно перед парогазовым каналом по ходу сварки. В этой области поглощательная способность поверхности  $A$  изменяется от 2,0 до 5,0 %. Примерно две трети длины теплового источника (т. е. диаметра лазерного излучения) в таком случае будут попадать в парогазовый канал, тем-

пература в котором достигает не менее 2900 К, а поглощательная способность — 19...20 %. Такая скорость сварки составляет порядка  $v_{opt} \approx 25$  мм/с (90 м/ч). Она обеспечивает интегральную по пятну лазерного нагрева поглощательную способность в пределах 13...15 %. В этом случае глубина провара составит не менее 3 мм (см. рис. 5).

С повышением скорости сварки  $v_{св} \geq v_{opt}$  доля лазерной энергии, приходящаяся на область с низкой поглощательной способностью, будет повышаться, а часть этой энергии, приходящаяся на область с высокой поглощательной способностью, наоборот — падать. Это приведет к снижению интегральной поглощательной способности менее 13 % и, следовательно, необходимости повышения мощности лазерного излучения. Последний момент приведет к росту стоимости погонного метра сварного шва и соответственному понижению технической и экономической эффективности процесса. В этом случае глубина провара составит значительно меньше необходимых 3 мм, что приведет к непровару (рис. 6).

С понижением скорости сварки относительно выбранной ( $v_{св} \leq v_{opt}$ ) большая часть излучения будет попадать в парогазовый канал, и поглощательная способность повысится свыше 15 %. Однако в этом случае производительность процесса снизится ( $v_{св} \leq 16,7$  мм/с или  $v_{св} \leq 60$  м/ч), и он станет менее эффективным. В этом случае глубина провара значительно превысит необходимые 3 мм, что приведет к таким дефектам формообразования, как провисание и выплески металла шва (рис. 7).

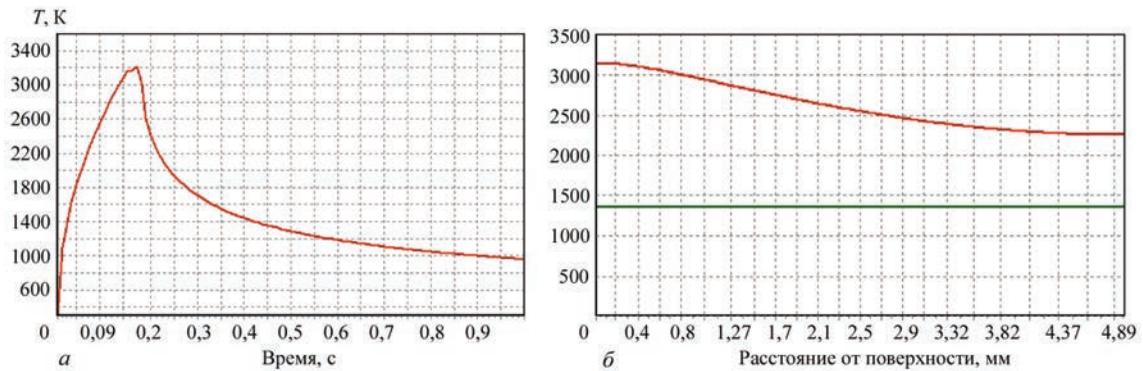


Рис. 7. Распределение температур  $T$  на поверхности (а) и по глубине (б) медной пластины толщиной 5 мм при лазерной сварке излучением твердотельного лазера ( $A = 17\%$ ) с плотностью мощности  $4,5 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> и скоростью  $v_{св} = 60$  м/ч (16,7 мм/с)



Рис. 8. Стыковое соединение листовой меди М1 ( $\delta = 3$  мм), полученное лазерной сваркой в аргоне излучением с плотностью мощности  $4,5 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> и скоростью  $v_{св} = 90$  м/ч (25 мм/с): а — верх; б — низ

Для выполнения экспериментальной проверки спрогнозированных результатов лазерной сварки на плоских образцах выполняли наплавочные швы, затем измеряли глубину проваров по макрошлифам и сопоставляли с расчетными данными. Кроме этого, на расчетных режимах сваривали стыковые соединения (рис. 8). Такая проверка позволила установить, что точность расчетов составляет порядка 5...8 %, что в случае технологических расчетов является удовлетворительным показателем.

Таким образом, изучение условий поглощения лазерного излучения с длиной волны 1,03...1,07 мкм при сварке с глубоким проплавлением меди и ее сплавов позволяет утверждать, что для определенного сочетания толщины свариваемого материала и плотности мощности излучения существует такая оптимальная скорость процесса, при которой его технико-экономическая эффективность максимальна. Эта скорость соответствует интегральной по пятну лазерного нагрева поглощательной способности порядка 13...15 %. Превышение скорости сварки приводит к резкому снижению поглощательной способности, а, следовательно, необходимости повышения мощности излучения и удорожанию процесса. Уменьшение скорости сварки относительно опти-

мальной приводит к снижению производительности, перегреву металла в сварочной ванне и к таким дефектам формообразования шва, как провисание и выплески металла.

*Работа выполнялась при поддержке Программы иностранных экспертов КНР № WQ20124400119, Программы инновационной группы провинции Гуандун КНР № 201101C0104901263, Гуандунского научно-технического проекта № 2015A050502039, Гуандунского научно-технического проекта № 2016B050501002.*

1. Григорьянц А. Г. Лазерная техника и технология; в 7 кн.; кн. 5. Лазерная сварка металлов: учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов; под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: Высшая школа, 1988 – 207 с.
2. Бернадский В. Н. Современный рынок лазерной техники для сварки и обработки материалов / В. Н. Бернадский, В. Д. Шелягин, О. К. Маковецкая // Автоматическая сварка. – 2007. – № 10. – С. 53–59.
3. Носков М. М. Оптические и магнитооптические свойства металлов / М. М. Носков. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. – 219 с.
4. Киселев А. И. Эффективная масса электронов в расплавах алюминия, цезия и бинарной системы Al–3 at % Ce / А. И. Киселев, Л. А. Акашев, В. И. Кононенко // Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74, Вып. 3. – С. 20–23.
5. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справочник / В. Е. Зиновьев. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
6. Ujihara K. Reflectivity of metals at high temperatures / K. Ujihara // Journal of Applied Physics. – 1972. – Vol. 43, № 5. – P. 2376–2383.
7. Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared / M. A. Ordal, L. L. Long, R. J. Bell [et. al] // Applied Optics. – 1983. – Vol. 22, № 7. – P. 1099–1119.
8. Miller J. Optical properties of liquid metals at high temperatures / J. Miller // Phil. Mag. – 1969. – Vol. 20, Is. 168, № 12. – P. 1115–1132.
9. Comins N. R. The optical properties of liquid metals / N. R. Comins // Phil. Mag. – 1972. – Vol. 25, Is. 4. – P. 817–831.
10. Хаскин В. Ю. Расчетно-экспериментальный метод определения параметров режимов процессов лазерной наплавки / В. Ю. Хаскин // Наука та інновації. – 2012. – Т. 8, № 6. – С. 5–16.
11. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справочник / В. Е. Зиновьев. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.

Поступила в редакцию 11.10.2016

# ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ

Ю. Н. ЛАНКИН, В. Г. СОЛОВЬЕВ

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

Разработана информационно-измерительная система для дуговой сварки и наплавки, которая позволяет автоматически определять зоны состояния процесса, т. е. зону зажигания дуги, горения дуги, короткого замыкания, холостого хода и обрыва дуги, тем самым исключая субъективность в идентификации зон, и получать более расширенный рассчитываемый набор статистических параметров для каждого из состояний. Для этого используется оцифровка сигналов тока и напряжения сварки, компьютерная обработка по алгоритмам автоматического распознавания и кластеризации зон состояния периодов, использующим эмпирические правила, анализ гистограмм распределения сигналов тока и напряжения по отдельности, а также гистограмм их совместного распределения. Построенная информационно-измерительная система для дуговой сварки и наплавки на базе АЦП E14-440 и ноутбука позволяет вычислить 29 статистических параметров, характеризующих процесс. Информационно-измерительная система выполняет автоматическую идентификацию состояния процесса сварки/наплавки, тем самым исключая влияние человеческого фактора на полученные оценки статистических параметров процесса. Библиогр. 11, табл. 4, рис. 8.

*Ключевые слова:* информационно-измерительная система, сварочный процесс, сварка, наплавка, кластеризация, состояния процесса сварки, короткие замыкания дуги, обрывы дуги

Из всех параметров основной объем информации о сварочном процессе несут электрические параметры: ток сварки  $I_{св}$  и напряжение на дуге  $U_{д}$ . При этом они наиболее доступны для измерения. Поэтому в подавляющем большинстве случаев для исследования процессов сварки/наплавки используются  $I_{св}$  и  $U_{д}$ , а для их измерения, регистрации, обработки и визуализации созданы многочисленные информационно-измерительные системы (ИИС). Измерение и анализ электрических параметров процесса дуговой сварки/наплавки используется для контроля качества, определения свойств, выбора режима и регулирования процесса.

Состав всех ИИС в основном одинаков: датчики контролируемых параметров, нормирующие измерительные преобразователи уровня сигнала, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), устройство обработки и визуализации данных, программное обеспечение. В исследовательской практике ИИС чаще всего собираются из покупных перечисленных модулей. Известны и коммерчески доступные ИИС, например, ADAM III, Arc Guard, Weldcheck [1], Hannover XV (АН XV) [2], DAREG [3], ARCDATA LQ-1N [4], ARCDATA LQ-2 [5], Arcwatch<sup>TM</sup> [6], АПН-1, АПН-2 [7].

Анализ записей тока сварки и напряжения на дуге проводится, как правило, стандартными статистическими методами, причем число анализируемых показателей крайне ограничено.

Во время сварки можно выделить несколько состояний процесса (рис. 1): холостой ход свароч-

ного источника (ХХ), зажигание дуги (ЗД), установившийся дуговой процесс с периодическими короткими замыканиями (КЗ), периодами горения (ГД) и обрывами дуги (ОД). Каждое из этих состояний характеризуется своими статистическими показателями и пороговыми уровнями би-наризации для определения их начала и конца. Обычно исследуется только установившийся дуговой процесс, для чего практически во всех ИИС приходится вручную выбирать соответствующие фрагменты записей. Это существенно влияет на результаты последующей статистической обработки данных, делая их зависимыми от конкретного исследователя, условий записи электрических сигналов, выбранного для обработки фрагмента записи. Приятным исключением являются работы [8, 9], где для ИИС аттестации сварочных источников, по-видимому, решена задача автоматической идентификации состояния процесса сварки плавящимся электродом путем кластеризации данных тока и напряжения.

Ниже описана ИИС дуговой сварки, отличающаяся от известных автоматическим определением зон состояния процесса сварки и расширенным набором рассчитываемых статистических параметров для каждого состояния процесса [10].

**Сбор данных.** Измерения и запись сварочного тока и напряжения дуговой сварки проводится с помощью универсального модуля АЦП E14-440 (шина USB2), который особенно удобен для создания портативных измерительных систем на базе

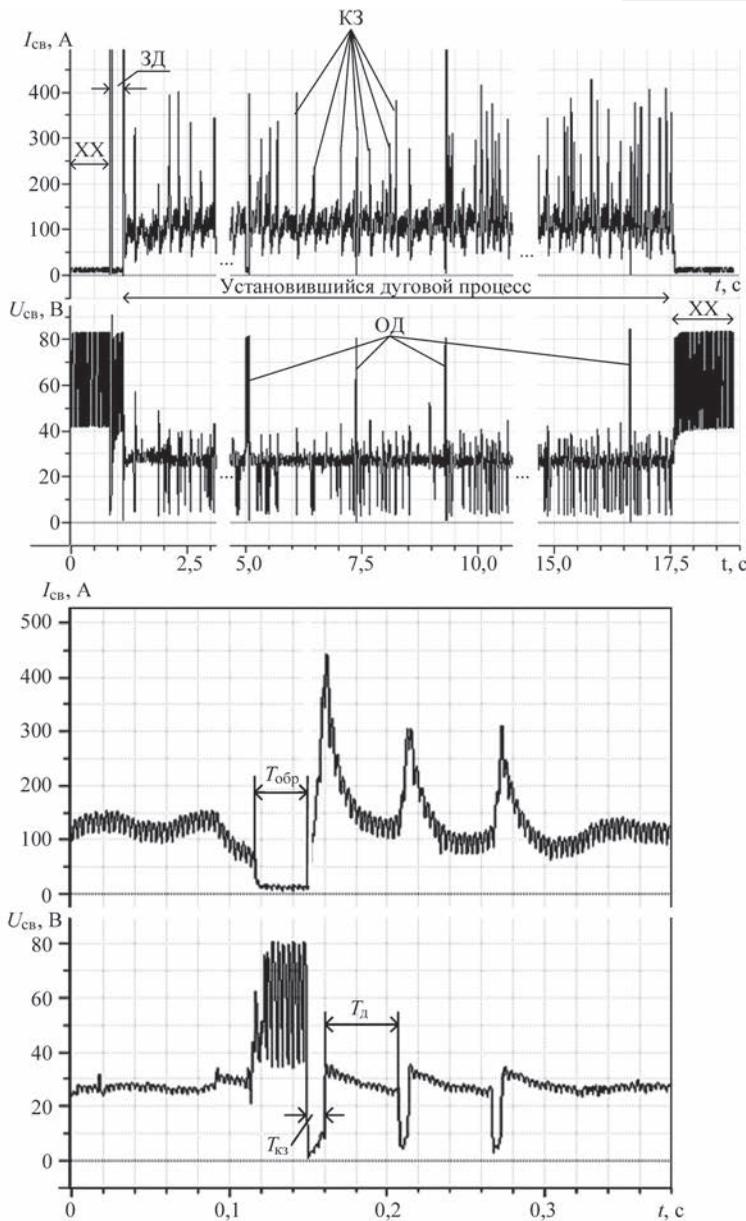


Рис. 1. Запись процесса дуговой сварки в  $CO_2$

ноутбука. В табл. 1 приведены режимы дуговой наплавки проволокой диаметром 1,6 мм в  $CO_2$ , а в табл. 2 — в смеси защитных газов (82 % Ar + 18 %  $CO_2$ ).

Для АЦП требования к уровню квантования и интервалу дискретизации сигналов напряжения источника  $U_{св}$  и тока источника  $I_{св}$  определяются требованием к точности определения средне ква-

Таблица 1. Режимы дуговой наплавки проволокой диаметром 1,6 мм в  $CO_2$

Номер режима дуговой наплавки	Скорость подачи проволоки, м/ч	Напряжение источника $U_{св}$ , В	Ток источника $I_{св}$ , А
1	160	26	120
2	330	28...29	220
3	220	27...28	150
4	420	30	260
5	460	60	270...280

дратичного отклонения (СКО) напряжения КЗ —  $\sigma_{U_{кз}}$  и СКО длительностей КЗ —  $\sigma_{T_{кз}}$ . Предварительные оценки  $\sigma_{U_{кз}}$  и  $\sigma_{T_{кз}}$  показали, что  $\sigma_{U_{кз}}$  составляет примерно 2 В, а  $\sigma_{T_{кз}}$  — 5 мс. Поскольку для технологических параметров обычно достаточно точность порядка 1 %, ограничились ошибкой измерения  $\sigma_{U_{кз}} = 0,02$  В, а  $\sigma_{T_{кз}} = 0,05$  мс.

Максимальная частота преобразования АЦП Е14-440 при оцифровке двух параметров составляет 200 кГц, а разрядность — 14 бит, то есть интервал дискретизации — 0,005 мс, а уровень квантования — 0,05 %. Это с избытком удовлетворяет приведенным выше требованиям. Для ограничения величины получаемых записей выбрана минимально допустимая частота дискретизации 20 кГц.

**Обработка данных.** Для компьютерной обработки записанных с помощью модуля Е14-440 и программного обеспечения «PowerGraph» сигналов  $I_{св}$  и  $U_{св}$  разработаны алгоритмы автоматического распознавания периодов XX, ЗД, КЗ, ГД и обрыва дуги ОД, использующие эмпирические правила, анализ гистограмм распределения сигналов  $I_{св}$  и  $U_{св}$  по отдельности, анализ гистограмм совместного распределения  $I_{св}$  и  $U_{св}$ .

Очевидными признаками сигналов  $I_{св}$  и  $U_{св}$ , которые можно использовать при кластеризации данных для выделения периодов процесса сварки, являются следующие:

- повышенная скорость изменения сигнала  $I_{св}$  и  $U_{св}$  в момент возникновения КЗ;
- «нулевое» или близкое к нулю значение  $I_{св}$  и повышенное значение  $U_{св}$  в периоды XX или ОД;
- повышенное значение  $I_{св}$  и пониженное значение  $U_{св}$  в период КЗ;

Таблица 2. Режимы дуговой наплавки в смеси газов 82 % Ar + 13 %  $CO_2$

Номер режима дуговой наплавки	Скорость подачи проволоки, м/ч	Напряжение источника $U_{св}$ , В	Ток источника $I_{св}$ , А
1	220	28	170...180
2	25	18...20	40...50
3	155	28	120
4	225	30	150
5	325	30	200
6	520	30	250
7	450	40	250

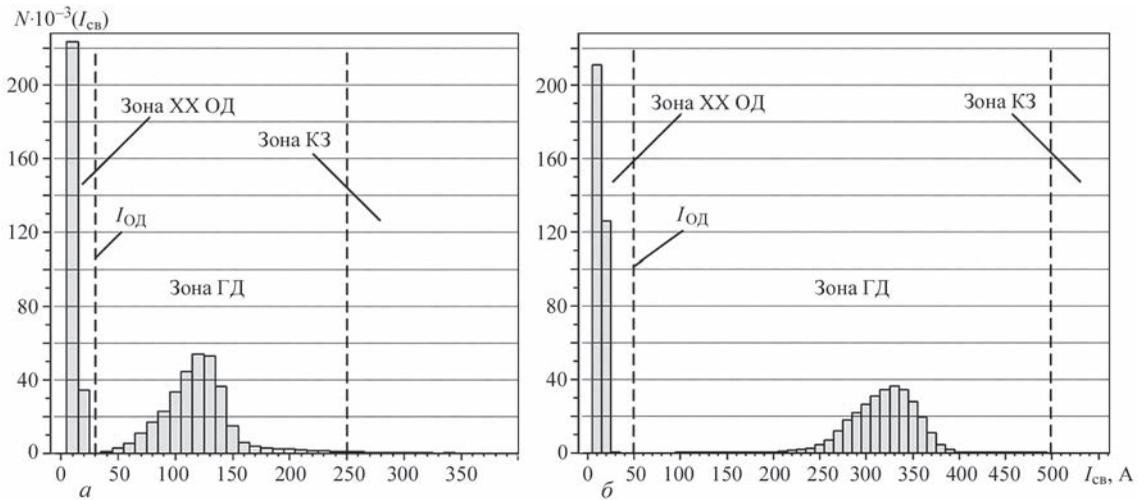


Рис. 2. Гистограмма плотности распределения  $N$  значений  $I_{св}$  для процессов сварки в  $CO_2$  1 (а) и 5 (б) (см. табл. 1)

- относительно средние значения  $I_{св}$  и  $U_{св}$  в период ГД;
- период ХХ характерен только для начала и/или конца записей сигналов;
- период ОД возникает только после периодов ГД или КЗ;
- период ОД, который превышает некий временной предел, является ХХ;
- период ЗД начинается при первом КЗ, а заканчивается при первом появлении периода установившегося процесса ГД;
- с момента начала первого периода ГД и до момента начала периода ХХ в конце записи, наблюдается установившийся процесс сварки;
- «нулевые» значения  $I_{св}$  и  $U_{св}$  свидетельствуют об отключенном источнике.

В связи с тем, что  $U_{св}$  в период ХХ в некоторых случаях может изменяться в больших пределах и с достаточно большой скоростью (частота изменения 300 Гц), начало периода ЗД  $t_n$  определяется не по первому «резкому», превышающему некий порог, изменению сигналов  $I_{св}$  и/или  $U_{св}$ , а по изменению уровня  $I_{св}$  в соответствии со следующим алгоритмом:

$$t_n = \begin{cases} \frac{\bar{I}_i}{\bar{I}_{i-1}} > \infty & (\text{при } t \geq t_k) \\ \frac{\bar{I}_i}{\bar{I}_{i-1}} \leq \infty & (\text{при } t < t_k) \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\bar{I}_i = \bar{I}_{i-1} + \frac{I_i}{N} - \frac{I_{i-N}}{N}$ ;  $I_i$  —  $i$ -ое значение  $I_{св}$ ;  $\bar{I}_i$  —  $i$ -ое значение усредненного значения  $I_{св}$ ;  $\infty$  — постоянная величина, определяемая в результате экспериментов (принято  $\infty = 2$ );  $N$  — количество отсчетов, определяющих интервал скользящего усреднения (принято  $N = 100$ ).

По такому же алгоритму определяется и момент окончания установившегося процесса сварки  $t_k$  и, соответственно, момент начала ХХ в конце наблюдения с тем лишь отличием, что скользящее

усреднение необходимо реализовать в обратную сторону — от конца к началу.

Предварительная идентификация состояний процесса КЗ, ГД и ОД производится на основе анализа гистограмм распределения плотности вероятности сигналов  $I_{св}$  и  $U_{св}$ .

Для конкретности рассмотрим два процесса в  $CO_2$  — 1 и 5. Процесс 1 (рис. 1), характерен большим количеством обрывов дуги и достаточно быстрым зажиганием, а 5 отличается длительным периодом ЗД и длительной записью периода ХХ в конце процесса.

Как видно из рис. 2, а, б, гистограммы сильно отличаются диапазонами изменений тока и модами, но имеют одинаковый характер плотности распределения. В обоих случаях присутствуют три характерных участка, которые как бы разделяют весь диапазон изменения токов на три зоны. Для процесса 1 — это диапазоны 0...30, 30...250 и 250...860 А. Для процесса 5 — это диапазоны 0...50, 50...500 и 500...1060 А.

То же самое можно сказать и о гистограммах напряжений для процесса 1 (рис. 3) и 5 (рис. 4). Для 1 — это диапазоны 0...17, 17...40 и 40...90 В, а для 5 — 0...43, 43...65 и 65...107 В.

Очевидно, что эти зоны представляют собой три различных состояния процесса сварки: КЗ, ГД, ХХ или ОД. Обозначим границы зон следующим образом:

$U_{кд}$  — граница разделения зон КЗ и ГД;  
 $U_{до}$  — граница разделения зон ГД и ХХ или ОД;

$I_{од}$  — граница разделения зон ГД и ХХ или ОД.

Для определения границ зон  $U_{кд}$  и  $U_{до}$  логично двигаться влево и вправо от моды зоны ГД до первых минимумов плотности распределения напряжений. Поскольку горение дуги наиболее вероятное состояние при дуговой сварке, то в качестве приближения моды зоны ГД можно принять моду всего диапазона плотности распределения. Одна-

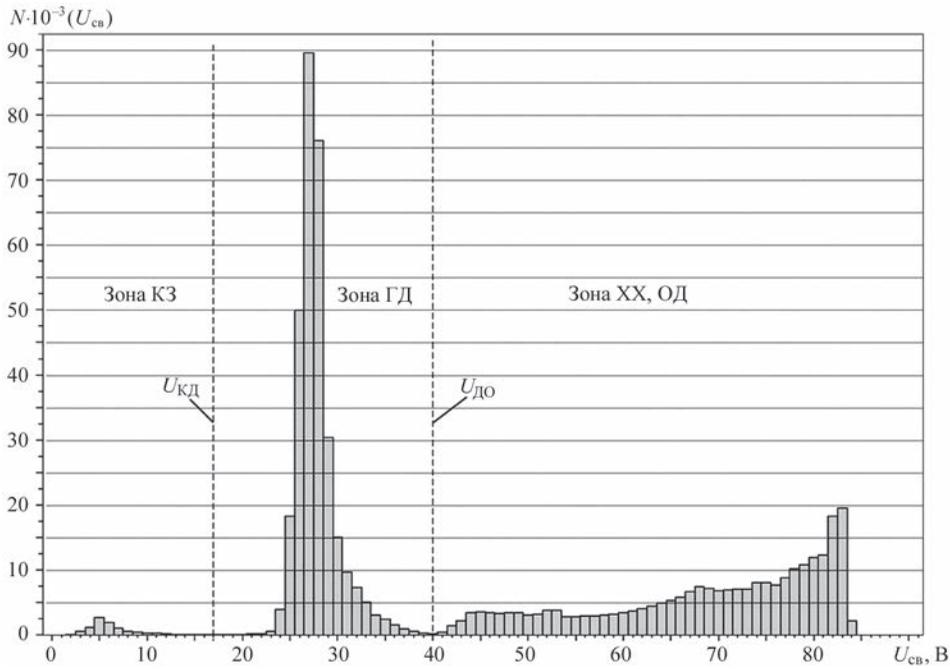


Рис. 3. Гистограмма плотности распределения  $N$  значений  $U_{св}$  для процесса сварки 1 в  $CO_2$

ко в исследовательской практике иногда длительность ХХ может превысить длительность ГД, в результате чего мода всей реализации находится в зоне ХХ и ОД (рис. 5). Поэтому запись наблюдения перед компьютерной обработкой необходимо «очищать» от лишних периодов ХХ. Достаточно, чтобы периоды ХХ в начале и в конце записи не превышали 1 с при общей длительности записи более 10 с.

Для «очищения» записи от лишних периодов ХХ автоматически удаляются все записи, сделанные за 1 с до  $t_n$ , и через 1 с после  $t_k$ . На рис. 5 представлена гистограмма плотности распределения напряжения после «очищения».

Гистограмма плотности распределения тока после «очищения» для процесса 5 представлена на рис. 6. Как видим, по сравнению с гистограм-

мой, изображенной на рис. 3, б, частота появления значений тока в зоне ХХ и ОД значительно уменьшилась, но не до такой степени, чтобы считать моду всей записи модой зоны ГД. Это связано с тем, что ток в периоды ХХ и ОД имеет малый разброс значений, что увеличивает плотность распределения тока в этой зоне.

Указанное обстоятельство не позволяет использовать такой же алгоритм поиска границ разделения зон для токов, как и для напряжений. В данном случае предлагается использовать отличительное свойство гистограммы токов от гистограммы напряжений — зона ХХ и ОД на гистограмме токов значительно уже зон КЗ и ГД. Если предположить, что зона ХХ и ОД находится в пределах от 0 до 40 А и сузить поиск границы  $I_{од}$  в этих пределах, то он сведется к поиску моды и градиентному спуску вправо

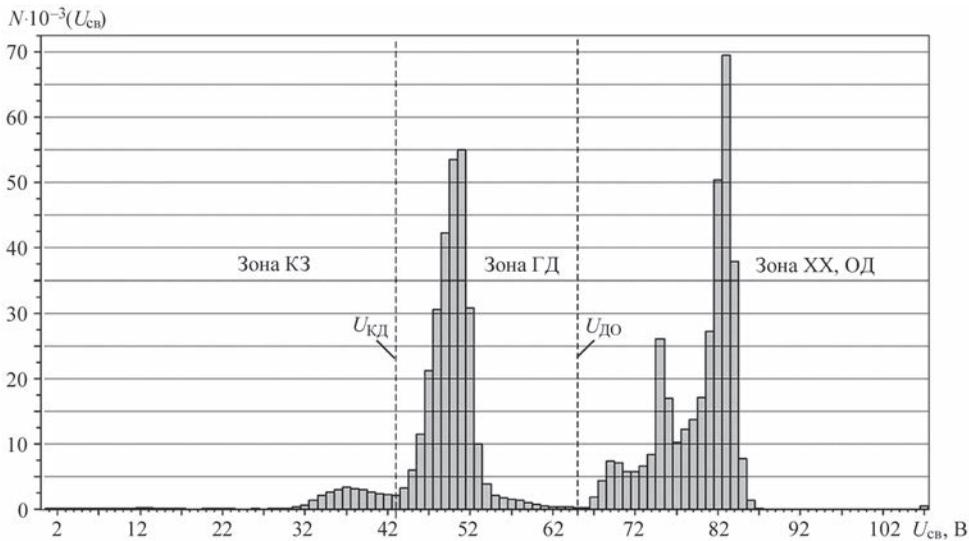


Рис.4. Гистограмма плотности распределения  $N$  значений  $U_{св}$  для процесса сварки 5 в  $CO_2$

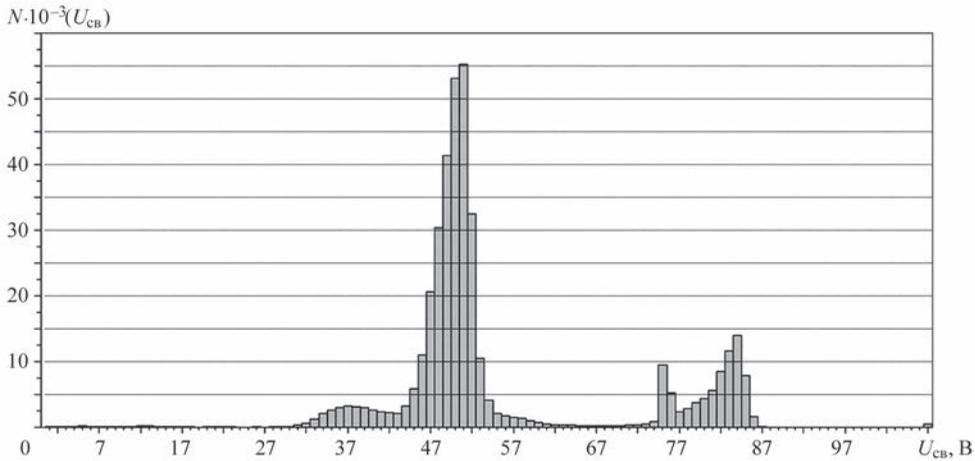


Рис. 5. Гистограмма плотности распределения  $N$  значений  $U_{св}$  для процесса сварки 5 в  $CO_2$  после «очистения»

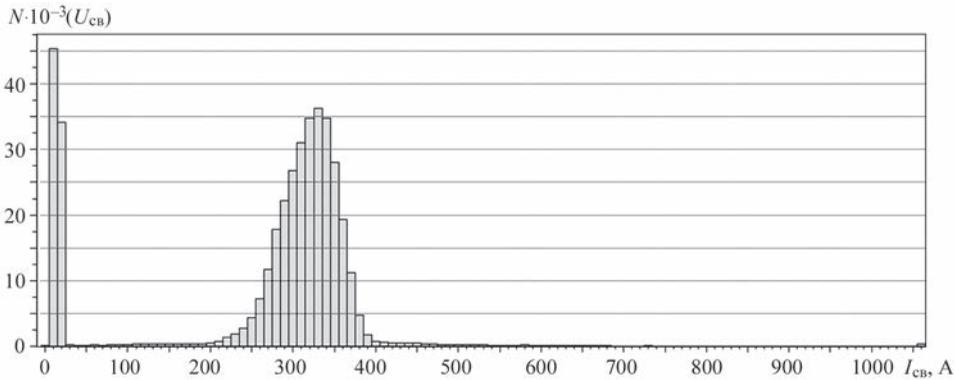


Рис. 6. Гистограмма плотности распределения  $N$  значений  $I_{св}$  для процесса сварки 5 в  $CO_2$  после «очистения»

от моды до достижения минимума. Поиск границы разделения зон ГД и КЗ на гистограмме тока теряет смысл в связи с «расплывчатостью» границы.

Границы трех зон, определенные по гистограммам тока и напряжения, являются весьма неточными, так как зоны пересекаются друг с другом и сигнал со значением уровня, примерно соответствующим границе разделения зон, может относиться как к одной, так и к другой зоне. Повысить точность определения границы разделения зон позволяет анализ совместной плотности распределения  $I_{св}$  и  $U_{св}$  (рис. 7).

На графике отчетливо видны зоны горения дуги и КЗ. Зона холостого хода заметна хуже, так как обрывы в процессе 3 отсутствуют (см. табл. 3), а периоды холостого хода здесь «очищены». Между зонами практически ровная поверхность, что свидетельствует о том, как редко появляются сочетания  $I_{св}$  и  $U_{св}$  в эти местах.

Граница  $L_{ГД-КЗ}$  между зонами КЗ и ГД определяется как проекция на плоскость  $(I_{св}, U_{св})$  траектории движения некоторой точки в 3-х мерном пространстве, движущейся в определенном направлении от заданного места по алгоритму «поиска пути наименьшего сопротивления». Поверхность в пространстве  $(I_{св}, U_{св}, N(I_{св}, U_{св}))$ , где  $N(I_{св}, U_{св})$  — значение плотности совместного распределения  $I_{св}, U_{св}$ , задана в табличном виде.

В качестве начальной точки для поиска границы приняты координаты точки  $A$  (см. рис. 7) с полученным выше значением  $U_{кд}$  и «нулевым» током, т. е.  $A(0, U_{кд}, N(0, U_{кд}))$ . Траектория  $L_{ГД-КЗ}$  проводится так, чтобы при движении от точки  $A$  в сторону увеличения значения тока на каждом шаге  $i$  значение  $N(I_{св}(i), U_{св}(j))$  было наименьшим среди соседних значений  $N(I_{св}(i), U_{св}(j-1))$  и  $N(I_{св}(i), U_{св}(j+1))$ .

Аналогичным образом находится граница между зонами ОД и ГД. В качестве начальной точки для поиска границы берется точка  $B(I_{од}, U_{кд}, N(I_{од}, U_{кд}))$ . Траекторию  $L_{ГД-ХХ}$  от точки  $B$  в сторону уве-

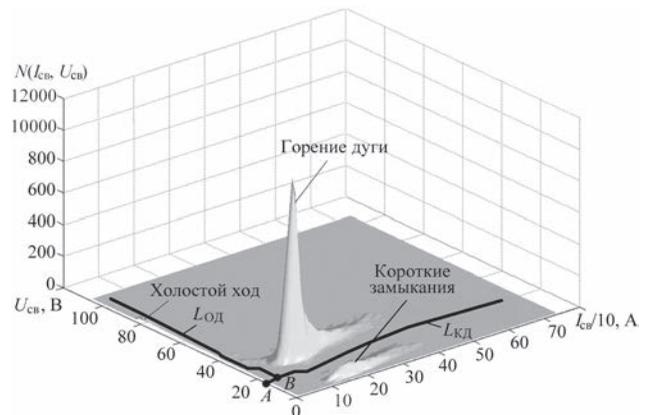


Рис. 7. График функции совместной плотности распределения  $I_{св}$  и  $U_{св}$  для процесса сварки 3 в  $CO_2$

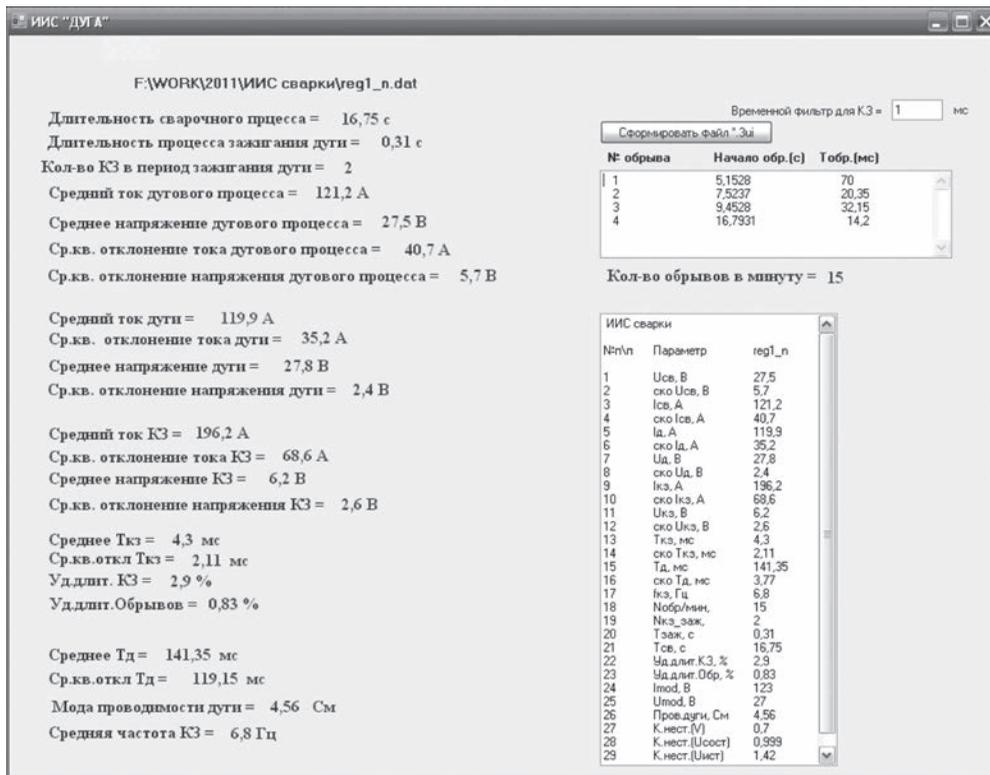


Рис. 8. Форма представления информации о параметрах сварочного процесса 1 в CO<sub>2</sub>

личения значения напряжения проводится так, чтобы на каждом шаге  $j$  значение  $N(I_{св}(i), U_{св}(j))$  было наименьшим среди соседних значений  $N(I_{св}(i-1), U_{св}(j))$  и  $N(I_{св}(i+1), U_{св}(j))$  (см. рис. 7).

**ИИС параметров сварочного процесса.** Для расчета основных параметров сварочного процесса создана программа обработки бинарного файла 2-х канальной записи сварочного тока и напряже-

ния, полученного с помощью ПО «PowerGraph». Основная форма программы приведена на рис. 8.

Порядок расчета параметров сварочного процесса следующий.

1. Выполняется фильтрация сигналов:

– удаление кратковременных (до 0,1 мс) выбросов для  $I_{св}$ ;

Таблица 3. Параметры процесса сварки в CO<sub>2</sub>

Параметры процесса сварки в CO <sub>2</sub>	Номер процесса				
	1	2	3	4	5
Длительность сварочного процесса, с	16,8	19,9	14,0	16,6	17,7
Длительность ЗД, с	0,31	0,31	0,34	0,23	2,68
Количество КЗ в период ЗД	2	2	3	2	15
Средний ток дугового процесса, А	121	231	167	283	317
Среднее напряжение дугового процесса, В	27,5	28,9	26,8	30,8	48,7
СКО тока дугового процесса, А	40,7	62	55,6	84,9	42,9
СКО напряжения дугового процесса, В	5,7	7,1	7,3	7,8	5,6
Средний ток дуги, А	120	226	162	274	318
СКО тока дуги, А	35,2	53,8	48,8	69	37,6
Среднее напряжение дуги, В	27,8	30,7	28,8	32,9	48,7
СКО напряжения дуги, В	2,4	2,9	2,7	3,8	4,8
Средний ток КЗ, А	196	287	218	362	308
Среднее напряжение КЗ, В	6,2	10,1	7,1	12,9	12,4
СКО напряжения КЗ, В	2,6	3,2	2,6	4,1	4,3
Средняя длительность КЗ, мс	4,29	4,01	4,61	3,69	3,11
СКО длительности КЗ, мс	2,1	1,4	1,3	2,3	1,3
Средняя длительность дуги, с	0,14	0,0	0,05	0,03	0,87
СКО длительности дуги, с	0,119	0,033	0,026	0,0217	2,545
Средняя частота КЗ, Гц	6,75	21,7	19,3	27,5	1,1
Среднее количество ОД в мин	15	0	0	0	12

Таблица 4. Параметры процесса сварки в смеси CO<sub>2</sub> с аргоном

Параметры процесса сварки в смеси CO <sub>2</sub> и Ar	Номер процесса						
	1	2	3	4	5	6	7
Длительность сварочного процесса, с	16,9	19,8	16,5	14,9	12,0	13,3	21,9
Длительность ЗД, с	0,45	2,02	0,39	0,0	0,0	0,22	3,09
Количество КЗ в период ЗД	2	7	2	1	1	2	10
Средний ток дугового процесса, А	166	55	141	171	219	251	267
Среднее напряжение дугового процесса, В	30,1	17,1	29,3	30,7	31,6	31,5	41,9
СКО тока дугового процесса, А	20,4	40,4	26,6	27,5	23,3	27,1	28,2
СКО напряжения дугового процесса, В	1,8	4,7	2	1,6	1,7	2,5	2,6
Средний ток дуги, А	166	49	141	170	219	251	267
СКО тока дуги, А	19,6	30,5	25,9	21,8	23,3	27	28,2
Среднее напряжение дуги, В	30,1	18,1	29,4	30,7	31,6	31,5	41,9
СКО напряжения дуги, В	1,3	1,8	1,6	1,4	1,7	2,4	2,6
Средний ток КЗ, А	246	127	226	423	нет КЗ	278	нет КЗ
Среднее напряжение КЗ, В	9,4	4	6,9	14,3	нет КЗ	14,4	нет КЗ
СКО напряжения КЗ, В	2,7	1,6	2,2	8,4	нет КЗ	5,9	нет КЗ
Средняя длительность КЗ, мс	3,89	9,07	4,79	5,01	нет КЗ	1,58	нет КЗ
СКО длительности КЗ, мс	1,2	4,2	1,4	3,2	нет КЗ	0,2	нет КЗ
Средняя длительность дуги, с	1,096	0,111	1,46	1,855	11,975	1,302	18
СКО длительности дуги, с	1,852	0,202	1,748	3,266	0	2,138	0
Средняя частота КЗ, Гц	0,85	8,26	0,62	0,47	нет КЗ	0,69	нет КЗ
Среднее количество ОД в мин	0	3	0	4	0	0	0

– фильтрация обоих сигналов с помощью нелинейного фильтра с переменной структурой [11], который полностью повторяет сигнал без задержки, если скорость его изменения не превышает некоторой заданной величины  $\epsilon$ , определяемой экспериментально (в нашем случае для тока  $\epsilon = 15$  А, а для напряжения  $\epsilon = 5$  В);

$$\overline{I_{cb}(i)} = I_{cb}(i-1) + \frac{\Delta I_{cb}(i)}{|\Delta I_{cb}(i)|} \epsilon$$

при условии, что  $|\Delta I_{cb}(i)| > \epsilon$ , в противном случае  $\overline{I_{cb}(i)} = I_{cb}(i)$ . Аналогично для напряжения:

$$\overline{U_{cb}(i)} = U_{cb}(i-1) + \frac{\Delta U_{cb}(i)}{|\Delta U_{cb}(i)|} \epsilon$$

при условии, что  $|\Delta U_{cb}(i)| > \epsilon$ , в противном случае  $\overline{U_{cb}(i)} = U_{cb}(i)$ .

2. Производится очистка записей от лишних периодов ХХ. В результате «очистения» в начале и конце записей остаются отрезки периодов ХХ длительностью не более 1 с.

3. Осуществляется расчет плотности распределения напряжений с шагом 5 В, вычисляется  $U_{кд}$  и  $U_{до}$ .

4. Вычисляется плотность распределения тока с шагом 5 А на участке от 0 до 31 А. Определяется мода на этом участке, затем вычисляется местоположение минимума плотности (позиция  $I_{од}$ ) справа от моды на участке 0...31 А.

5. Вычисляется функция совместной плотности распределения  $I_{cb}$  и  $U_{cb}$  для тока с шагом 10 А, для напряжения с шагом 1 В.

7. Вычисляется граница раздела зон ГД и КЗ —  $L_{гд-кз}$  и граница раздела зон ГД и ХХ(ОД) —

$L_{гд-хх}$ , а также проекции  $L_{гд-кз}$  и  $L_{гд-хх}$  на плоскость  $[U_{cb}, I_{cb}]$ , т. е.  $U_{cb} = Tri(I_{cb})$  и  $I_{cb} = Tru(U_{cb})$ , соответственно.

8. Производится кластеризация сварочного процесса.

Формируется массив состояний процесса  $Kdd(i)$  для последующего его анализа. Каждое состояние процесса в массиве  $Kdd(i)$  кодируется определенным значением уровня сигнала:

–  $Kdd(i)_{хх,од}$  при соблюдении условия:

$$U_{cb}(i) > [Tri(I_{cb}(i))Or(U_{cb}(i) \leq U_{кд} \text{ And } I_{cb}(i) \leq I_{од})]$$

$$\text{And } I_{cb}(i) \leq Tru(U_{cb}(i)).$$

–  $Kdd(i)_{кз}$  при соблюдении условия:

$$U_{cb}(i) \leq Tri(I_{cb}(i))Or(U_{cb}(i) \leq U_{кд}$$

$$\text{And } I_{cb}(i) \leq I_{од}).$$

–  $Kdd(i)_{гд}$  при соблюдении условия:

$$U_{cb}(i) > [Tri(I_{cb}(i))Or(U_{cb}(i) > U_{кд} \text{ And } I_{cb}(i) > I_{од})]$$

$$\text{And } I_{cb}(i) > Tru(U_{cb}(i)).$$

В таблицах 3 и 4 представлены результаты работы ИИС для режимов сварок, приведенных в табл. 1 и 2.

### Выводы

1. Представленная ИИС обеспечивает получение широкого набора статистических показателей электрических параметров процесса для анализа всех стадий — включение источника, возбуждение дуги, установившийся дуговой процесс, завершение сварки.

2. ИИС выполняет автоматическую идентификацию состояния процесса сварки, тем самым исключая влияние человеческого фактора на полученные оценки статистических параметров процесса.

1. Blakeley P. J. Developments in monitoring systems for resistance and arc welding / P. J. Blakeley // Proceedings of the International conference on automated welding systems in manufacturing, Gateshead, England // Woodhead Publishing, Ltd. – 1992. – P. 40.
2. Wu C. S. A fuzzy logic system for process monitoring and quality evaluation in GMAW / C. S. Wu, T. Polte, D. Rehfeldt // Welding J. – 2001 – № 2. – P. 33–38.
3. ELMA-Technik. «Daten-Registrier-Anlage für die Schweißtechnik (DAREG)». Firmenschrift ELMA-Technik GmbH & Co-KG, Aachen.
4. ARCDATA LQ-5N System. «Geräte zur Überwachung, Dokumentation und Regelung der Schweißdaten beim Lichtbogenschweißen», Messer Griesheim Firmenschrift 30.0102 d/e.
5. ARCDATA LQ-2 System. «Schweißdaten-Überwachungsgeräte zur Qualitätskontrolle beim Lichtbogenschweißen», Messer Griesheim Firmenschrift 30.0104 d/e.
6. Ogunbiyi B. GMAW metal transfer and arc stability assessment using monitoring indices / B. Ogunbiyi, J. Norrish // Computer Technology in Welding, Lanaken, Belgium 9–12 June 1996.
7. Металлургия дуговой сварки: Процессы в дуге и плавление электродов / И. К. Походня, В. Н. Горпенюк, С. С. Миличенко [и др.]; под ред. И. К. Походни; АН УССР, Институт электросварки им. Е. О. Патона. – К.: Наукова думка, 1990. – 224 с.
8. Бекетов В. Г. Информационно-измерительная система для аттестации источников питания дуговой сварки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.11.16. – Информационно-измерительные и управляющие системы (в машиностроении) / В. Г. Бекетов; научн. рук. В. В. Кривин. – Волгоград, 2006. – 16 с.
9. Ульянова О. В. Информационно-измерительная система для аттестации источников питания дуговой сварки на основе параметров марковской модели процесса плавления: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16. – Информационно-измерительные и управляющие системы (в машиностроении) / О. В. Ульянова; научн. рук. В. В. Кривин. – Волгоград, 2006. – 18 с.
10. Ланкин Ю. Н. Показатели стабильности процесса дуговой сварки плавящимся электродом / Ю. Н. Ланкин // Автоматическая сварка. – 2011. – № 1. – С. 7–15.
11. А. с. 1190361. Нелинейный фильтр / В. Г. Соловьев, А. И. Капелистый, В. Н. Федас, Т. Н. Удовенко; опубл. 30.05.1984 г.

Поступила в редакцию 31.03.2016



## МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕМИНАР

### «Совершенствование сварочных материалов и технологий их производства под прогнозируемые требования»

(посвящен памяти академика И. К. Походни)

5–8 июня 2017 г.

г. Белгород, Россия

**Организаторы:** Ассоциация «Электрод», ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, ООО «Новооскольский электродный завод», ООО «КЕРАМГЛАС».

Главные особенности семинара — практическая направленность сообщений, возможность участия в прениях производителей и потребителей продукции, посещение производственной площадки Новооскольского электродного завода.

Темы докладов необходимо сообщить до 15.01.2017 г.

Тезисы докладов в электронном виде следует направить до 10.04.2017 г.

**Контакты:** ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, Украина, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. Липодаеву В. Н., тел.: +38-044-200-63-02.

E-mail: vladimir.lipodaev@yandex.ua; as-electrod@mail.ru. hppt: //association-electrode.com

# УСТРОЙСТВО ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

В. В. БУРЛАКА, С. В. ГУЛАКОВ

ГБУЗ «Приазовский государственный технический университет» (ПГТУ).  
87500, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7. E-mail: office@pstu.edu

Предложено схемное решение устройства формирования повышенного напряжения, позволяющего облегчить зажигание и стабилизировать горение сварочной дуги постоянного/переменного тока. Устройство работает по алгоритму Lift-Arc и обеспечивает поджиг дуги с минимально необходимой энергией за счет ограничения скорости роста напряжения на дуговом промежутке. Для безопасности эксплуатации также введено ограничение времени действия повышенного напряжения. За счет применения современной элементной базы удалось упростить электрическую схему устройства стабилизации дуги при сохранении высоких потребительских качеств. Библиогр 10, рис. 5.

*Ключевые слова:* электрическая дуга, сварка, поджиг дуги, стабилизация горения дуги, сварочный инвертор, напряжение холостого хода

При ручной дуговой сварке покрытым электродом, а также сварке в среде инертного газа (МИГ), в том числе неплавящимся электродом (ТИГ), возникает необходимость, во-первых, облегчить инициирование дугового разряда, во-вторых, стабилизировать процесс горения дуги. При питании от сети переменного тока повторное возбуждение дуги должно происходить после каждого перехода напряжения источника через ноль. Кроме того, при сварке ТИГ желательна ограничить энергию, которая выделяется при пробое дугового промежутка, так как при повышенной энергии разряда имеет место эрозия неплавящегося электрода, что сокращает его срок службы. Поэтому актуальной является задача создания устройства стабилизации дуги, которое реализует возбуждение дуги при минимально необходимой энергии разряда и обеспечит стабильное горение дуги в процессе сварки.

При ручной дуговой сварке электродами на постоянном токе с питанием от инверторного источника возникают проблемы с зажиганием и удержанием дуги (дуга горит неустойчиво, электрод часто «залипает»). Причина — низкое напряжение холостого хода  $U_{xx}$  инверторных источников для дуговой сварки. Так, для источников, выполненных по мостовой схеме,  $U_{xx}$  составляет 60...65 В; для источников на основе прямоходового преобразователя  $U_{xx}$  составляет 50...60 В (импульсы амплитудой порядка 100 В и скважностью 0,5).

«Классические» устройства стабилизации дуги содержат повышающий трансформатор, искровой генератор с разрядником и высокочастотным (широкополосным) трансформатором, вторичная обмотка которого включена последовательно или параллельно с дуговым промежутком [1–4]. Такая

схема позволяет сформировать высоковольтные импульсы на дуговом промежутке и обеспечить поджиг дуги. К ее недостаткам следует отнести большие габариты и массу трансформаторов, сложность управления энергией импульсов, широкий спектр генерируемых электромагнитных помех, небольшой срок службы разрядника и необходимость его периодической замены.

В работах [5–8] описаны устройства стабилизации дуги, в которых применены бесконтактные коммутирующие элементы — транзисторы и тиристоры. Это позволяет значительно повысить надежность сварочного оборудования, оснащенного такими устройствами, и получить возможность управления характеристиками поджигающих импульсов в широких пределах.

В работе [9] предложено устройство стабилизации дуги, позволяющее регулировать энергию возбуждения дуги за счет изменения напряжения питания резонансных цепей. В схему устройства введены дополнительный регулируемый источник повышенного напряжения постоянного тока, две резонансные цепи с соответствующими схемами управления. Это приводит к усложнению схемы, повышению потерь энергии и ухудшает потребительские качества устройства.

В работе [10] предложен способ увеличения интенсивности плазмообразования за счет применения нескольких резонансных цепочек, работающих со сдвигом фазы и нагруженных на общий высокочастотный трансформатор. Однако применение в устройствах в качестве ключевых элементов незапираемых тиристоров не позволяет повысить рабочую частоту, упростить схему и улучшить массогабаритные характеристики стабилизатора дуги [9, 10].

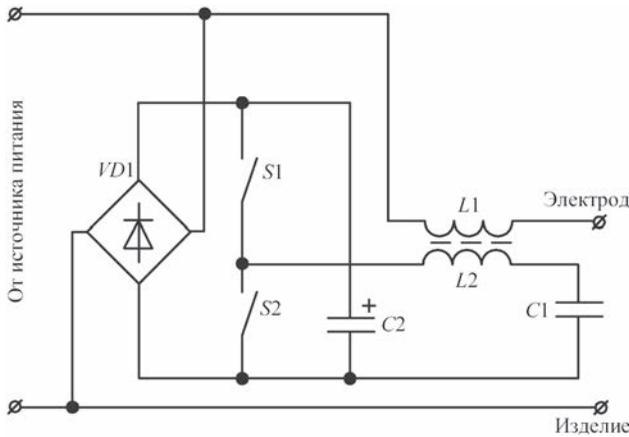


Рис. 1. Блок-схема устройства стабилизации дуги

Авторами разработано устройство стабилизации дуги, включающееся последовательно с электродом и позволяющее формировать на последнем повышенное напряжение. Устройство не требует отдельного источника питания (питается от сварочного источника), позволяет повысить стойкость неплавящегося электрода при сварке ТИГ за счет ограничения скорости роста напряжения на нем и возбуждения дуги с минимально необходимой для этого энергией, повысить продолжительность периода поддержки повышенного напряжения на электроде при ручной дуговой сварке и облегчить процесс инициирования дуги.

В основу положен принцип получения повышенного напряжения за счет «накачки» последовательного резонансного контура от управляемого источника переменного напряжения с изменяемой частотой. В качестве последнего использован коммутационный блок на полевых транзисторах, управляемый от однокристального микроконтроллера.

На рис. 1 приведена блок-схема, на рис. 2 — принципиальная электрическая схема разработанного устройства стабилизации дуги.

При включении источника питания конденсатор C2 (см. рис. 1) заряжается через диод

ный мост VD1 до напряжения холостого хода источника.

В случае ручной дуговой сварки возбуждение дуги осуществляется после короткого замыкания (КЗ) электрода на изделие (функция Lift-Arc). Программа управления отслеживает напряжение на выходе источника. При КЗ напряжение становится близким к нулю. В это время питание схемы обеспечивает заряженный конденсатор C2.

При отводе электрода от изделия КЗ исчезает, на выходе источника питания появляется напряжение. В это время начинает работу коммутационный блок, образованный ключами S1, S2. Он работает со скважностью 50 % и переменной частотой. Работа начинается с максимальной частоты, которая значительно превышает резонансную частоту контура L2C1. По мере снижения выходной частоты коммутационного блока растет ток контура L2C1 и напряжение на дросселе L1. Далее возможны два варианта развития событий:

при некотором напряжении на L1 происходит инициирование дуги. При этом напряжение на выходе источника питания снижается до величины напряжения на дуговом промежутке, система управления блокирует работу ключей S1, S2. Так обеспечивается «мягкий» поджиг дуги.

при достижении необходимого (максимального) тока «накачки» контура L2C1 снижение частоты останавливается, система переходит в установившийся режим. Для обеспечения безопасного пользования устройством высокое напряжение на выходе поддерживается только в течение заданной выдержки времени, после чего работа ключей S1, S2 блокируется.

Работа на частотах выше частоты последовательного резонанса контура L2C1 обеспечивает «мягкое» включение силовых ключей из-за индуктивного характера входного импеданса контура, что позволяет применить в качестве ключей полевые транзисторы, характеризующиеся относительно большим временем обратного восстановления инверсного диода.

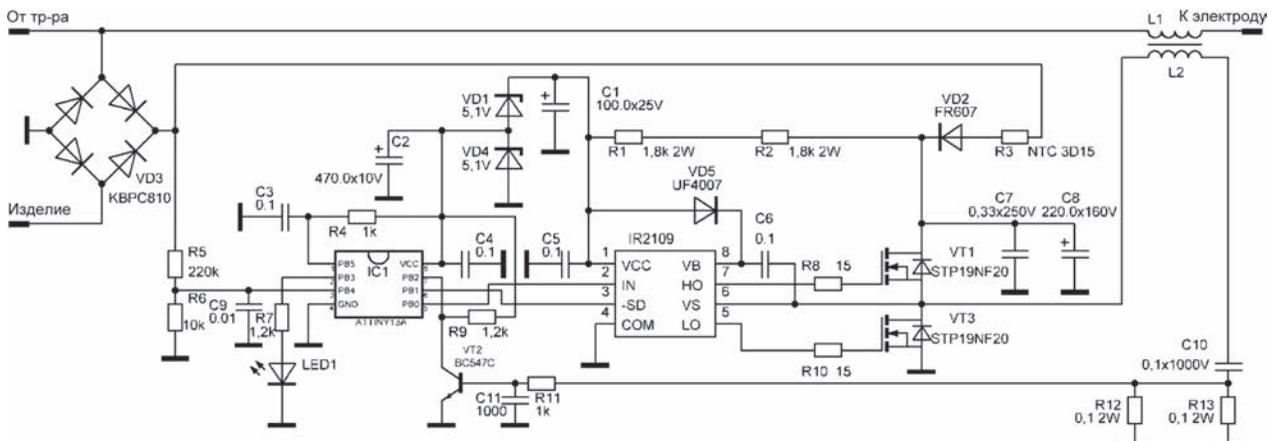


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема устройства стабилизации дуги

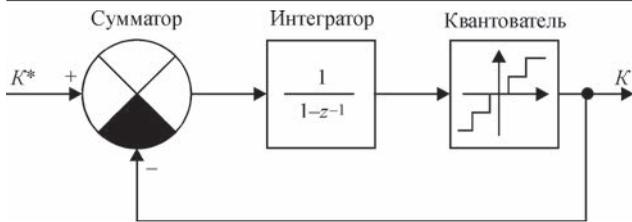


Рис. 3. Структурная схема алгоритма реализации дробного коэффициента деления

В случае сварки ТИГ работа системы аналогична, отличаются только параметры контура  $L2C1$  (необходимо обеспечивать повышенное напряжение по сравнению с ручной дуговой сваркой). Инициирование дуги происходит после каждого перехода напряжения источника питания через ноль.

Элементы  $VD1$ ,  $C2$  также защищают выход источника питания от попадания высокого напряжения с дросселя  $L1$ .

В практической реализации устройства стабилизации дуги для ручной дуговой сварки (см. рис. 2) ключи  $S1$ ,  $S2$  выполнены на MOSFET транзисторах STP19NF20, диодный мост  $VD1$  типа KBPC810, конденсаторы  $C1$   $0,1 \text{ мкФ} \times 1000 \text{ В}$ ,  $C2$   $220 \text{ мкФ} \times 160 \text{ В}$ . Дроссель намотан на сердечнике ETD59/31/22 с немагнитным зазором  $0,4 \text{ мм}$  для линеаризации вебер-амперной характеристики.  $L1$  имеет 14 витков,  $L2$  — 12 витков.

Максимальный ток накачки контура определяется сопротивлением резисторов  $R12$ ,  $R13$  и напряжением отпираания транзистора  $VT2$ , которое составляет примерно  $0,6 \text{ В}$ . Для приведенных на схеме номиналов амплитуда тока в контуре может достигать  $12 \text{ А}$ .

Формирование управляющих импульсов для транзисторов ключей  $S1$ ,  $S2$  осуществляется с помощью специализированного драйвера IR2109 от однокристального микроконтроллера ATTINY13A. Частота переключения может меняться от  $18,8$  до  $72,0 \text{ кГц}$ . Резонансная частота контура  $L2C1$  составляет более  $42 \text{ кГц}$ .

Для уменьшения дискретности изменения выходной частоты в управляющей программе реализовано деление тактовой частоты контроллера

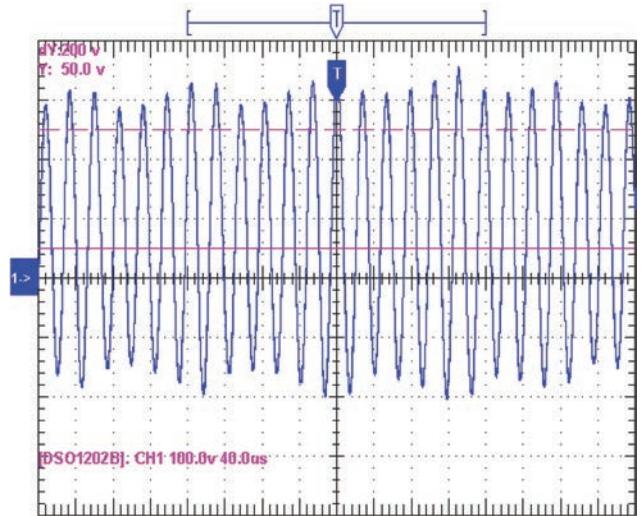


Рис. 4. Осциллограмма выходного напряжения ( $100 \text{ В/дел}$ ;  $40 \text{ мкс/дел}$ )

( $4,8 \text{ МГц}$ ) на дробный коэффициент. Для этого использован программный сигма-дельта модулятор, структурная схема которого приведена на рис. 3, где  $K^*$  — требуемый коэффициент деления (может быть дробным);  $K$  — фактический коэффициент деления (целочисленный).

Работа алгоритма приводит к тому, что величина коэффициента  $K$  изменяется с некоторым периодом таким образом, что среднее значение  $K$  стремится к заданному  $K^*$ .

На рис. 4 приведена осциллограмма выходного напряжения устройства при отсутствии дуги. Периодические колебания амплитуды объясняются работой алгоритма формирования дробного коэффициента деления.

Амплитуда напряжения на электроде при работе устройства превышает  $300 \text{ В}$ , что обеспечивает легкий поджиг дуги при ручной дуговой сварке. Выдержка времени на инициирование дуги установлена порядка  $1 \text{ с}$ , в соответствии с требованиями ДСТУ 2456–94.

Внешний вид устройства приведен на рис. 5.

Применение предлагаемого устройства стабилизации дуги позволяет повысить стабильность качества сварных соединений, повысить стой-



Рис. 5. Внешний вид устройства стабилизации дуги

кость неплавящегося электрода (при сварке ТИГ) и облегчить процесс начального инициирования дуги при ручной дуговой сварке, особенно при использовании сварочных электродов постоянного тока.

1. Солодский С. А. Источники питания для дуговой сварки / С. А. Солодский, О. Г. Брунов, Д. П. Ильященко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012.
2. Оборудование для дуговой сварки: справочное пособие / С. М. Белинский, А. Ф. Гарбуль, В. Г. Гусаковский [и др.]; под ред. В. В. Смирнова. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 656 с.
3. Андрианов А. А. Оптимизация режимов стабилизации сварочной дуги переменного тока / А. А. Андрианов, В. Н. Сидоренко // Электротехника і електромеханіка. – 2009. – № 2. – С. 5–8.
4. Махлин Н. М. Анализ и методика расчета электронных устройств последовательного включения для бесконтактного возбуждения дуги / Н. М. Махлин, А. Е. Коротынский // Автоматическая сварка. – 2014. – № 1. – С. 34–44.
5. Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги / Б. Е. Патон, И. И. Заруба, В. В. Дыменко [и др.]. – К.: ЕкоТехнологія, 2007. – 218 с.
6. Махлин Н. М. Асинхронные возбудители и стабилизаторы дуги: анализ и методы расчета. Часть 1 / Н. М. Махлин, А. Е. Коротынский // Автоматическая сварка. – 2015. – № 3-4. – С. 25–36.
7. Махлин Н. М. Асинхронные возбудители и стабилизаторы дуги: анализ и методы расчета. Часть 2 / Н. М. Махлин, А. Е. Коротынский // Автоматическая сварка. – 2015. – № 7. – С. 28–40.
8. Махлин Н. М. Особенности бесконтактных возбуждений дуги переменного тока // Автоматическая сварка. – 2015. – № 10. – С. 30-37.
9. Пат. 109334 України, МПК В23К 9/067 (2006.01), В23К 9/073 (2006.01). Пристрій для збудження та стабілізації процесу горіння дуги змінного струму / Н. М. Махлін, О. Є. Коротинський, М. І. Скопюк; № а 2014 00292; заявл. 14.01.2014; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15. – 15 с.
10. Пат. 86432 України, МПК В23К 9/00 (2009). Імпульсне джерело плазми / О. Є. Коротинський, М. І. Скопюк; № а 200702160; заявл. 28.02.2007; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8. – 5 с.

Поступила в редакцию 05.09.2016

# XV МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ – 2016

## МЕЖДУНАРОДНЫЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВЫСТАВКИ

# 22–25 НОЯБРЯ

**ОРГАНИЗАТОР:**  
Международный выставочный центр

Генеральный информационный партнер: **Оборудование Инструмент**

Технический партнер: **RentMedia**

**Международный выставочный центр**  
Украина, 02660, Киев  
Броварской пр-т, 15  
М "Левобережная"

☎ (044) 201-11-65, 201-11-56  
e-mail: maria@iec-expo.com.ua  
www.iec-expo.com.ua, www.мвц.укр  
www.tech-expo.com.ua



## МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ФОРУМ ЗАВЕДУЮЩИХ КАФЕДРАМИ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Кафедре оборудования и технологий сварочного производства (ОиТСП) им. профессора В. М. Карпенко Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА), г. Краматорск, Украина, исполнилось 50 лет.

Данному событию были приурочены IV Международная научно-техническая конференция и V Форум (Координационный совет) заведующих кафедрами по направлению «Сварка и родственные технологии», которые проходили 5–7 октября 2016 г.

Открытие этих мероприятий проходило в торжественной обстановке в празднично украшенном актовом зале ДГМА. В зале присутствовало большое количество приглашенных гостей (не только из числа жителей г. Краматорска и других городов регионов Украины, но и представителей ближнего и дальнего зарубежья). Кроме того, поздравить с юбилеем пришли выпускники кафедры разных лет, студенты и сотрудники Академии.

Пленарное заседание открыла заведующая кафедрой ОиТСП ДГМА, доктор технических наук, профессор Н. А. Макаренко, которая в своем выступлении отметила, что кафедра имеет славные традиции, базирующиеся на преемственности поколений, огромный научный потенциал дальнейшего развития. Она же подчеркнула ведущую роль в становлении и развитии подразделения всех заведующих кафедрой, которые руководили ею в разный период времени (канд. техн. наук, доцент Д. С. Кассов; канд. техн. наук, профессор В. М. Карпенко; канд. техн. наук, доцент В. Т. Катренко; канд. техн. наук, доцент М. Г. Лившиц).

Н. А. Макаренко призвала и в дальнейшем укреплять традиции кафедры и взять курс на подготовку специалистов европейского уровня, для чего более интенсивно интегрироваться в европейское образовательное пространство. За последние восемь лет сотрудниками кафедры защищено 1 докторская и 7 кандидатских диссертаций, подготовлено к защите еще 2 диссертационные работы. В данный момент кафедра успешно сотрудничает с ведущими зарубежными научно-образовательными учреждениями (на сегодня в действии 5 договоров о творческом сотрудничестве). Это дает возможность ведущим специалистам с обеих сторон обмениваться научными публикациями, учебно-методическими материалами, библиографической и справочной литературой, про-

водить совместные научно-исследовательские работы по актуальным проблемам науки и техники, принимать участие в Международных научно-технических конференциях.

Н. А. Макаренко представила приглашенных представителей учредителей конференции: Донбасскую государственную машиностроительную академию; ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины; ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод»; Завод автогенного оборудования «ДОНМЕТ»; Магдебургский университет им. Отто фон Геррике (Германия); Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»; Тернопольский национальный технический университет им. И. Пулюя; KZU HOLDING GROUP (Болгария); Техничко-Гуманитарную академию (Польша); Center for the Advancement of Natural Discoveries using Light Emission (Армения). Кроме того, данное мероприятие проходило при широкой поддержке Донецкой областной организации Профсоюза работников образования и науки Украины.

Выступивший затем зам. зав. кафедрой, канд. техн. наук, доц. А. Д. Кошевой отметил, что на протяжении долгих лет при кафедре действует Совет выпускников, который оказывает значительную поддержку кафедре не только в деле подготовки высококвалифицированных специалистов, но и принимает участие в оснащении ее лабораторий. Так, например, к юбилею кафедры осуществлен капитальный ремонт и оборудована на современном уровне предметная аудитория (в частности, приобретена и установлена мультимедийная интерактивная доска, видеопроектор и др.). Активное участие в этом процессе приняли Н. И. Ятченко, А. И. Головки, В. А. Шевченко, С. А. Волоха.

С приветственным словом к участникам конференции и форума обратились ректор академии В. Ковалев, проректор по научной работе М. Турчанин и заместитель мэра Краматорска Н. Чукова. Они тепло поздравили коллектив кафедры оборудования и технологии сварочного производства с юбилеем и пожелали дальнейших творческих успехов.

Кафедру тепло поздравили также ряд выпускников, среди которых директора крупных предприятий и заводов, деканы факультетов, главные инженеры и специалисты. Все они благодарили

своих преподавателей за высокий уровень подготовки, который всегда обеспечивала кафедра. Ими были вручены многочисленные памятные адреса и подарки, сказано много теплых слов, передано много поздравлений от тех выпускников, кто не смог приехать.

В торжественном пленарном заседании приняли участие делегаты от ИЭС им. Е. О. Патона (С. Ю. Максимов, В. А. Лебедев, А. М. Жерносеков), заведующие и представители кафедр сварки ряда вузов (гг. Запорожье, Мариуполь, Винница, Тернополь, Чернигов, Бельско-Бяла и др.).

Было проведено награждение памятными медалями (с изображением Н. Н. Бенардоса), учрежденными Обществом сварщиков Украины за заслуги в развитии сварки и родственных технологий. Этими памятными знаками были награждены: В. А. Белинский — главный сварщик ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», руководитель филиала кафедры на данном предприятии; А. Д. Кошевой — зам. зав. кафедрой ОиТСП ДГМА Н. А. Макаренко — заведующая кафедрой ОиТСП ДГМА.

Пленарное заседание прошло торжественно, поздравления сочетались с номерами художественной самодеятельности, подготовленными на высоком уровне студентами профильной специализации.

Собрание закончилось выходом всех сотрудников кафедры на сцену. Им всем были вручены памятные медали, посвященные 50-летию кафедры.

В дальнейшем конференция и форум проходили параллельно. Доклады на Конференции были посвящены научно-техническим вопросам дуговой, плазменной, лазерной, диффузионной, электроконтактной, термитной и других видов сварки, наплавки, напыления, проблемам прочности и надежности сварных конструкций. При этом, рассматривались как фундаментальные вопросы, касающиеся научной сути того или иного процесса, так и прикладные вопросы сварки, наплавки, ремонта различных конструкций и изделий машиностроения, а также вопросы совершенствования методов контроля качества изготавливаемых изделий.

У участников конференции большой интерес вызвали доклады, связанные с такими процессами, как диффузионная сварка разнородных материалов, позволяющая за счет стимулирования диффузии соединять материалы, ограниченно соединяемые, либо несоединяемые с помощью других сварочных процессов; вызвало интерес расширение применения импульсно-дуговой сварки и сварки с импульсной подачей проволоки, а также использование лазерной и лазерно-дуговой сварки — способов, не получивших у нас еще широкого

применения, но весьма перспективных — для соединения тонколистовых деталей из углеродистых и низколегированных сталей. Выступления специалистов предприятий показали, что и в заводских условиях интерес к достижениям науки достаточно высок. Так, многие возникающие производственные проблемы решаются с использованием самых последних научных разработок, а также в сотрудничестве со специалистами из вузов и ИЭС им. Е. О. Патона.

К началу работы конференции были изданы: сборник тезисов докладов под общей ред. д-ра техн. наук Н. А. Макаренко (общее количество тезисов — 83 шт.) и юбилейный выпуск номера «Вісник Донбаської державної машинобудівної академії», посвященный 50-летию кафедры ОиТСП ДГМА (общее количество статей — 50 шт.), которые и были вручены участникам.

Форум заведующих кафедр проходил в конструктивной и дружеской обстановке. Были рассмотрены следующие вопросы:

- проблемы, возникающие при четырехступенчатой подготовке «бакалавр – магистр – доктор философии (PhD) – доктор наук»;

- обобщение требований к прохождению лицензирования третьего (образовательно-научного) уровня подготовки научных кадров;

- обмен опытом решения вопросов ступенчатой подготовки в Германии (на примере Магдебургского университета им. Отто фон Геррике) и в Польше (на примере Технико-Гуманитарной академии, г. Бельско-Бяла).

Участниками Форума были выдвинуты следующие предложения и рекомендации по адаптации опыта ведущих стран Европы при решении вопроса ступенчатой подготовки научных кадров, а именно:

1. Взять курс на модернизацию профессионально-технического образования в области направления «Сварка и родственные технологии». Для этого необходимо обеспечить наряду с финансированием и качественную подготовку специалистов высокого уровня. В связи с этим нужно повысить приоритетность технических специальностей, таких как «Прикладная механика», «Материаловедение» и «Металлургия», что возможно достигнуть за счет целевой подготовки студентов с начислением повышенных стипендий от предприятий-заказчиков, а также увеличения бюджетных мест по данным направлениям подготовки.

2. Продолжить подготовку бакалавров на базе образовательно-квалификационного уровня младшего специалиста, что в настоящее время подтверждается высокими положительными результатами подготовки. Вместе с тем, с целью повышения качества подготовки бакалавров, об-

учающихся по ускоренной форме (в настоящее время срок их обучения составляет 2 года), и для обеспечения их конкурентоспособности при поступлении в магистратуру со студентами, обучающимися по полной программе подготовки (в настоящее время это 4 года), участники форума считают целесообразным (для специальностей отрасли «Механическая инженерия») прием лиц, поступающих на ускоренную программу подготовки, осуществлять в течение 3-х лет.

3. С целью повышения качества и эффективности профориентационной работы среди школьников старших классов привлекать к этому ведущих специалистов предприятий, фирм, учреждений независимо от формы собственности.

4. Максимально повысить мобильность подготовки студентов за счет унификации учебных планов обучения бакалавров по родственным специальностям в соответствии с последними требованиями МОН Украины.

5. В связи с определенными трудностями в получении периодических изданий по специальности и с целью повышения эффективности поиска научно-технической информации создать на сайтах кафедр (WEB-страницах) вкладки с библиографической и аннотированной информацией о публикациях сотрудников кафедр вузов Украины по направлению «Сварка и родственные технологии».

6. С целью подготовки докторов философии и докторов наук необходимо обеспечить наличие публикаций студентов, аспирантов, докторантов, научных сотрудников в изданиях, индексируемых в наукометрических базах, в частности, Scopus, Web of Science, INSPEC и др.

Заведующие кафедрами считают, что оптимальным вариантом решения данной проблемы является взятие курса на повышение уровня научных сборников, выпускаемых в настоящее время в высших учебных заведениях, и приведение их в соответствие с требованиями международных наукометрических баз с целью вхождения в них. Было отмечено ряд изданий, которые на сегодня в наибольшей степени соответствуют международным стандартам. Это дает приоритетную

возможность им войти в различные международные наукометрические базы с высоким индексом цитирования.

7. Провести подготовительную работу по согласованию в 2017 г. планов образовательно-научной подготовки бакалавров, магистров и PhD по общеевропейским стандартам.

8. Поручить ведущим докторам наук и профессорам по направлению «Сварка и родственные процессы и технологии» тщательно изучить требования, предъявляемые к научным изданиям, которые индексируются в наукометрических базах, в частности, Scopus, Web of Science, INSPEC и др., на предмет включения сборников научных трудов, издаваемых в Украине по данному направлению, в вышеуказанные базы, и в ближайшее время обязать их предоставить соответствующие рекомендации по этому вопросу.

При выработке данных рекомендаций ориентировались на опыт, полученный при анализе трехступенчатой подготовки в Польше (доклад доктора техн. наук, профессора А. Мачинского, Технико-Гуманитарная академия, г. Бельско-Бяла, Польша и доктора техн. наук, профессора, зав. кафедрой Тернопольского национального технического университета им. И. Пулюя — Н. И. Пидгурского) и опыт подготовки научно-педагогических кадров в США (доклад доктора техн. наук, зав. кафедрой, члена Нью-Йоркской академии наук С. В. Ковалевского).

Организаторами конференции и форума была предусмотрена экскурсия на современное предприятие, отвечающее мировым стандартам – завод автогенного оборудования «Донмет», с технологическим циклом которого и номенклатурой выпускаемой им продукции и были ознакомлены в полном объеме участники этих мероприятий.

Кроме того, все участники конференции и форума приняли участие в культурно-массовой программе, предложенной оргкомитетом.

Участники конференции и форума выразили признательность за хорошую организацию мероприятий..

Н. А. Макаренко, А. Д. Кошевой, Д. А. Волков



## ВЫСТАВКА WELDEX/РОССВАРКА 2016

С 11 по 14 октября 2016 г. в г. Москве, в КВЦ «Сокольники» прошла 16-я Международная специализированная выставка сварочных материалов, оборудования и технологий. Организатором этого бизнес-мероприятия выступила группа компаний ITE, лидер рынка выставочных услуг в России.

Главной отличительной особенностью этого масштабного мероприятия явилось традиционно активное посещение его специалистами из многих регионов России, представляющих такие отрасли, как машиностроение, строительство, энергетика, нефтегазовый комплекс и др.

На выставке был представлен широкий спектр оборудования, материалов и современных технологий сварки, резки, наплавки, пайки и обработки поверхностей. Основные разделы выставки включали демонстрацию:

- оборудования и технологий для всех видов сварки, наплавки и пайки;
- оборудования и технологий термической обработки;
- материалов для сварки, резки, наплавки, напыления, пайки;
- средств и методов защиты;
- контроля качества сварных соединений;
- инструментов и приспособлений для сварки;
- научных разработок в области неразъемного соединения.

В этом году в выставке Weldex приняли участие более 170 компаний из 17 стран мира. Национальные и зарубежные компании представили современные технологические решения и новинки для многих видов сварки и родственных процессов различной ценовой категории. Помимо постоянных участников выставки — российских и зарубежных лидеров отрасли: FANUC Robotec, Kemppi, Lincoln Electric, Messer, voestalpine Bonler Welding, ЭСАБ, НПП «Технотрон», НТО ИРЭ-Полус Государственный Рязанский приборный завод, ОАО «ММК-МЕТИЗ», ЗАО «НПФ «Инженерный и технологический сервис», ООО «Лосиноостровский электродный завод» и многих других — присутствовали экспозиции 35 новых участников, большинство из которых — российские компании.

В текущей экономической ситуации, когда многие компании все более прагматично оценивают расходы на рекламу и продвижение, качественные выставочные мероприятия остаются высоко

востребованными. Выставка Weldex предоставила возможность специалистам ознакомиться со многими современными сварочными технологиями и выбрать необходимое сварочное оборудование и материалы, увидеть новейшее оборудование в действии, оценить его технические характеристики и заключить выгодные контракты. Выставку Weldex отличает высокая коммерческая эффективность — согласно исследованиям, например, в 2015 г. выставку посетили более 5200 человек из 68 регионов России и 26 стран мира, 79 % из которых посещают только Weldex из выставок схожей тематики.

Традиционно на стендах зарубежных и российских компаний были продемонстрированы новинки сварочного оборудования и материалов. Компания Kemppi представила свои новейшие разработки в области механизированной сварки — семейство продуктов, в которых механизация объединена с преимуществами программного обеспечения источников питания и прикладного программного обеспечения Kemppi. Новое семейство механизированного оборудования состоит из шести систем для МИГ-сварки и ТИГ-сварки. Семейство включает системы различных уровней: от простых и компактных с питанием от аккумулятора до самых функциональных профессиональных систем для выполнения многослойных сварных швов при сварке труб.

ООО «Ниппон Сервис» — эксклюзивный авторизованный дистрибьютор по сварочным материалам и оборудованию японской компании NIPPON STEEL & SUMIKIN WELDING CO., LTD в Российской Федерации — представила газозащитную рутиловую порошковую проволоку SF-3AM, изготовленную по бесшовной технологии и предназначенную для сварки во всех положениях сталей для низкотемпературных условий эксплуатации в смеси защитных газов Ar + CO<sub>2</sub> и газозащитную порошковую проволоку NSSW SF-50E, рутилового типа, изготовленную по бесшовной технологии. Проволока рекомендуется для механизированной и автоматической сварки (в среде инертных газов и смесях) углеродистых и низкоуглеродистых низколегированных сталей во всех пространственных положениях.

ООО «МАГНИТ плюс» из Санкт-Петербурга, российский производитель оборудования для размагничивания, для снятия остаточных сварочных напряжений и вспомогательного оборудова-

ния на основе постоянных магнитов, представила на выставке новую размагничивающую установку туннельного типа РУТТ-160, которая может быть применена практически в любом месте и со сколь угодно протяженным изделием.

Украина на выставке была представлена компанией Донмет — заводом автогенного оборудования.

#### Деловая программа

11 сентября впервые в рамках выставки состоялся семинар-заседание Научно-Координационного Совета по развитию сварки и родственных технологий в Российской Федерации с участием представителей Министерства промышленности и торговли Российской Федерации и ведущих отечественных и мировых производителей продукции сварочного назначения. Темой семинара стало «Состояние и перспективы производства оборудования и материалов для сварки и родственных технологий в Российской Федерации. Способы стимулирования развития сварочной отрасли на ближайшее будущее».

12 октября работали круглые столы главных сварщиков Москвы и Московской области с тематикой «Лучшие технологии, оборудование, материалы для сварки, резки, наплавки от участников выставки Weldex 2016 для промышленных предприятий Московского региона и других областей России», организованные при участии Московского межотраслевого альянса главных сварщиков «ММАГС». Эксперты обсудили технические аспекты новинок сварочной техники, их качественные характеристики, вопросы охраны труда, а также средств защиты от вредных производственных факторов при сварке, резке и наплавке.

В этот же день состоялось открытое собрание представителей предприятий, входящих в международную ассоциацию «Электрод» (объединяет свыше 20 предприятий-изготовителей сварочных материалов России, Украины и Казахстана). На нем были обсуждены текущие вопросы подготовки к международному технологическому семинару «Совершенствование сварочных материалов и технологий их производства под прогнозируемые требования» (г. Белгород, 5–8 июня 2017 г.), направления совершенствования информационной поддержки предприятий Ассоциации, изменения в нормативных правовых актах Ростехнадзора и профессиональном стандарте «Работник по производству металлических электродов». Предста-

витель ООО «Ижорские сварочные материалы» И. М. Лившиц ознакомил специалистов с информацией по освоению их предприятием производства керамических флюсов.

13 октября мероприятия деловой программы завершала Международная научно-практическая конференция «Модернизация сварочного производства стратегических отраслей промышленности», организованная при участии РНТСО и ММАГС. Основные научно-практические направления докладов: прогрессивное оборудование и технологии для любых видов электродуговой и плазменной сварки, резки, наплавки; качественные сварочные материалы; лучевые способы сварки; специальные виды сварки (диффузионная, холодная сварка, контактно-стыковая, сварка взрывом, сварка трением, ультразвуковая сварка и т. д.); технологии и материалы получения клеевых конструкций; механизация, автоматизация и роботизация сварочных процессов; аддитивные технологии в сварке; сопутствующие технологии.

В рамках выставки Weldex традиционно были проведены конкурсы «Лучший сварщик 2016», «Лучший молодой сварщик 2016», «Лучший инженер (ученый) в сварочной области 2016» и «Мисс Сварка Мира 2016». Цель конкурсов — повышение престижа рабочей профессии сварщик, выявление и поощрение специалистов-сварщиков, обладающих выдающимися профессиональными знаниями и навыками. В них приняли участие более 100 сварщиков из России, СНГ и других стран мира, работающие на предприятиях в различных отраслях производства.

С 11 и по 13 октября прошли отборочные соревнования в расширенный состав сборной РФ «Молодые профессионалы» (WorldSkills Russia) в компетенции «Сварочные технологии».

В ходе выставки в течение четырех дней в одном из холлов демонстрировались художественно-декоративные изделия, выполненные с использованием методов сварки иковки.

По мнению многих специалистов, прошедшая выставка Weldex/Россварка продемонстрировала высокий интерес посетителей, способствовала успешной реализации коммерческих планов, помогла завязать множество полезных контактов для развития бизнеса.

Следующая выставка Weldex/Россварка будет проходить 10–13 октября 2017 г. в КВЦ «Сокольники».

В. Н. Липодаев

## Портативные, компактные сварочные системы TPS 270i C PULSE и TPS 320i C PULSE от Fronius\*

Компания Fronius расширила свою проверенную серию TPS/i, включив в нее источники тока TPS 270i C PULSE и TPS 320i C PULSE со встроенными механизмами подачи проволоки. Новые модели, рассчитанные на сварочные токи до 270 и 320 А, сочетают превосходную функциональность платформы TPS/i и очень компактные размеры. Данные модели одинаково подходят для сварочных процессов MIG/MAG, TIG DC и MMA. Эти источники могут использоваться везде, и благодаря своей компактной конструкции, они идеально подходят для применения там, где требуется высокая мобильность: стройплощадки, монтажные работы, мастерские.

Несмотря на компактную конструкцию, модели TPS 270i C PULSE и TPS 320i C PULSE отличаются бескомпромиссной эффективностью и гибкостью. Кроме комплекта для импульсно-дуговой сварки MIG/MAG, входящего в стандартную комплектацию, предлагаются также пакеты для проверенного стандартного сварочного процесса от Fronius и пакеты для процессов LSC (Low Spatter Control) и PMC (Pulse Multi Control), разработанные для серии TPS/i. Множество предварительно подготовленных сварочных характеристик и полезных функций упрощают процесс сварки. Например, функция SynchroPulse обеспечивает уровень чешуйчатости сварного шва не выше, чем при сварке TIG. Тщательно продуманные детали, включая ролики механизма подачи проволоки для разных диаметров проволоки с цветовой маркировкой, окошко, которое позволяет быстро проверить остаток проволоки, и простой пользовательский интерфейс упрощают использование сварочной системы. Отдельно следует упомянуть, что пользователи сварочной системы TPS/i могут сочетать аппаратную часть, сварочные процессы и программное обеспечение в соответствии со своими индивидуальными потребностями. Таким образом, сварочное оборудование данной серии в дальнейшем можно с легкостью изменять и модернизировать, что обеспечивает надежную защиту инвестиций. Например, унифицированный модульный принцип дает возможность пользователю начать с приобретения всего одного аппарата для стандартной сварки короткой дугой и в последующем модернизировать его для выполнения импульсной сварки.

Новая сварочная платформа TPS/i предлагает пользователям невиданную степень индивидуализации, интерактивные возможности и выдающиеся усовершенствования. Это позволяет предприятиям выполнять более сложные и разноплановые сварочные работы проще, эффективнее и с неизменно высоким качеством. Более того, разнообразное дополнительное оборудование и широкий спектр принадлежностей, например, системы



Новые источники Fronius серии TPS/i благодаря своей компактной конструкции идеально подходят для использования в мастерских и на заводах

\* Статья на правах рекламы.



Отличительной особенностью новых источников тока серии Fronius TPS/i, например, TPS 270i C PULSE с водяным охлаждением, является очень компактная конструкция



Источники тока TPS 270i C PULSE и TPS 320i C PULSE (на фото показан TPS 320i C PULSE) рассчитаны на сварочные токи до 270 и 320 А, а также сочетают превосходную функциональность платформы TPS/i и очень компактные размеры

газового и жидкостного охлаждения, дистанционное управление или удобная сварочная горелка PullMig, позволяют быстро и просто адаптировать устройства к конкретным ситуациям и областям применения.

Источники тока с полностью цифровым управлением снабжены функцией подключения к Интернету, что значительно упрощает обновление встроенного ПО на месте эксплуатации.

Новые устройства рассчитаны на все основные сетевые напряжения и частоты, что позволяет использовать их в любом уголке мира. Модели TPS 270i C PULSE и TPS 320i C PULSE позволяют сварщикам добиться высокого качества сварки и максимальной воспроизводимости результатов, а также обеспечивают максимальную производительность даже в самых суровых условиях эксплуатации.

*Fronius International — австрийское предприятие с главным офисом в Петтенбахе и отделениями в Вельсе, Тальхайме, Штайнхаусе и Замтледте. Предприятие специализируется на системах для зарядки батарей, сварочном оборудовании и солнечной электронике. Всего штат компании насчитывает 3385 сотрудников. Доля экспорта составляет 93 %, что достигается благодаря 24 дочерним компаниям, а также международным партнерам по сбыту и представителям Fronius более чем в 60 странах. Благодаря первоклассным товарам и услугам, а также 928 активным патентам, Fronius является лидером в области технологий на мировом рынке.*



**SHIFTING THE LIMITS**

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

## СВАРКА ЗА РУБЕЖОМ

**Сварка труб в экстремальных условиях**

*Последние несколько лет мировой энергетический рынок стремительно развивается. И развитые, и развивающиеся страны испытывают большую потребность в энергии для промышленности, жилых помещений и транспорта.*

Хотя все в большей мере используются возобновляемые источники энергии, такой ценный источник энергии как ископаемое топливо по-прежнему сохраняет за собой большую долю рынка. Доказано и общеизвестно, что получение энергии из каменного угля наносит ущерб окружающей среде, поэтому весьма привлекательным энергоносителем стал природный газ. Его можно добывать из нефтяных скважин или получать другими способами, например, методом гидравлического разрыва пласта. Большинство месторождений газа и нефти расположены вдали от конечных потребителей и обычно природный газ доставляют по трубам непосредственно до потребителей или до ближайшего порта. Трубопроводы проложены в суровой Сибири, через равнины Центральной Азии и пустыни Ближнего Востока и Африки.

Каждый год тысячи километров труб необходимо прокладывать и поддерживать в рабочем состоянии в экстремальных условиях, ничего общего не имеющих с нормативными заводскими условиями производства. Прокладка и ремонт трубопровода могут выполняться при температуре от  $-20$  до  $40$  °С. Дополнительную сложность вносят дожди, снегопады, снежные бури.

В первую очередь экстремальные погодные условия осложняют проведение подготовительных и сварочных работ. Для защиты деталей и оборудования можно использовать палатки и переносные сварочные навесы. С их помощью можно выполнять сварочные работы на месте, обеспечивая, по крайней мере, частичную изоляцию от атмосферных осадков. Даже при неблагоприятных погодных условиях необходимо следовать строгим критериям и правилам сварочного процесса. Каждую сварочную операцию тщательно планируют заранее, основываясь на требованиях квалификационных испытаний, в соответствии с технологическими картами сварки, протоколами аттестации сварочных работ и внутренними требованиями компаний. Как правило, все сварные соединения трубопровода должны пройти полную проверку. Сварщик выполняет визуальный контроль, после чего, в зависимости от обстоятельств, проводят радиографическое или ультразвуковое исследование. Когда ответственные сварочные работы ведутся в экстремальных условиях, особые требования предъявляются к мониторингу процесса сварки и к самому сварочному оборудованию.

Хороший пример экстремальных условий для сварки труб — тайга в июне: грунт после зимы мягкий и насыщенный водой, на солнце температура поднимается выше  $25$  °С.

Предварительно заготовленные секции трубы доставляются на рабочую площадку для монтажа трубопровода. Диаметр трубы более метра, длина секции 12 м. Предварительно заготовленную секцию стыкуют с трубопроводом на неустойчивом вязком грунте, для сварки сооружают защитный навес. Сварочные аппараты и другое оборудование размещено на гусеничном шасси возле места сборки, там же находится генератор, питающий оборудование.

Перед началом сварки область стыка подвергают предварительному нагреву, чтобы обеспечить качественное соединение и избежать дефектов, например, трещин. После предварительного нагрева два сварщика одновременно варят корневой шов с двух сторон трубы. Для выполнения корневого шва применяют специальный процесс сварки короткой дугой с использованием сплошной проволоки. Чтобы выполнить корневой шов, сварщик должен сосредоточиться на ответственной работе, невзирая на то, что ему приходится лежать на сыром топком грунте. Закончив корневой шов, сварщики выполняют визуальный осмотр, а затем другая бригада сварщиков сваривает оставшиеся проходы. Для этого используются орбитальный сварочный аппарат (MAG) и порошковая проволока. Во всех операциях используется один сварочный источник питания, меняются только механизмы подачи проволоки и виды применяемой проволоки. Когда сварное соединение готово, его обследуют и документируют в соответствии с установленной процедурой.

Компания Kemppi совместно со своими клиентами уточняет специальные требования, предъявляемые к сварке в экстремальных условиях, и работает над разработкой соответствующих технологий. В результате этих усилий уже созданы решения, отвечающие специальным требованиям: FastMig X и WiseRoot+ предоставляют клиентам Kemppi блестящие возможности для разработки процессов сварки для экстремальных природных условий.

Разработанный компанией Kemppi процесс сварки короткой дугой WiseRoot+ специально пред-

назначен для MAG-сварки корневых проходов в углеродистой, низколегированной и нержавеющей стали. Этот процесс, для которого применена самая современная технология источника питания, дает лучшие на рынке характеристики производительности, качества и удобства эксплуатации.

### Как работает WiseRoot+

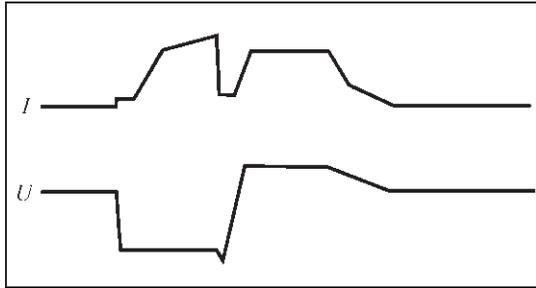


Рис. 1. Характеристики силы тока и напряжения в ходе процесса WiseRoot+ за один цикл короткого замыкания

В процессе WiseRoot+ используется сверхточное измерение напряжения, которое служит в качестве входного сигнала для управления силой тока (рис. 1). После распознавания короткого замыкания источником питания управляемое увеличение силы тока способствует переносу капли присадочного материала с проволоки. В момент, когда сила тока достигает надлежащего значения, она падает, прежде чем капля присадочного материала отделится и возникнет короткое замыкание. Короткое замыкание, возникающее при небольшой силе тока, обеспечивает плавный перенос присадочного материала, исключая при этом разбрызгивание. После разрыва цепи короткого замыкания возникает импульс тока, который разогревает сварочную ванну, но не приводит к переносу присадочного материала.

### Оборудование

Процесс WiseRoot+ является стандартной функцией многофункционального решения FastMig X компании Kemppi. Наряду с процессом WiseRoot+, этот аппарат обладает следующими функциями:

- сварка MIG/MAG;
- синергетическая сварка MIG/MAG;
- в качестве дополнительной функции — импульсная сварка MIG/MAG;
- ручная дуговая сварка (MMA);
- режим CV (постоянное напряжение);
- режим CC (постоянный ток);
- при подключении аппарата к устройству Kemppi MasterTig LT 250 также возможна сварка TIG.

### Использование WiseRoot+

Процесс WiseRoot+ может использоваться для односторонней сварки стыковых соединений труб и листов без подкладки. Сварка неповоротной горизонтальной трубы выполняется «на спуск» в направлении от точки «12 часов» к точке «6 часов». Сварка вертикальной трубы может выполняться также в горизонтальном пространственном положении. Сварка листов может выполняться в нижнем, горизонтальном, потолочном положении и в вертикальном положении сверху вниз.

Процесс WiseRoot+ чрезвычайно легок в использовании. Подходящая программа сварки выбирается исходя из того, какая присадочная проволока используется и какой защитный газ. Затем пользователь может выбрать скорость подачи сварочной проволоки, а подстройка всех остальных параметров выполняется выбранной программой сварки. Кроме того, сварщик также может воспользоваться функцией точной регулировки, чтобы повлиять на величину тепловложения от дуги на свариваемый металл. Эта точная регулировка влияет на провар корня шва. В частности, при сварке неповоротной трубы в направлении от 3 до 6 часов (рис. 2) при наличии сравнительно большого зазора корня шва может возникнуть недостаточный провар на корневом шве (рис. 3). Причина этого — слишком высокое тепловложение, при котором сварочная ванна смещается внутрь от корневого шва. В такой ситуации точную регулировку можно использовать для подстройки в отрицательном направлении, чтобы снизить тепловложение и качественно выполнить сварку также и на стороне корневого шва (рис. 4). В общем случае настройка «-» используется при сравнительно большой ширине зазора корня шва, чтобы предотвратить слишком сильный разогрев сварочной ванны большей площади. Настройка точной регулировки «+» используется при небольших зазорах корня, чтобы обеспечить проплавление кромок при узкой разделке.

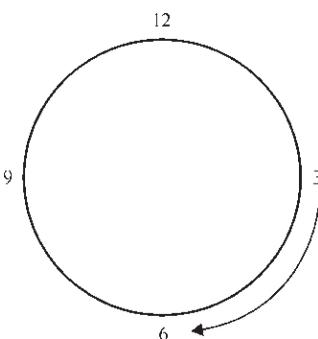


Рис. 2. Пространственные положения сварки для неповоротной трубы

По этим причинам, при изменении пространственного положения во время сварки неповоротно-

го стыка трубы может возникнуть необходимость регулировки настроек режима сварки. При использовании оборудования Kemppi FastMig X это можно сделать, не прерывая процесс сварки. Функция MatchChannel позволяет менять канал памяти «на лету», не останавливая сварку. Оптимальные параметры для разных пространственных положений можно сохранить в памяти MatchChannel. Позволяя варить в каждом положении с оптимальными параметрами, функция MatchChannel повышает качество и производительность. Остановка и возобновление сварки снижает производительность, поскольку необходимо зачистить конец шва, прежде чем продолжить сварку. А поскольку большинство дефектов сварки возникает в местах возобновления, функция MatchChannel повышает также и качество.

Функция MatchChannel также позволяет лучше выполнить начало и завершение сварки, если для параметров нагрева в другом канале памяти были сохранены более высокие значения (с использованием настройки точной регулировки «+»), благодаря чему сокращается риск возникновения дефектов. Если сварка начинается или заканчивается поверх законченного или прихваточного шва, то кромку предыдущего шва необходимо зачистить, чтобы избежать дефектов сварки.

### Разделка кромок

Технология WiseRoot+ была разработана для сварки корневых проходов стыковых швов. Размер и тип разделки кромок выбирают в соответствии с толщиной свариваемых деталей. Если толщина не превышает 5 мм, можно не делать скос кромок и использовать зазор 0–3 мм, в зависимости от толщины. При большей толщине основного металла можно использовать различные виды разделки. Если толщина между 10 и 12 мм, используют V-образную разделку (рис. 5) с зазором и притуплением кромок. Одно из преимуществ процесса WiseRoot+ состоит в том, что даже при самых узких зазорах обеспечивается стабильный провар. Можно уменьшить зазор до 2 мм и увеличить притупление до 2 мм. Это улучшает производительность по двум факторам: уменьшается объем шва, и сварку корневого прохода можно вести при более высоких значениях параметров.

При большей толщине соединяемых деталей более экономичным будет использование двойной V-образной или U-образной разделки (рис. 6), что помогает уменьшить объем шва.

Для одинарной и двойной V-образной разделки можно использовать одинаковые величины зазора и притупления кромок. При U-образной разделке зазор обычно равен 0, а притупление кромок составляет 1–2 мм. При такой разделке устанавливаются существенно большие значения параметров сварки и из-за высокой скорости процесса рекомендуется использовать автоматическую сварку.

В некоторых случаях зазор оказывается больше, чем на примерах, изображенных на иллюстрациях. Это не вызывает затруднений для технологии WiseRoot+, которая может работать с большими зазорами.

Разумеется, если зазор больше рекомендованного значения, снижается производительность, поскольку приходится использовать более низкие значения параметров сварки.

Сварочные испытания успешно проходили при величине зазора до 10 мм. Хотя такие широкие зазоры использовать не рекомендуется, они могут встречаться в сложных условиях применения, когда не гарантирована точная подгонка соединений.

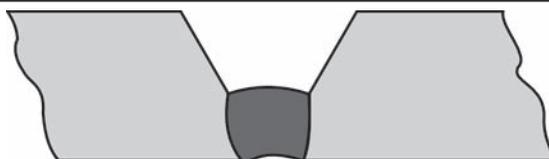


Рис. 3. Недостаточный провар корня шва

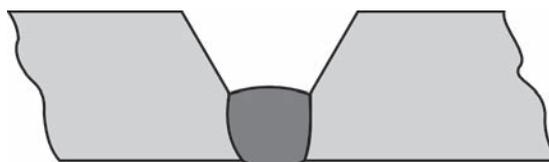


Рис. 4. Достаточный провар

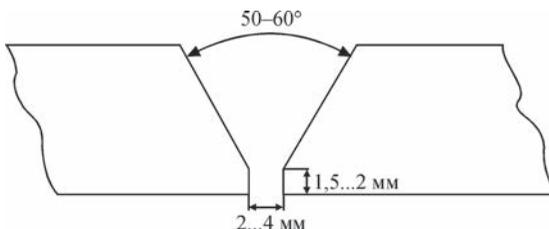


Рис. 5. V-образный шов при толщине основного металла от 10 до 12 мм

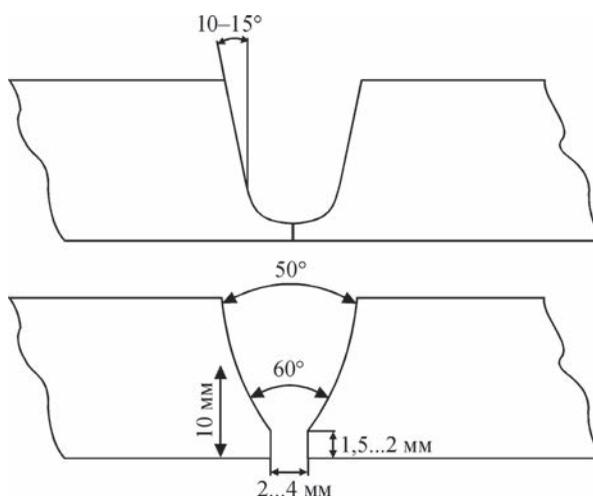


Рис. 6. Примеры разделки кромок стыковых соединений для большой толщины основного металла (>20 мм)

Таблица 1. Программы сварки в пакете сварочных программ для стали

Сварочная программа	Присадочная проволока	Диаметр	Защитный газ
F01	Сплошная железная проволока	0,8	Ar + 18 % CO <sub>2</sub>
F02	Сплошная железная проволока	0,9	
F03	Сплошная железная проволока	1,0	
F04	Сплошная железная проволока	1,2	
F21	Сплошная железная проволока	0,8	100 % CO <sub>2</sub>
F22	Сплошная железная проволока	0,9	
F23	Сплошная железная проволока	1,0	
F24	Сплошная железная проволока	1,2	
M04	Порошковая проволока	1,2	Ar + 18 % CO <sub>2</sub>
M24	Порошковая проволока	1,2	100 % CO <sub>2</sub>

Таблица 2. Программы сварки в пакете сварочных программ для нержавеющей стали

Сварочная проволока	Присадочная проволока	Диаметр	Защитный газ
S01	CrNi	0,8	Ar + 2 % CO <sub>2</sub>
S02	CrNi	0,9	
S03	CrNi	1,0	
S04	CrNi	1,2	

### Преимущества

Технология WiseRoot+ позволяет достичь высокой производительности и исключительно высокого качества при сварке корневых проходов. При ручной сварке корня неповоротного стыка трубы может быть использован ток до 200 А и скорость сварки 35 см/мин.

Процесс WiseRoot+ замечательно работает с проволокой диаметром от 0,8 до 1,2 мм. Нет необходимости менять проволоку на более тонкую для корневого прохода, поскольку проволока размером до 1,2 мм вполне для этого подходит. Такая толщина используется повсеместно, проволока доступна по цене и всегда есть в наличии.

При сварке стальной проволокой процесс WiseRoot+ работает с аргоновой смесью в качестве защитного газа с такой же стабильностью и низким уровнем разбрызгивания, как и при работе с углекислым газом. К преимуществам CO<sub>2</sub> как защитного газа, помимо низкой стоимости, относятся:

- ◆ более высокая устойчивость к загрязнениям → достигается более высокое качество;
- ◆ более высокие защитные свойства, в том числе от ветра при работе вне помещения → обеспечивается более высокое качество;
- ◆ более высокое напряжение дуги обеспечивает более глубокий провар → использование более узких зазоров → возможность сокращения объема шва и увеличение производительности.

Другими словами, использование новейшей технологии источника питания Kemppi дает возможность повысить качество и производительность без перехода на более дорогой защитный газ.

Для технологии WiseRoot+ не является препятствием увеличенный и переменный зазор корня шва. Она также дает хорошие результаты и в сложных условиях, где не гарантирована точная подгонка стыковых соединений.

### Заключение

Процесс WiseRoot+ — это наиболее совершенная технология MAG-сварки для выполнения корневых проходов. Использование новейшей технологии источника питания позволяет получить высокую производительность сварки и замечательное качество швов также и в сложных условиях применения. Теперь стало возможным сваривать корневые проходы стыков труб с неизменно высоким качеством только с одной стороны без необходимости использовать подкладку или зашлифовать и шлифовать зазоры. Устойчивый процесс без образования брызг делает работу сварщика более легкой и приятной.

### Области применения

Данный процесс идеально подходит для сварки корневых проходов в стали. В таблицах 1 и 2 приведены пакеты программ сварки, которые можно выбирать на аппарате при использовании различных присадочных материалов при сварке конструкционной и нержавеющей стали. Также имеются программы сварки цельной стальной проволокой с размерами в дюймах (1,14 мм) для смеси аргона и CO<sub>2</sub>. Этот тип проволоки обычно используется, например, в России при сварке корневых проходов на стыках газопроводов.

Процесс WiseRoot+ был специально разработан для сварки корневых проходов стыковых швов. При разработке этого продукта основное внимание уделялось сварке корневого прохода стыков труб во всех пространственных положениях.

Материал статьи предоставлен представительством Kemppi в Украине фирмой ООО «САММИТ»

## РОБОТИЗАЦИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ\*

В настоящее время в Украине нет предприятия, на котором бы не возникала задача модернизации и переоснащения существующих производственных мощностей. Все понимают — успешное развитие промышленного сектора зависит от того, насколько быстро и эффективно предприятие сможет пойти по пути 4-ой промышленной революции («Индустрия 4.0»), либо же останется в плену отсталых технологий и морально устаревшего оборудования. При этом страна надолго станет приложением, питающим развитие экономически более сильных стран. Модернизация промышленности — это, в первую очередь, постоянное совершенствование и взаимодействие предприятий малого и среднего бизнеса, способных быстро и эффективно реагировать на вызовы достижений мировой индустрии. Это налаживание узких технологических платформ и системных интеграторов, инжиниринговых компаний, производственных кластеров и т. д., создание общей платформы для их общения, объединения, взаимодействия.

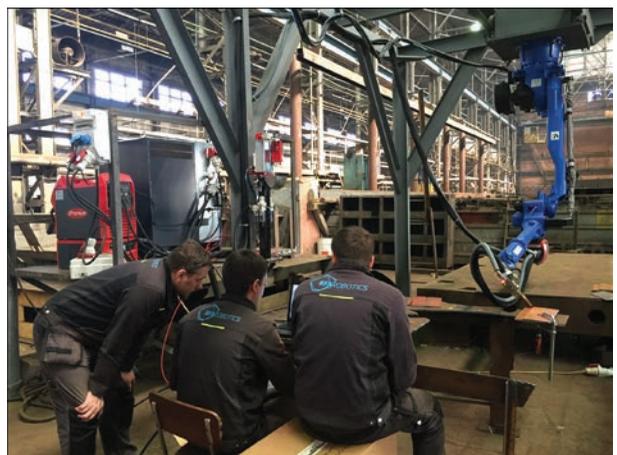
Предприятие «Триада-Сварка» вот уже много лет смело осваивает новое, борясь за него, предлагает, внедряет, не боится ошибиться, рассматривает себя в масштабах всей отрасли, работая в неразрывной связи с остальными предприятиями и отстаивая интересы страны в целом.

Успешно развивается на предприятии «Триада-Сварка» отдел роботизации RFA Robotics.

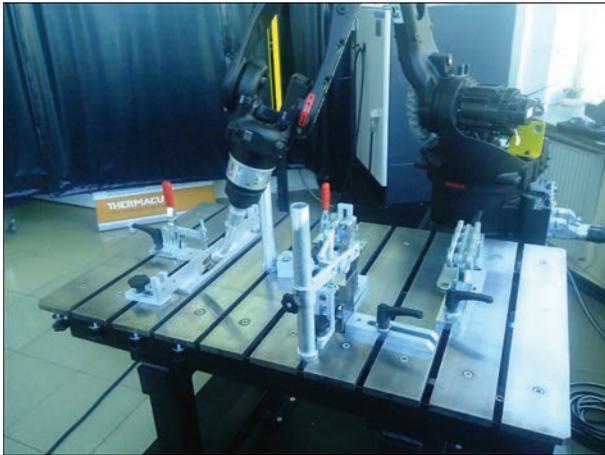
Компания является официальным интегратором промышленных роботизированных сварочных комплексов YASKAWA MOTOMAN (Япония), комплектует их сварочным оборудованием FRONIUS INTERNATIONAL (Австрия) и периферийным оборудованием ABICOR BINZEL (Германия). Всю оснастку, кондуктора и дополнительное оборудование предприятие RFA Robotics проектирует и производит самостоятельно.

Сегодня компания ведет несколько проектов по роботизации. Так, на завершающей стадии находится реализация проекта по установке, подключению и запуску в производство сварочного робота с самым большим в линейке компании YASKAWA радиусом действия 3106 мм, оснащенного лазерной системой *online* слежения за стыком шва и его корректировкой SCANSONIC. Комплектуется робот сварочной интеллектуальной системой TPS500i на ток до 500 А. Для уменьшения времени программирования и переналадки робота при сварке новых изделий заказчика предложено и поставлено программное обеспечение для написания рабочих программ Offline MotoSimEG VRS компании YASKAWA. Большинство компонентов системы уникальны и используются на украинском сварочном производстве впервые. Вся система подвешена на портал, по которому будет перемещаться в процессе работы.

Одним из последних проектов, реализованных RFA Robotics, стал проект использования робота YASKAWA для воздушно-плазменной резки в комплекте с аппаратом Hypertherm PMX65 и специальным роботизированным резаком. Применение роботизированного комплекса для плазменной резки дает возможность выполнять как обычную резку листа, так и 3D-резку изделий сложной конструкции на объемных заготовках, а оборудование Hypertherm обеспечивает качество реза на высоком уровне. Все программы для резки можно составлять на персональном компьютере с помощью программы для *offline* программирования MotoSimEG VRS



\* Статья на правах рекламы.



и устанавливать через USB-накопитель непосредственно в память контроллера. Также робот можно дооснастить комплектом для роботизированной сварки и он сможет выполнять две операции попеременно. Этот же робот можно поставить на трек или подвесить на портал, добавить манипулятор, использовать сменные столы, не привязываясь к размерам детали и ее статичному закреплению и перемещению лишь в заданной плоскости, что подтверждает универсальность применения роботов на производстве.

На финальной стадии завершения находится проект по внедрению РТК для сварки твердотопливных котлов большой мощности (до 100 кВт). В составе роботизированного комплекса: робот YASKAWA с радиусом действия 2010 мм, работающий в паре с двумя одноосевыми манипуляторами грузоподъемностью 1000 кг каждый и сварочным оборудованием TransPulsSynergic 5000 с максимальным сварочным током 500 А. Для реализации полной мощности сварочного аппарата выбрана сварочная горелка немецкого производителя ABICOR BINZEL со специальной геометрией гусака, которая работает в паре со станцией очистки горелки BRS-CC. Так как свариваемые изделия габаритные (длина около 2 м) и возможность точной (до 1 мм) сборки затруднена, принято решение использовать контактную систему поиска сварочного стыка SeamFindig, которая находит место расположения сварочного шва до сварки, автоматически вводит корректировки в траекторию перемещения робота при сварке, в результате сварочный шов располагается точно по стыку. Применение в этом проекте программы MotoSimEG VRC уменьшает время простоя робота (время для написания программ сварки для новых изделий). Также установлена система экономии газа EWR, позволяющая экономить защитный газ до 52 %.

Предприятие RFA Robotics успешно предлагает услуги аутсорсинга (не только сварки, но и резки), инжиниринга, разрабатывает технологические процессы под разные производственные задачи и внедряет их в производство.

RFA Robotics успешно освоило выпуск сборочно-сварочных столов, элементов крепления и зажимов, систем упоров, уникальных кондукторов для сварки, позволяющих позиционировать детали, сложные узлы с высокой точностью, легко перенастраивать их при смене задач. Модульная система стола позволяет создавать разнообразные необходимые рабочие поверхности.

Предприятие «Триада-Сварка» активно продвигается на рынке, переходит на новые уровни собственного развития и развития промышленной Украины. В следующем году компании исполняется 25 лет, а это четверть века эффективной работы на рынке сварочного оборудования!

Е. Г. Красносельская



Украина, г. Запорожье  
+38(061) 220-00-79, 233-10-58  
www: rfa-robotics.com





Межотраслевой учебно-аттестационный центр  
Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины



## Программы профессиональной подготовки на 2017 г.

Шифр курса	Наименование программы	Продолжительность	Сроки проведения	
<b>1. Повышение квалификации инженерно-технических работников</b> (с аттестацией на право технического руководства сварочными работами при изготовлении сварных конструкций в т.ч. подведомственных государственным надзорным органам)				
101	Техническое руководство сварочными работами на объектах, за которыми осуществляется государственный надзор	подготовка и аттестация	3 недели (112 ч)	
102		переаттестация	18 ч	
103	Расширение области аттестации руководителей сварочных работ	6 ч	апрель, ноябрь	
104	Техническое руководство сварочно-монтажными работами при строительстве и ремонте газопроводов из полиэтиленовых труб	подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	
105		переаттестация	1 неделя (32 ч)	
106	Техническое руководство сварочными работами при ремонте действующих трубопроводов (под давлением)	подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	
107		переаттестация	22 ч	
109	Техническое руководство работами по контактной стыковой сварке железнодорожных рельсов.	72 ч	март	
111	Подготовка и аттестация председателей комиссий по аттестации сварщиков - экспертов Украинского аттестационного комитета сварщиков (УАКС)	3 недели (112 ч)	январь, октябрь	
112	Расширение области аттестации председателей комиссий по аттестации сварщиков – экспертов УАКС	8 ч	январь, октябрь	
113	Подготовка и аттестация членов комиссий по аттестации сварщиков:	специалистов технологических служб, отвечающих за организацию аттестации сварщиков	2 недели (72 ч)	
114		специалистов служб технического контроля, отвечающих за контроль сварных соединений (включая специальную подготовку к аттестации по визуально-оптическому методу контроля)	2 недели (74 ч)	
115		специалистов служб охраны труда предприятий	2 недели (74 ч)	
116	Расширение области аттестации членов комиссий по аттестации сварщиков – специалистов технологических служб по сварке	6 ч	ноябрь	
117	Подтверждение полномочий (переаттестация) председателей комиссий по аттестации сварщиков - экспертов УАКС:	со стажем 3 года	32 ч	
118		со стажем 6 и более лет	20 ч	
119	Подтверждение полномочий (переаттестация) членов комиссий по аттестации сварщиков:	специалистов технологических служб по сварке: со стажем 3 года	32 ч	
120		со стажем 6 и более лет	20 ч	
121		специалистов по техническому контролю	16 ч	
122		специалистов по техническому контролю (включая спец. подготовку к аттестации по визуально-оптическому методу контроля)	36 ч	
123	специалистов по охране труда	16 ч	февраль, март, май, июнь, сентябрь, октябрь	
130	Переподготовка специалистов сварочного производства по программам Международного института сварки (МИС) с присвоением квалификации:	Международный инженер по сварке	453 / 126 ч <sup>1</sup>	
132		Международный технолог по сварке	372 / 91 ч <sup>1</sup>	
134		Международный специалист по сварке	248 / 60 ч <sup>1</sup>	
135		Международный практик по сварке	114 ч	
136		Международный дизайнер (конструктор) по сварке	40 ч	
137		Международный инспектор по сварке	полного уровня	230 ч
140			стандартного уровня	170 ч
139	базового уровня		115 ч	
149	для специалистов, которые имеют квалификацию «Международный инженер / технолог по сварке»	76/ 78	апрель, октябрь	
141	Металлографические исследования металлов и сварных соединений	специальная подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	
142		переаттестация	22 ч	
143	Физико-механические испытания материалов и сварных соединений	специальная подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	
144		переаттестация	20 ч	
145	Эмиссионный спектральный анализ (стилюскопирование) металлов и сплавов	специальная подготовка и аттестация	2 недели (74 ч)	
146		переаттестация	22 ч	
147	Повышение квалификации руководителей и специалистов рельсосварочных поездов	36 ч	по мере комплектования групп	

151	Производство сварочных материалов: организация, технологии и системы управления качеством	2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком
152	Ремонт, восстановление и упрочнение изношенных деталей		
153	Технологические процессы и обеспечение качества в авиастроении	76 ч	
<b>Тематические семинары</b> (возможно проведение на территории заказчика)			
161	Состояние нормативно-технической документации в области сварочного производства, тенденции и перспективы	2 дня (16 ч)	март, июнь
162	Обеспечение качества сварки. Требования национальных и международных стандартов	2 дня (16 ч)	апрель, июнь, октябрь
163	Проектирование металлических конструкций по ЕВРОКОДАМ	32 ч	февраль

## 2. Повышение квалификации педагогических работников системы профессионально-технического образования в области сварки

203	Повышение квалификации мастеров (инструкторов) производственного обучения по сварке с присвоением квалификации «Международный практик по сварке (IWP)»	186 ч	по согласованию с заказчиком
204	Повышение квалификации преподавателей специальных дисциплин профессионально-технических учебных заведений по направлению «Сварка» с присвоением квалификации «Международный специалист по сварке»	100 ч	

## 3. Профессиональная подготовка, переподготовка и повышение квалификации квалифицированных рабочих в области сварки и родственных технологий

(с присвоением квалификации в соответствии с национальными и международными требованиями)

### Курсовая подготовка СВАРЩИКОВ:

301	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	9 недель (352 ч)	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
302	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (TIG)	5 недель (192 ч)	
303	газовой сварки	3 недели (116 ч)	
304	механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG)	3 недели (112 ч)	
305	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	3 недели (112 ч)	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
306	автоматической дуговой сварки под флюсом / в защитных газах	3 недели (112 ч)	
307	электрошлаковой сварки	3 недели (112 ч)	
308	контактной (прессовой) сварки (рельсов, промышленных и магистральных нефте- и газопроводов)	3 недели (112 ч)	
309	пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб)	5 недель (196 ч)	

### Подготовка сварщиков по программам Международного института сварки с присвоением квалификации:

310	Международный сварщик угловых швов (IFW) с аттестацией по ДСТУ EN ISO 9606-1	130 – 210 ч <sup>2</sup>	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
312	Международный сварщик плоских соединений (IPW) с аттестацией по EN ISO 9606-1	250 – 380 ч <sup>2</sup>	
315	Международный сварщик труб (ITW) с аттестацией по EN ISO 9606-1	360 - 510 ч <sup>2</sup>	
318	Международный практик-сварщик (IWP) с аттестацией по EN ISO 9606-1	35 - 153 ч <sup>2</sup>	

### Переподготовка СВАРЩИКОВ с присвоением квалификации «Международный сварщик (IW)»:

321	переподготовка сварщиков ручной дуговой сварки покрытыми электродами (MMA) с аттестацией по ДСТУ EN ISO 9606-1	74 - 118 ч <sup>2</sup>	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
322	(переподготовка сварщиков механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG) с аттестацией по ДСТУ EN ISO 9606-1	74 - 112 ч <sup>2</sup>	
323	переподготовка сварщиков ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (TIG) с аттестацией по ДСТУ EN ISO 9606-1	76 - 112 ч <sup>2</sup>	

### Повышение квалификации СВАРЩИКОВ:

330	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	2 недели (72 ч)	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
331	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах	2 недели (72 ч)	
332	газовой сварки	2 недели (72 ч)	
333	механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG)	2 недели (72 ч)	
334	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком
335	автоматической дуговой сварки под флюсом / в защитных газах	2 недели (72 ч)	
336	электрошлаковой сварки	2 недели (72 ч)	

### Курсовая подготовка дефектоскопистов и контролеров:

340	ультразвукового контроля	196 ч	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
341	рентген и гамма контроля	188 ч	
342	магнитного контроля	180 ч	
343	контролеров неразрушающего контроля	196 / 72 ч <sup>3</sup>	
345	контролеров сварочных работ	154 ч	

### Целевая курсовая подготовка дефектоскопистов для железнодорожного транспорта:

350	магнитного контроля	120 ч	по согласованию с заказчиком
351	ультразвукового контроля	160 ч	
352	по комплексному ультразвуковому контролю колесных пар вагонов	160 ч	

**Целевая подготовка и подтверждение квалификации:**

362	металлизаторов по нанесению упрочняющих и защитных покрытий на металлы	электродуговым напылением	3 недели (112 ч)	по согласованию с заказчиком
363		газопламенным напылением	3 недели (112 ч)	
364		детонационным напылением	3 недели (112 ч)	
365		плазменным напылением	3 недели (112 ч)	
366	специалистов по поверхностной закалке колесных пар на установке высокотемпературной закалки УВПЗ - 2М»		72 ч	

**4. Аттестация персонала сварочного производства**

400	Аттестация руководителей (координаторов) сварочных работ в соответствии с ДСТУ ISO 14731		8 ч	проводится по окончании курсов 101-109
401	Специальная подготовка и аттестация сварщиков в соответствии с правилами НПАОП 0.00-1.16-96 и стандартами ДСТУ EN ISO 9606-1,2,3,4,5, ДСТУ ISO14732		72 ч	постоянно
402	Дополнительная и внеочередная аттестация сварщиков согласно с НПАОП 0.00-1.16-96		24 ч	
403	Периодическая аттестация сварщиков в соответствии с НПАОП 0.00-1.16-96, ДСТУ EN ISO 9606-1,2,3,4,5		32 ч	
405	Специальная подготовка и аттестация сварщиков авиационной промышленности в соответствии с ДСТУ ISO 24394		72 ч	
406, 457	Периодическая аттестация сварщиков в соответствии с международными (европейскими) стандартами EN ISO 9606-1		24 ч	
407	Специальная подготовка и аттестация операторов автоматической сварки плавлением в соответствии с стандартом ДСТУ ISO 14732		2 недели (72 ч)	
411	Специальная подготовка и аттестация сварщиков на допуск к выполнению сварочных работ при ремонте действующих магистральных трубопроводов (под давлением)		3 недели (112 ч)	
412	Периодическая аттестация сварщиков на допуск к выполнению сварочных работ при ремонте действующих магистральных трубопроводов (под давлением)		32 ч	
413	Специальная подготовка и аттестация операторов-сварщиков контактно-стыковой сварки арматуры		2 недели (72 ч)	
414	Аттестация сварщиков пластмасс в соответствии с ДСТУ EN 13067 (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб)			проводится по окончании курса 309
415	Периодическая аттестация сварщиков пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб)		32 ч	ежеквартально
421	Специальная подготовка дефектоскопистов к сертификации согласно ДСТУ EN 9712	ультразвуковой контроль	32 / 36 / 64 (I уп) ч <sup>4</sup>	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
423			40 / 48 / 72 / 80 / 144 (II уп) ч <sup>4</sup>	
427		радиографический контроль	36 / 40 / 72 (I уп) ч <sup>4</sup>	
430			40 / 48 / 76 / 80 / 152 (II уп) ч <sup>4</sup>	
433		визуально-оптический контроль	16 / 20 / 30 (I уп) ч <sup>4</sup>	
436	20 / 24 / 35 / 40 / 70 (II уп) ч <sup>4</sup>			
448	Переаттестация сварщиков контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов согласно требованиям ДСТУ ISO 14732		32 ч	февраль
454	Специальная подготовка и аттестация газорезчиков	газовой резки	3 недели (112 ч)	по согласованию с заказчиком
455		ручной и механизированной воздушно-плазменной резки	3 недели (112 ч)	

**5. Тренинги, тестирование и подтверждение квалификации**

501	Профессиональное тестирование и подтверждение квалификации сварщиков ручной дуговой сварки покрытыми электродами (ММА)	4 – 12 ч <sup>5</sup>	по согласованию с заказчиком
502	Профессиональное тестирование и подтверждение квалификации сварщиков ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (TIG)		
505	Профессиональное тестирование и подтверждение квалификации сварщиков механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG)	4 – 16 ч <sup>5</sup>	
510	Практические тренинги по различным способам сварки	8 – 32 ч <sup>5</sup>	

<sup>1</sup> - Продолжительность обучения определяется в зависимости от базовой профессиональной подготовки и опыта работы в сварочном производстве.

<sup>2</sup> - Продолжительность обучения зависит от специализации.

<sup>3</sup> - Длительность программы определяется по результатам входного тестирования.

<sup>4</sup> - Продолжительность обучения указывается в направлении ОСП (орган по сертификации персонала).

<sup>5</sup> - Длительность программы зависит от условий и характера испытаний.

- По согласованию с Заказчиками возможно проведение обучения по другим программам, не вошедшим в данный перечень.
- На период обучения слушателям предоставляется жилье с оплатой за наличный расчет.
- Стоимость обучения определяется при заключении договора.
- Для приема на обучение необходимо направить заявку с указанием шифра курса, количества специалистов и почтовых реквизитов предприятия.

## ПОДПИСКА на журнал «АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
720 грн.	1440 грн.	5400 руб.	10800 руб.	90 дол. США	180 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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



**Подписка на электронную версию журнала «Автоматическая сварка» на сайте: <http://www.patonpublishinghouse.com> В открытом доступе выпуски журнала с 2009 по 2014 гг. в формате \*.pdf.**

## Реклама в журнале «АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА»

### Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- ▶ Первая страница обложки, 190×190 мм
- ▶ Вторая, третья и четвертая страницы обложки, 200×290 мм
- ▶ Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки, 200×290 мм
- ▶ Вклейка А4, 200×290 мм
- ▶ Разворот А3, 400×290 мм
- ▶ 0,5 А4, 185×130 мм

### Технические требования к рекламным материалам

- ▶ Размер журнала после обрезки 200×290 мм

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

### Все файлы в формате IBM PC

- ▶ Corell Draw, версия до 10.0
- ▶ Adobe Photoshop, версия до 7.0
- ▶ QuarkXPress, версия до 7.0, InDesign C56
- ▶ Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

### Стоимость рекламы и оплата

- ▶ Цена договорная

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

- ▶ Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу

- ▶ Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок
- ▶ Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади

- ▶ Публикуется только профильная реклама (сварка и родственные технологии)

- ▶ Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Подписано к печати 31.10.2016. Формат 60×84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 9,09. Усл.-отт. 10,09. Уч.-изд. л. 10,22 + 4 цв. вклейки. Печать ООО «Фирма «Эссе».

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