Институт электросварки им. Е. О. Патона Национальной академии наук Украины
Международный научно-технический и производственный журнал

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА

№ 10 (736)
Октябрь 2014
Издается с 1948 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. Патон

Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко, А. Т. Зельниченко, В. В. Кныш, И. В. Кривцун, С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.), Ю. Н. Ланкин, В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.), Л. М. Лобанов, А. А. Мазур, О. К. Назаренко, В. Д. Позняков, И. К. Походня, И. А. Рябцев, Б. В. Хитровская (отв. секр.), В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко
(в редакционную коллегию входят ученые ИЭС им. Е. О. Патона)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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 Иудеи и Самарии, Ариэль, Израиль
В. И. Лысак
Волгоградский гос. техн. ун-т, РФ
У. Райсген
Ин-т сварки и соединений, Аахен, Германия
Б. Е. Патон
ИЭС им. Е. О. Патона, Киев, Украина
Я. Пилярчик
Ин-т сварки, Гливице, Польша
О. И. Стеклов
РНТСО, Москва, РФ
Г. А. Туричин
С.-Петербургский гос. политехн. ун-т, РФ
В. Г. Фартушный
Общество сварщиков Украины, Киев

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

Издается ежемесячно

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

Редактор
Т. В. Юштина
Электронная верстка
И. Р. Наумова, А. И. Сулима, Д. И. Середа

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

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

За содержание рекламных материалов редакция журнала ответственности не несет.
Цена договорная.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Семенов А. П. Методы математического моделирования процессов формирования и переноса капель электродного металла при сварке плавящимся электродом (Обзор) 3
Молтасов А. В., Самотрясов С. М., Кныш В. В., Чвертко П. Н., Гущин К. В. Влияние неравномерности нагрева на величину усилия осадки и время проковки при контактной стыковой сварке плоского кольца 13
Максимова С. В., Хорунов В. Ф., Мясоед В. В., Воронов В. В., Ковальчук П. В. Микроструктура паяных соединений алюминидов никеля 17
Кузьменко Д. Н., Устинов А. И., Косинцев С. Г., Петрушинец Л. В. Влияние скорости нагрева на температуру воспламенения многослойной фольги Ti/Al 24
Бузорина Д. С., Шолохов М. А., Шалимов М. П. Совершенствование методики расчета параметров режима многопроходной сварки в защитных газах 28

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Лобанов Л. М., Махненко О. В., Сапрыкина Г. Ю., Пустовой А. Д. Расчет на усталость сварных соединений несущих элементов тележки грузового вагона 32
Полещук М. А., Атрошенко М. Г., Пузрин А. Л., Шевцов В. Л. Оценка возможности получения равнопрочного соединения крупных стальных деталей методом автовакуумной пайки резьбового профиля 37
Письменный А. А., Губатюк Р. С., Прокофьев А. С., Мужиченко А. Ф., Шинкаренко А. С. Сварнопаяные трубные заготовки для трубопроводов и сосудов высокого давления 41
Гречанюк Н. И., Кучеренко П. П., Мельник А. Г., Ковальчук Д. В., Гречанюк И. Н. Промышленная электронно-лучевая установка L-8 для осаждения теплозащитных покрытий на лопатки турбин 48
Кайтель С., Ахренс С., Молл Х. Использование компьютерных технологий в обучении сварщиков 54

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Диссертация на соискание ученой степени 59

ХРОНИКА

И. В. Кривцуну — 60 60
Седьмая международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» 61
Научно-технические конференции в Николаеве 62
Памяти О. К. Назаренко 63

© НАН Украины, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, МА «Сварка», 2014

The E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine
International Scientific-Technical and Production Journal

Svarka Avtomaticheskaya / Automatic Welding

№ 10 (736)
October 2014

Published since 1948

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief
B. E. Paton

Yu. S. Borisov, G. M. Grigorenko, A. T. Zelnichenko (exec. director), V. V. Knysh, I. V. Krivtsun, S. I. Kuchuk-Yatsenko (vice-chief ed.), Yu. N. Lankin, V. N. Lipodaev (vice-chief ed.), L. M. Lobanov, A. A. Mazur, O. K. Nazarenko, I. K. Pokhodnya, V. D. Poznyakov, I. A. Ryabtsev, B. V. Khitrovskaya (exec. secr.), V. F. Khorunov, K. A. Yushchenko
(Editorial Board Includes PWI Scientists)

INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL

N.P. Alyoshin
N.E. Bauman MSTU, Moscow, Russia
Guan Qiao
Beijing Aeronautical Institute, China
A.S. Zubchenko
OKB«Gidropress», Podolsk, Russia
M. Zinigrad
College of Judea & Samaria, Ariel, Israel
V.I. Lysak
Volgograd State Technical University, Russia
B.E. Paton
PWI, Kyiv, Ukraine
Ya. Pilarczyk
Welding Institute, Gliwice, Poland
U. Reisgen
Welding and Joining Institute, Aachen, Germany
O.I. Steklov
Welding Society, Moscow, Russia
G.A. Turichin
St. Petersburg State Polytechn. Univ., Russia
V.G. Fartushnyi
Welding Society of Ukraine, Kyiv

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

Published monthly

Address of Editorial Board:
11 Bozhenko 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

Editor
T. V. Yushtina
Electron galley
I. R. Naumova, A. I. Sulima, D. I. Sereda

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

CONTETS

SCIENTIFIC AND TECHICAL

Semenov O. P. Methods of mathematical modeling of processes of formation and transfer of electrode metal drops in consumable electrode welding (Review) 3

Moltasov A. V., Samotryasov S. M., Knysh V. V., Chvertko P. N., Gushchin K. V. Effect of heating non-uniformity on values of upsetting force and time of forging in flash-butt welding of flat ring 13

Maksimova S. V., Khorunov V. F., Myasoed V. V., Voronov V. V., Kovalchuk P. V. Microstructure of brazed joints of nickel aluminides 17

Kuzmenko D. N., Ustinov A. I., Kosintsev S. G., Petrushinets L. V. Influence of heating rate on temperature of inflammation of multilayer foil Ti/Al 24

Buzorina D. S., Sholokhov M. A., Shalimov M. P. Updating of methods of calculation of parameters of multipass shielded-gas welding mode 28

INDUSTRIAL

Lobanov L. M., Makhnenko O. V., Saprykina G. Yu., Pustovoy A. D. Calculation of fatigue of welded joints of load-carrying elements of cargo car carriage 32

Poleshchuk M. A., Atroshenko M. G., Puzrin A. L., Shevtsov V. L. Evaluation of feasibility of producing of full-strength joint of large steel parts using method of autovacuum brazing of threaded profile 37

Pismenny A. A., Gubatyuk R. S., Prokofyev A. S., Muzhichenko A. F., Shinkarenko A. S. Braze-welded tubular billets for pipelines and high-pressure vessels 41

Grechanyuk N. I., Kucherenko P. P., Melnik A. G., Kovalchuk D. V., Grechanyuk I. N. Industrial electron beam installation L-8 for deposition of heat-protective coatings on turbine blades 48

Keitel S., Ahrens Ch., Moll H. Application of computer technologies in training of welders 54

BRIEF INFORMATION

Thesis for scientific degree 59

NEWS

I. V. Krivtsun is 60 60

VII International Conference «Mathematic Modeling and Information Technologies in Welding and Related Processes» 61

Scientific and technical conferences in Nikolaev 62

In memory of O. K. Nazarenko 63

«Avtomaticheskaya Svarka» journal abstracted & indexed in Ukrainian refereed journal «Source», RJ VINITI «Welding» (Russia), «Welding Abstracts», ProQuest (UK), EBSCO Research Database, CSA Materials Research Database with METADEX (USA), Questel Orbit Inc. Weldasearch Select (France); Presented in Russian Science Citation Index & «Google Scholar»; Abstracted in «Welding Institute Bulletin» (Poland) & «Rivista Italiana della Saldatura» (Italy); Covered in the review of the Japanese journals «Journal of Light Metal Welding», «Journal of the Japan Welding Society», «Quarterly Journal of the Japan Welding Society», «Journal of Japan Institute of Metals», «Welding Technology».

© NAS of Ukraine, PWI, IA «Welding», 2014

УДК 621.791.75.037

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ И ПЕРЕНОСА КАПЕЛЬ ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ (Обзор)

А. П. СЕМЕНОВ
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Процессы нагрева и плавления сварочной проволоки, формирования и переноса капель электродного металла при сварке плавящимся электродом во многом определяют производительность и качество сварки. В свою очередь характер плавления и переноса металла при данном способе сварки определяется большим количеством таких физических явлений, как например, тепло- и массоперенос, газо(гидро)динамика, электромагнитные процессы, протекающих в дуговой плазме, на поверхности и в объеме расплавленного металла электрода-капли. В настоящей работе проведен обзор существующих методов теоретического исследования и математического моделирования указанных процессов, позволяющих прогнозировать такие характеристики переноса электродного металла, как объем и форма капель, их тепловое и гидродинамическое состояние, частоту отрыва и др. Проанализированы преимущества и недостатки рассмотренных моделей, а также сформулированы основные направления их дальнейшего развития. Библиогр. 37, табл. 1, рис. 11.

Ключевые слова: сварка плавящимся электродом, математическое моделирование, формирование капли электродного металла

Интерес к проблеме переноса металла при сварке плавящимся электродом обусловлен рядом причин. Известно, что формирование капли электродного металла может сопровождаться перегревом капли, приводящим к значительным потерям легирующих элементов, которые содержатся в сварочной проволоке, объемным вскипанием и разбрызгиванием металла капли, замыканием дугового промежутка и др. Кроме того, характер переноса металла в значительной степени оказывает влияние на процессы, протекающие в сварочной ванне, что в свою очередь определяет формирование сварного шва. Обеспечение направленного переноса металла при сварке в различных пространственных положениях также имеет важное значение. Поэтому в настоящей работе изложены известные теоретические подходы и описаны существующие математические модели, позволяющие прогнозировать основные характеристики переноса металла при различных технологических параметрах процесса сварки плавящимся электродом.

Методы математического моделирования формирования капель и переноса электродного металла при сварке плавящимся электродом можно условно разделить на две основные группы (рис. 1). К первой относятся подходы, которые дают возможность прогнозировать лишь отдельные характеристики процесса переноса металла такие, как размер и частота отрыва капель. Основной недостаток этих моделей заключается в том, что они не позволяют определять форму капли, а также описывать явления переноса заряда и энергии в расплавленном электродном металле, сопровождающие рассматриваемый технологический процесс. Первая группа включает методики Static Force Balance Theory (SFBT) [1–3], Pinch Instability Theory (PIT) [4–6], а также Dynamic Force Balance Theory (DFBT) [7, 8]. Ко второй группе относится модель формирования капли в

Рис. 1. Классификация методов теоретического исследования процессов формирования и переноса капель электродного металла

© А. П. Семенов, 2014

рамках гидростатического приближения [9–11], а также модели, в основе которых лежат уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости. В свою очередь в подгруппе динамических моделей можно выделить приближение тонкой струи [12–14], а также модели, основанные на полной системе уравнений Навье–Стокса [15–20]. Рассмотрим наиболее распространенные из перечисленных выше методов.

SFBT. В основе этого метода лежит анализ величины равнодействующей всех сил, приложенных к капле расплавленного металла. Размеры капель и частота их обрыва вычисляются исходя из критерия обрыва. Предполагаем, что капля имеет осесимметричную форму и ее обрыв происходит в момент, когда сила, направленная на отрыв капли, сравнима по абсолютной величине со значением удерживающей силы. Формирование и отрыв капли определяется совместным действием сил поверхностного натяжения, тяжести, электромагнитной, а также аэродинамической силы, обусловленной механическим взаимодействием капли металла с потоком защитного газа. Сила поверхностного натяжения вычисляется с помощью формулы

$$F_s = 2\pi R_w \gamma, \tag{1}$$

где R_w — радиус электрода; γ — коэффициент поверхностного натяжения жидкого металла. Отметим, что в процессе роста капли аксиальная компонента удерживающей силы изменяется по значению и формула (1) определяет лишь ее максимально возможное значение (оценка сверху). Сила тяжести вычисляется из предположения, что капля имеет форму сферы радиусом R_d

$$F_g = \frac{4}{3}\pi R_d^3 \rho g, \tag{2}$$

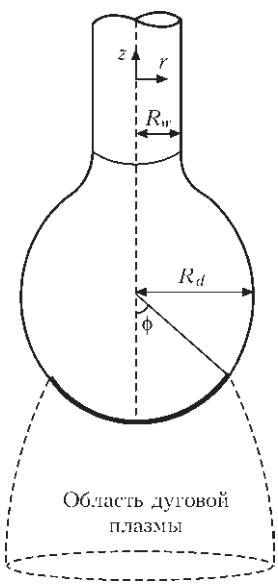


Рис. 2. Схема к анализу метода SFBT

где ρ — плотность металла капли; g — ускорение свободного падения. Для определения интегральной электромагнитной силы обычно используется подход, предложенный в работе [21]. Запишем окончательное выражение для вычисления силы Лоренца, действующей на каплю:

$$F_{em} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi}\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{1-\cos\phi} - \frac{2}{(1-\cos\phi)^2}\times\right.$$
$$\left.\times\ln\left(\frac{2}{1+\cos\phi}\right) - \ln\left(\frac{R_d \sin\phi}{R_w}\right)\right), \tag{3}$$

где угол ϕ определяет токопроводящую область на поверхности капли (область анодной привязки дуги) (рис. 2).

Аэродинамическое сопротивление приближенно вычисляется как сила, действующая на сферу в потоке газа:

$$F_a = \pi R_d^2 C_D \frac{\rho_g v_g^2}{2}, \tag{4}$$

где C_D — коэффициент аэродинамического сопротивления; ρ_g, v_g — плотность и скорость потока защитного газа соответственно. Размеры оторвавшейся капли находятся путем решения нелинейного уравнения относительно неизвестной величины R_d

$$F_s = F_a(R_d) + F_{em}(R_d) + F_g(R_d). \tag{5}$$

Частота обрыва капель легко вычисляется при известных значениях скорости подачи проволоки и радиуса капли.

Как видно, анализ силовых факторов, оказывающих влияние на характеристики переноса металла, скорее носит оценочный характер, поскольку поверхность капли полагается сферической. Возможно, именно поэтому наилучшее соответствие между экспериментальными результатами и расчетными данными, полученными с помощью метода SFBT, наблюдается в случае крупнокапельного режима переноса металла (рис. 3). Кроме того,

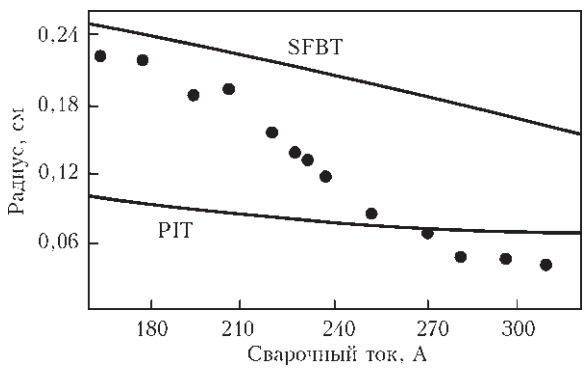


Рис. 3. Зависимость размеров оторвавшихся капель от величины силы тока при сварке стальной проволокой диаметром 1,2 мм в смеси Ar + 2 % O_2. Сравнение экспериментальных (точки) данных с расчетными (сплошные линии), полученными с помощью методов SFBT и PIT [22]

при выводе выражения (3) делалось допущение, что плотность тока имеет равномерное распределение в области анодной привязки дуги. Следует также отметить, что в рамках SFBT нельзя обосновать влияние различных видов защитного газа, а также длины вылета электрода на процесс формирования и отрыва капель.

DFBT. Эта модель во многом имеет сходство с моделью SFBT. В связи с этим в настоящей работе не уделяется внимание ее детальному описанию. Основное отличие модели DFBT от SFBT заключается в том, что в ней дополнительно учитываются инерционные силы.

PIT. Формирование капель электродного металла в рамках модели PIT рассматривается как распад цилиндрической струи жидкости. Эта модель представляет собой обобщение теории неустойчивости Рэлея–Плато на случай токонесущей струи. Следуя работам [4, 5] изложим основные положения данной модели. Рассмотрим бесконечно длинную струю жидкости радиусом R_0, по которой протекает электрический ток I (рис. 4).

Полагаем, что поверхность жидкости претерпевает гармоническое возмущение малой амплитуды α

$$R_s = R_0 + \alpha e^{\omega t + ikz},\ \alpha << R_0, \qquad (6)$$

где ω — параметр, характеризующий скорость нарастания возмущения; k — волновое число рассматриваемой моды. Путем решения линеаризированной задачи магнитной гидродинамики для струи жидкости выводится дисперсионное уравнение

$$\omega^2 = x\left(1-x^2\right)\frac{I_1(x)}{I_0(x)}\theta_\gamma + \left(1+\frac{x}{2}\left(\frac{I_1(x)}{I_0(x)}-\frac{I_0(x)}{I_1(x)}\right)\right)\theta_J,\ x = R_0 k, \qquad (7)$$

где $\theta_\gamma = \gamma/\rho R_0^3$, $\theta_J = \mu_0 I^2/\rho\pi^2 R_0^4$; $I_n(x), n = 0,1$ — модифицированная функция Бесселя. Из рис. 5 видно, что возмущения, длина волны которых

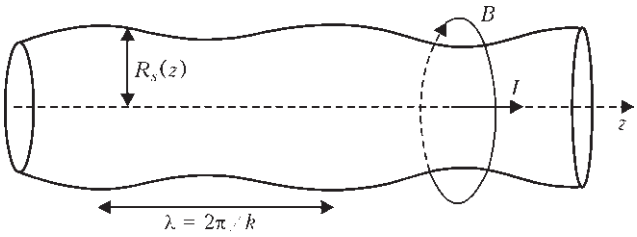


Рис. 4. Неустойчивость токонесущей струи жидкости

меньше $\lambda_c = x_c/2\pi R_0$, являются затухающими. Поскольку зависимость $\omega^2(x)$ является немонотонной, существуют моды возмущений λ_m, которым соответствует максимальная скорость распространения (рис. 5).

Анализ уравнения (7) позволяет определить

$$\begin{cases} \lambda_c = \dfrac{2\pi R_0}{0,923\cdot\theta^{0,274}}, \\ \lambda_m = \dfrac{2\pi R_0}{0,625\cdot\theta^{0,278}}, \\ \omega_m^2 = 0,0616\cdot\theta_\gamma\theta^{0,278}, \end{cases} \qquad (8)$$

где $\theta = \mu_0 I^2/\pi^2\gamma R_0$. Дальнейшее построение модели PIT основано на зависимостях (8). Полагаем, что длина участка струи, из которого в дальнейшем формируется капля, равна 3λ/4 (рис. 6). При переходе от капельного режима переноса металла к струйному оплавленный конец электрода приобретает карандашеподобную форму (taper formation), вследствие этого радиус основания капли оказывается значительно меньше, чем радиус проволоки. В модели этот фактор учитывается через геометрический параметр δ, определяющий взаимосвязь $R_0 = \delta R_w$. Выбор величины δ зависит от рассматриваемого характера переноса. Для описания формирования больших капель используют значения δ > 1, тогда как для струйного режима δ < 1.

Запишем окончательно выражения, которые дает модель PIT для объема капель V_d и частоты их обрыва f_d:

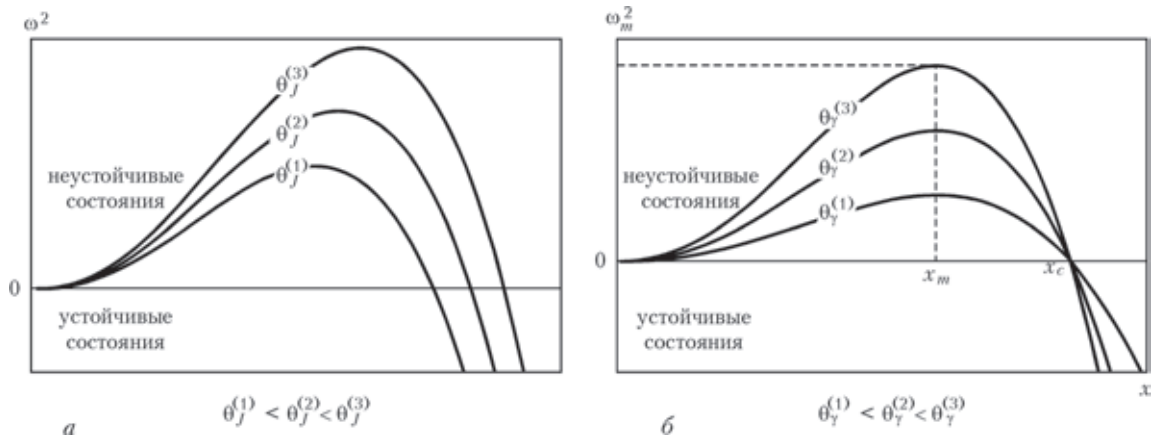


Рис. 5. Влияние силы тока (*а*) и поверхностного натяжения (*б*) на скорость распространения неустойчивости

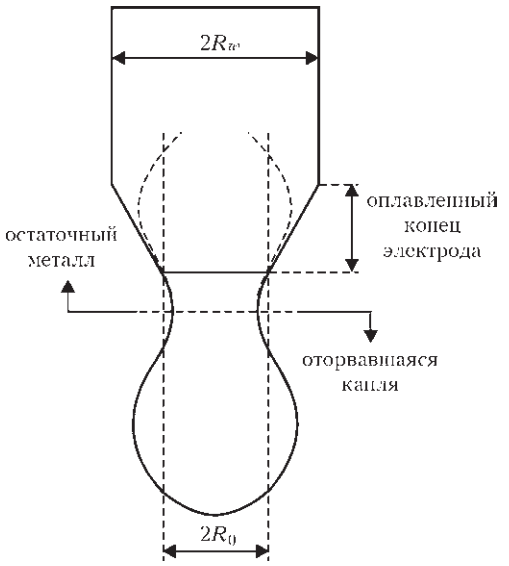


Рис. 6. Схема формирования капли в рамках модели PIT [5]

$$V_d = \frac{\pi R_w^2}{2}\delta^2\lambda_m, \tag{9}$$

$$f_d = \frac{2V_w}{\delta^2\lambda_m}, \tag{10}$$

где V_w — скорость подачи проволоки.

Наилучшее соответствие между экспериментальными данными и результатами, полученными с помощью метода PIT (см. рис. 3), наблюдается в случае больших значений сварочного тока ($I > 240$ А), для которых характерен струйный перенос металла. Модель PIT не требует значительных вычислительных затрат и специализированного программного обеспечения для определения основных характеристик переноса металла. Однако, как и предыдущая модель, PIT не может пояснить влияние вида защитного газа и размеров вылета электрода на процесс переноса металла. Кроме того, при разработке метода PIT в работах [4, 5] делалось серьезное допущение о том, что полный ток сосредоточен в объеме струи жидкости, что явно не согласуется с экспериментальными наблюдениями. За рамками модели остается также взаимосвязь величины δ с другими технологическими параметрами сварочного процесса. В работе [6] предпринята попытка исправить некоторые из указанных выше недостатков модели: учитывается протекание тока через поверхность струи; эффективный радиус струи R_0 определяется в зависимости от значения тока.

Модель формирования капли в рамках гидростатического приближения. Проблеме нахождения равновесной формы свободной поверхности жидкости в поле силы тяжести и анализу ее устойчивости посвящены многочисленные работы, результаты которых подробно изложены в монографиях [23, 24]. Лишь в редких случаях при решении данного класса задач удается применить аналитические методы. Как правило, для этой цели (для нахождения решения) привлекается аппарат численных методов. Теорию капиллярных поверхностей легко обобщить на случай более сложных процессов, где присутствуют, а порой оказывают доминирующее влияние электромагнитные силы, а также силы, обусловленные давлением пара, который испаряется со свободной поверхности. Математическая модель формирования капли электродного металла, учитывающая влияние электромагнитных сил, впервые была предложена в работе [10]. Остановимся на основных положениях этой модели. Суть проблемы состоит в определении формы и объема предельно устойчивой капли, висящей на конце электрода с заданным радиусом. Полагаем, что форма капли обладает свойством осевой симметрии и может быть описана в цилиндрической системе координат как функция $R = R(z)$, $0 \le z \le L_d$, где L_d — высота капли. Рассматриваемая модель базируется на уравнениях гидростатики

$$\begin{cases} \dfrac{\partial P}{\partial r} + j_z B = 0, \\ -\dfrac{\partial P}{\partial z} + j_r B - \rho g = 0 \end{cases} \tag{11}$$

и законе Лапласа

$$\gamma\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = P(R, z), \tag{12}$$

где P — давление в жидкости; R_1, R_2 — главные радиусы кривизны поверхности; j_r, j_z — компоненты вектора плотности тока; B — индукция магнитного поля. Основные уравнения модели имеют вид

$$\begin{cases} \dfrac{dP_0}{dz} = -\rho g + \dfrac{\mu_0 R^2}{16}\dfrac{d}{dz}\left(\dfrac{I^2}{\pi^2 R^4}\right), \\ P_0 = \dfrac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 R^2} + \gamma\left(-\dfrac{R''}{\left(1+R'^2\right)^{3/2}} + \dfrac{1}{R\left(1+R'^2\right)^{1/2}}\right), \end{cases} \tag{13}$$

$$0 \le z \le L_d,$$

где $P_0(z) = P_0(0, z)$ — давление на оси капли; μ_0 — магнитная постоянная; $I = I(z)$ — полный ток, протекающий в сечении капли z = const. Уравнения (13) дополняются граничными условиями

$$R\big|_{z=0} = 0, \;\; R\big|_{z=L_d} = R_w, \tag{14}$$

а также интегральным условием

$$V_d = \pi \int_0^{L_d} R^2 dz. \tag{15}$$

При решении задачи также необходимо знать, как ток, протекающий через поперечное сечение капли, изменяется в зависимости от высоты. В работе [10]

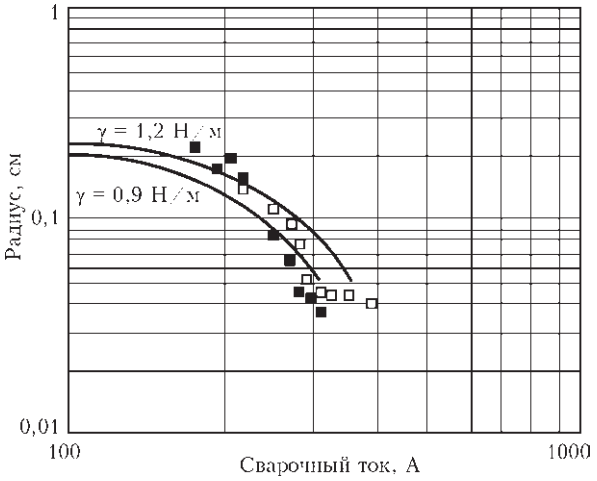


Рис. 7. Зависимость радиуса оторвавшейся капли от сварочного тока: ■, □ — экспериментальные данные соответственно работ [22, 25]; сплошные кривые — численное моделирование [10]

для этого используется линейная аппроксимация $I(z) = I_0 z/L_d$. Размер области интегрирования L_d является неизвестной величиной и подлежит определению. Для нахождения численного решения задачи (13)–(15) используется метод Рунге–Кутта. Важно также отметить, что для заданного радиуса проволоки и объема капли такое решение не единственно. Среди множества решений необходимо выбрать лишь то, которое удовлетворяет критерию устойчивости [23]. В работе [10] также проведено сравнение экспериментальных данных [22, 25] для радиуса оторвавшейся капли с расчетными значениями аналогичной величины, полученными с помощью рассматриваемой модели (рис. 7). Численные расчеты проведены для сварки малоуглеродистой стали при диаметре электрода 1,2 мм. Как показывают вычислительные эксперименты, для фиксированного радиуса электрода существует пороговое значение силы тока I_{th}, при котором задача (13)–(15) устойчивого решения не имеет. Как полагает автор [10], данное значение силы тока соответствует переходу от капельного режима переноса металла к струйному. Для вычисления этого параметра предлагается аппроксимационная зависимость

$$I_{th} = \sqrt{3{,}85 \cdot 4\pi^2 R_w \gamma / \mu_0}. \qquad (16)$$

Важным преимуществом гидростатических моделей является их относительная простота. Проведение расчетов на базе этих моделей не требует значительных вычислительных ресурсов. Однако такой подход позволяет прослеживать формирование капли лишь до наступления потери устойчивости. За рамками рассмотренной модели также остаются процессы переноса тепла в объеме металла. Таким образом, более полное описание процесса формирования капли на конце плавящегося электрода должно базироваться на моделях, учитывающих гидродинамические процессы, которые протекают в капле.

Приближение тонкой струи. Модель, использующая для описания гидродинамических процессов в капле полную систему уравнений Навье–Стокса, требует при численной реализации значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает ее применение при массовом численном эксперименте. В качестве альтернативы этой модели рассматривается приближение тонкой струи [26], адаптированное к условиям сварки плавящимся электродом [14]. При разработке модели использованы следующие гипотезы: 1) фронт плавления имеет плоскую форму, 2) скорость подачи проволоки соответствует скорости ее плавления, 3) отсутствует вихревое движение металла внутри капли, 4) форма столба дуги считается заданной. Модель базируется на следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial V_0}{\partial t} + V\dfrac{\partial V_0}{\partial z} = -\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial p_0}{\partial z} + \dfrac{3\nu}{h^2}\dfrac{\partial}{\partial z}\left(h^2\dfrac{\partial V_0}{\partial z}\right) + g, \\ \dfrac{\partial h^2}{\partial t} + \dfrac{\partial\left(V_0 h^2\right)}{\partial z} = 0, \\ p_0 = 2\gamma K + \int\limits_0^{\infty} j_z B dr, \end{cases} \qquad (17)$$

где $V_0 = V_0(z, t)$ — аксиальная компонента скорости на оси капли; $h = h(z, t)$ — функция, описывающая форму свободной поверхности; $p_0 = p_0(z, t)$ — давление на оси капли; K — средняя кривизна поверхности. Начальные и граничные условия для уравнений (17) имеют вид

$$h(z,0) = h_0(z), V_0(z,0) = 0, z \in \left(L_w, L_w + L_d^{(0)}\right), \qquad (18)$$

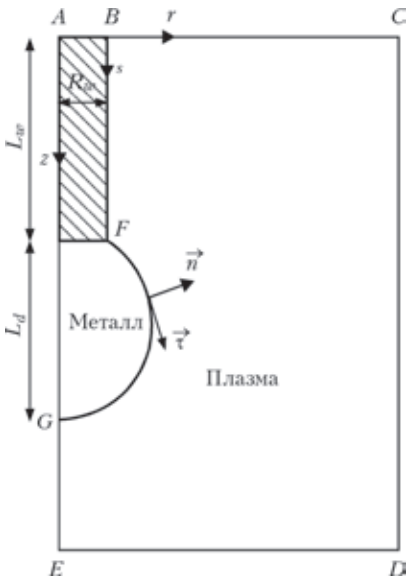


Рис. 8. Схема расчетной области

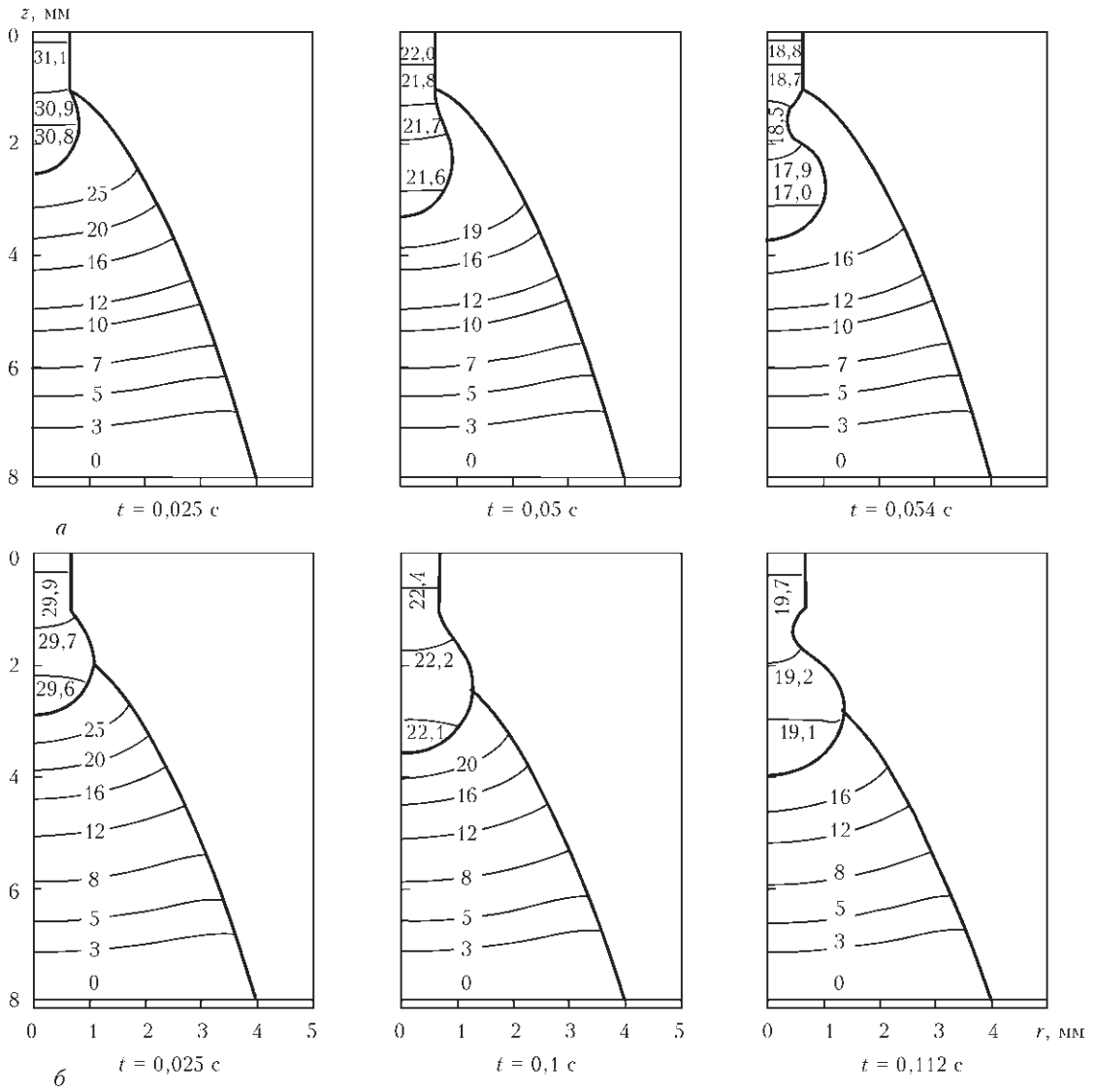


Рис. 9. Динамика формирования капли [14] (материал — малоуглеродистая сталь, защитный газ — Ar, I = 200 А, R_w = 0,6 мм, V_w = 4 м/мин): *а* — область привязки дуги, соответствующая границе плавления; *б* — область привязки дуги, соответствующая максимальному радиусу капли

$$V_0\left(L_w + L_d, t\right) = \frac{dL_d}{dt},\ V_0\left(L_w, t\right) = V_w,$$
$$h\left(L_w + L_d, t\right) = 0,\ h\left(L_w, t\right) = R_w, \qquad (19)$$

где $L_d^{(0)}$, $h_0(z)$ — соответственно длина капли и форма ее поверхности в начальном состоянии. Решение задачи (17)–(19) находится в области $L_w + L_d \geq z \geq L_w$ (рис. 8).

Длина капли, как и в случае гидростатической модели, подлежит определению. Результаты расчета, полученные с помощью описанной модели для двух вариантов привязки дуги к поверхности капли, приведены на рис. 9.

Модель формирования капли, базирующаяся на уравнениях тонкой струи, является достаточно эффективным инструментом для получения информации о характеристиках переноса металла, однако все же она не позволяет описать ряд явлений, оказывающих доминирующее влияние на процесс теплопереноса. Как показывают численные оценки [27], металл внутри капли вовлекается в вихревое движение, причиной этому служит эффект Марангони и влияние электромагнитных сил. Интенсивное перемешивание металла капли также подтверждается экспериментальными исследованиями [28]. Вследствие этого конвективный механизм переноса тепла в металле капли преобладает над процессом теплопроводности. Поскольку модель тонкой струи не позволяет описать эффекты, связанные с вихревым движением жидкого металла, построить на ее основе адекватную самосогласованную модель формирования капли не представляется возможным.

Модель формирования капли на базе полной системы уравнений Навье–Стокса. Среди множества моделей формирования капли данную модель по праву можно назвать самой сложной, поскольку она охватывает основные физические факторы, влияющие на протекание процесса. К

тому же разработка вычислительного алгоритма для решения соответствующих уравнений сопряжена со множеством трудностей. Запишем математическую формулировку проблемы в цилиндрической системе координат

$$\begin{cases} \rho\left(\dfrac{\partial u}{\partial t}+u\dfrac{\partial u}{\partial r}+v\dfrac{\partial u}{\partial z}\right)=-\dfrac{\partial P}{\partial r}+\mu\left(\Delta u-\dfrac{u}{r^2}\right)-j_z B, \\ \rho\left(\dfrac{\partial v}{\partial t}+u\dfrac{\partial v}{\partial r}+v\dfrac{\partial v}{\partial z}\right)=-\dfrac{\partial P}{\partial z}+\mu\Delta v+g\rho+j_r B, \\ \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial}{\partial r}(ru)+\dfrac{\partial v}{\partial z}=0. \end{cases} \quad (20)$$

Здесь u, v — радиальная и аксиальная компоненты вектора скорости $\vec{V}$ соответственно; μ — динамическая вязкость металла капли. Область интегрирования *ABFG* для уравнений (20) охватывает зону жидкого металла и твердую часть электрода (см. рис. 8). Полагаем, что в начальный момент времени $t = t_0$ движение металла отсутствует: $\vec{V}\big|_{t=t_0}=0$. Граничные условия для уравнений (20) имеют вид

$$u\big|_{AG}=0,\ v\big|_{AB}=V_w, \quad (21)$$

$$\left(P-2\mu\frac{\partial V_n}{\partial n}\right)\Bigg|_{BFG}=2\sigma K+P_{ev}, \qquad \mu\left(\frac{\partial V_n}{\partial s}+\frac{\partial V_\tau}{\partial n}\right)\Bigg|_{BFG}=\frac{\partial\gamma}{\partial s}, \quad (22)$$

$$\left(\vec{V}\big|_{BFG}-\vec{V}_s,\vec{n}\right)=0, \quad (23)$$

где $\vec{V}_s$ — скорость движения поверхности; V_n, V_τ — проекции вектора скорости на нормаль и касательную к поверхности соответственно; P_{ev} — реактивное давление паров металла при конвективном испарении. Следует отметить, что условия (22) выражают баланс нормальных и касательных напряжений на свободной поверхности металла капли. Кинематическое условие (23) непосредственно следует из баланса массы на поверхности. При численном решении задачи гидродинамики вязкость в твердой фазе задается достаточно большой (в 10^6 раз больше вязкости жидкого металла). Это позволяет подавить движение металла в твердой фазе, а также исключает необходимость адаптировать конечно-элементную сетку под форму фронта плавления и задавать дополнительные граничные условия на его поверхности. Такой подход впервые был предложен в работе [29] и встречается в литературе под названием «метод эффективной вязкости». Для решения задачи (20)–(23) важно знать характеристики электромагнитного поля j_r, j_z, B, для вычисления которых в свою очередь используется модель электромагнитных процессов:

$$\left(\nabla,\vec{j}\right)=0, \quad (24)$$

$$\vec{j}=-\sigma\nabla\varphi, \quad (25)$$

$$[\nabla,\vec{B}]=\mu_0\vec{j}, \quad (26)$$

где φ — скалярный потенциал электрического поля; σ — электропроводность среды. Решение задачи электродинамики (24)–(26) находится в области *ACDE* (см. рис. 8) при наложении граничных условий

$$j_z\big|_{AB}=I\Big/\pi R_w^2,\ j_z\big|_{BC}=j_r\big|_{CD}=0,\ \varphi\big|_{ED}=0. \quad (27)$$

Объем расплава, форма фронта плавления и тепловое состояние системы «капля жидкого металла–твердый участок проволоки» определяются из решения уравнения теплопереноса

$$\frac{\partial H}{\partial t}+u\frac{\partial H}{\partial r}+v\frac{\partial H}{\partial z}= =\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\frac{j^2}{\sigma}, \quad (28)$$

где H — удельная энтальпия; λ — коэффициент теплопроводности. Решение (28) находится в области *ABFG* при следующих граничных и начальных условиях:

$$T\big|_{AB}=T_0,\ \lambda\frac{\partial T}{\partial n}\Bigg|_{BFG}=q_s-q_r-q_c-q_{ev}, \quad (29)$$

$$T\big|_{t=t_0}=T_0, \quad (30)$$

где T_0 — начальная температура проволоки; q_s — удельный тепловой поток, обусловленный тепловым воздействием дуги; q_r, q_{ev}, q_c — тепловые потери за счет излучения, испарения металла и конвективного теплообмена с защитным газом соответственно.

Наиболее распространенным подходом для решения задачи о формировании капли (20)–(23) является метод Volume of Fluid (VOF) [30]. В методе VOF свободная поверхность «размазывается» в объеме некоторого слоя, толщина которого соответствует нескольким длинам ячейки вычислительной сетки, а сила поверхностного натяжения рассматривается как объемная сила, действующая в пределах этого слоя [31]. Алгоритм VOF реализован в ряде пакетов прикладных программ для решения задач гидродинамики таких, как ANSYS CFX, Fluent, Open Foam и др. Кроме того, исходный программный код VOF [32] находится в свободном доступе, что позволяет исследователям адаптировать его для решения проблем, связанных с переносом металла при сварке. Существует также ряд других методов, в которых свободная поверхность рассматривается, как выделенная граница между двумя средами. Эти методы образуют группу, которая в литературе встречается под названием Front Traking Methods (FTM) [33, 34]. Методики с выделением границы позволяют более детально исследовать физические процессы,

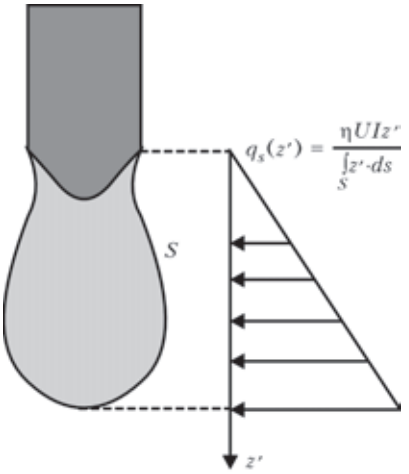


Рис. 10. Распределение теплового потока на поверхности капли

происходящие на свободной поверхности металла капли. В качестве примера продемонстрируем применение метода FTM для исследования формирования и отрыва капли при сварке малоуглеродистой стали в режиме постоянного тока. Используемые в расчетах физические свойства материала проволоки и технологические параметры приведены в таблице. При проведении численного эксперимента полагается, что тепловой поток q_s распределен по линейному закону (рис. 10). Расчетная форма капли, поле скоростей и форма фронта плавления представлены на рис. 11.

Физические свойства материала и технологические параметры

Величина	Обозначение и размерность	Значение
Плотность	ρ, кг·м$^{-3}$	7200
Вязкость	μ, Па·с	0,006
Температура плавления	T_m, К	1812
Коэфициент поверхностного натяжения	γ, Н·м$^{-1}$	1,2
Электропроводность	σ, См·м$^{-1}$	8,54·10^5
Температура кипения	T_b, К	3133
Удельная теплота плавления	L, Дж·кг$^{-1}$	2,5·10^5
Удельная теплоемкость твердой фазы	c_s, Дж (кг·К)$^{-1}$	700
Удельная теплоемкость жидкой фазы	c_l, Дж (кг·К)$^{-1}$	780
Сила тока	I, А	350
Напряжение	U, В	30,5
Скорость подачи проволоки	V_w, м·мин$^{-1}$	5,54
Диаметр проволоки	d_w, мм	1,6
КПД тепловложения	η	0,21

Как уже было отмечено, формирование капли электродного металла определяется взаимодействием целого ряда физических явлений, протекающих в электродном металле, включая каплю на его поверхности, а также в дуговой плазме. Методы математического моделирования дают возможность исследовать отдельно влияние каждого физического фактора на процессы формирования и отрыва капли. Рассмотренные в настоящей работе математические модели позволяют определять

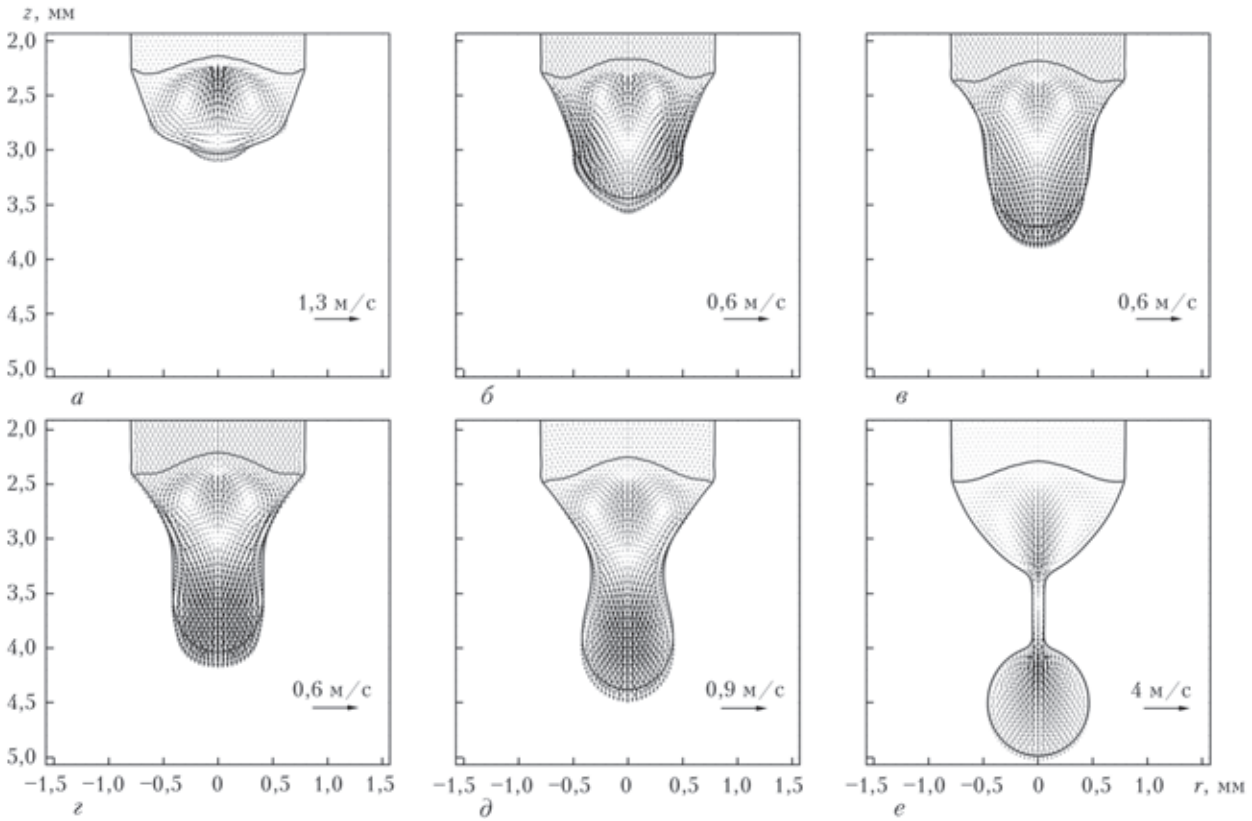


Рис. 11. Форма капли и поле скоростей в расплаве в различные моменты времени: *а* — t = 20,5; *б* — 21,88; *в* — 22,2; *г* — 23,1; *д* — 24; *е* — 24,93 мс

основные характеристики переноса электродного металла (объем капли, частоту отрыва), описывать динамику изменения формы капли, а также процессы тепло- и массопереноса в расплаве. Наиболее адекватное описание рассматриваемых процессов дает модель, основанная на полной системе уравнений Навье–Стокса. Как показывают вычислительные эксперименты, форма капли и ее размеры во многом определяются действием электромагнитной силы, значение которой в свою очередь зависит от картины протекания электрического тока в системе «капля электродного металла – столб дуги».

В заключение укажем основные направления развития моделей процессов переноса металла, а также отметим недостаточно изученные аспекты физических явлений, сопровождающих процесс сварки плавящимся электродом. Представляет значительный интерес исследовать динамику утонения и разрыва перешейка при отрыве капли, в том числе образование капель-сателлитов, а также физические процессы, протекающие в уже оторвавшейся капле [35]. Кроме того, гидродинамические процессы в металле капли приводят к возникновению конвективной диффузии легирующих элементов [28]. Транспорт легирующих элементов, обладающих низкой температурой кипения, от границы плавления к свободной поверхности капли увеличивает интенсивность их испарения. Этой проблеме уделено недостаточно внимания в литературе. Следует отметить, что испарение металла с поверхности капли может не только влиять на динамику ее свободной поверхности, но и оказывать значительное влияние на процессы, протекающие в дуговой плазме. Как показывают экспериментальные исследования [36], этот фактор является причиной образования локального минимума температуры плазмы в центральной части столба дуги. Указанный эффект подтверждается также теоретическими исследованиями [37]. Наконец, в большинстве работ, посвященных моделированию формирования капли электродного металла при сварке плавящимся электродом, используется постоянное значение коэффициента поверхностного натяжения, тогда как его значение сильно изменяется с температурой, а также зависит от химического состава материала и защитного газа. Современные методы исследования позволяют определять коэффициент поверхностного натяжения жидких металлов в широком интервале температур. При моделировании переноса металла это дает возможность исследовать влияние конвекции Марангони на процессы тепло-, массопереноса в капле.

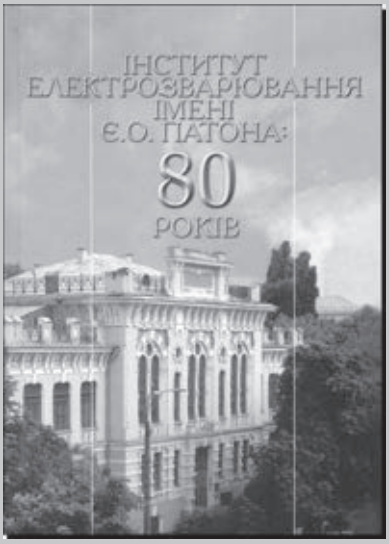
1. *Amson J. C.*, *Salter G. R.* An analysis of the gas-shielded consumable metal arc welding system // Brit. Welding J. – 1962. – **41**, № 4. – P. 232–249.
2. *Greene W. J.* An analysis of transfer in gas-shielded welding arcs. Pt 2 // AIEE. – 1960. – **79**, № 3. – P. 194–203.
3. *Waszink J. H.*, *Graat L. H.* Experimental investigation of the forces acting on a drop of weld metal // Welding J. – 1983. – **62**, № 4. – P. 109–116.
4. *Allum C. J.* Metal transfer in arc welding as a varicose instability. I. Varicose instabilities in a current-carrying liquid cylinder with surface charge // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1985. – **18**, № 7. – P. 1431.
5. *Allum C. J.* Metal transfer in arc welding as a varicose instability. II. Development of model for arc welding // Ibid. – 1985. – **18**, №. 7. – P. 1447.
6. *Park A. Y.*, *Kim S. R.*, *Hammad M. A.* Modification of pinch instability theory for analysis of spray mode in GMAW // Ibid. – 2009. – **42**, № 22. – C. 225503.
7. *Choi J. H.*, *Lee J., Yoo C. D.* Dynamic force balance model for metal transfer analysis in arc welding // Ibid. – 2001. – **34**, № 17. – P. 2658–2664.
8. *Jones L. A.*, *Eagar T. W.*, *Lang J. H.* A dynamic model of drops detaching from a gas metal arc welding electrode // Ibid. – 1998. – **31**, № 1. – P. 107–123.
9. *Воропай Н. М.*, *Колесниченко А. Ф.* Моделирование формы капель электродного металла при сварке в защитных газах // Автомат. сварка. – 1979. – № 9. – С. 27–32.
10. *Nemchinsky V. A.* Size and shape of the liquid droplet at the molten tip of an arc electrode // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1994. – **27**, № 7. – P. 1433–1442.
11. *Моделирование* процесса формирования капли электродного металла / А. Семенов, В. Демченко, И. Кривцун и др. // Сб. трудов V Междунар. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», 25–28 мая 2010, Кацивели, Крым, Украина / Под ред. В. И. Махненко. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2010. – С. 183–192.
12. *A dynamic* model of droplet formation in GMA welding / O. Semenov, V. Demchenko, I. Krivtsun et al. // Modelling and simulation in materials science and engineering. – 2012. – **20**, № 4. – P. 045003.
13. *Крівцун І. В.*, *Семенов О. П.*, *Демченко В. Ф.* До теорії формування крапель електродного металу при дуговому зварюванні плавким електродом // Доп. НАНУ. – 2011. – №. 6. – С. 90–96.
14. *Modelling* of the droplet formation process in GMA welding / O. Semenov, V. Demchenko, I. Krivtsun et al. // Proc. of the 10th Intern. seminar «Numerical analysis of weldability», Austria, Seggau, 2012. – P. 83–94.
15. *Haidar J.*, *Lowke J. J.* Predictions of metal droplet formation in arc welding // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1996. – **29**, № 12. – P. 2951–2960.
16. *Choi S. K.*, *Yoo C. D.*, *Kim Y. S.* Dynamic simulation of metal transfer in GMAW. Pt 1: Globular and spray transfer modes // Welding J. – 1998. – **77**, № 1. – P. 38–44.
17. *Choi S. K.*, *Yoo C. D.*, *Kim Y. S.* Dynamic simulation of metal transfer in GMAW. Pt 2: Short-circuit transer mode // Ibid. – 1998. – **77**, № 1. – P. 45–51.
18. *Fan H. G.*, *Kovacevic R.* A unified model of transport phenomena in gas metal arc welding including electrode, arc plasma and molten pool // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2004. – **37**. – P. 2531–2544.
19. *Wang F.*, *Hou W. K.*, *Hu S. J.* Modelling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding // Ibid. – 2003. – **36**. – P. 1143–1152.
20. *Hu J.*, *Tsai H. L.* Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Pt I: The metal // Intern. J. Heat and Mass Transfer. – 2007. – **50**. – P. 808–820.
21. *Amson J. C.* Lorentz force in the molten tip of an arc electrode // Brit. J. Appl. Phys. – 1965. – **16**, № 8. – P. 1169–1179.
22. *Kim Y. S.*, *Eagar T. W.* Analysis of metal transfer in gas metal arc welding // Welding J. – 1993. – **72**. – P. 269–278.
23. *Финн Р.* Равновесные капиллярные поверхности: математическая теория. – М.: Мир, 1989. – 310 с.

24. *Hartland S.*, *Hartley R. W.* Axisymmetric fluid-liquid interfaces: tables giving the shape of sessile and pendant drops and external menisci, with examples of their use. – Elsevier Sci. publ. Co., 1976. – 782 p.
25. *Rhee S.*, *Kannatey-Asibu E. Ob*servation of metal transfer during gas metal arc welding // Welding J. – 1992. – **71**. – P. 381–386.
26. *Eggers J.*, *Dupont T. F.* Drop formation in a one-dimensional approximation of the Navier–Stokes equation // J. Fluid Mech. – 1994. – **262**. – P. 205–221.
27. *Nemchinsky V. A.* Heat transfer in a liquid droplet hanging at the tip of an electrode during arc welding // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1997. – **30**, № 7. – P. 1120–1124.
28. *Evaporation* phenomena of magnesium from droplet at welding wire tip in pulsed MIG arc welding of aluminium alloys / J. B. Wang, H. Nishimura, S. Katayma, M. Mizutani // Sci. and Technol. of Welding and Joining. – 2011. – **16**, № 5. – P. 418–425.
29. *Kou S.*, *Sun D. K.* Fluid flow and weld penetration in stationary arc welds // Metall. Trans A. – 1985. – **16**. – P. 203–13.
30. *Hirt C. W.*, *Nichols B. D.* Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // J. Comp. Phys. – 1981. – **39**, № 1. – P. 201–225.
31. *Brackbill J. U.*, *Kothe D. B.*, *Zemach C.* A continuum method for modeling surface tension // Ibid. – 1992. – **100**, № 2. – P. 335–354.
32. *Nichols B. D.*, *Hirt C. W.*, *Hotchkiss R. S.* SOLA-VOF. A solution algorithm for transient fluid flow with multiple free boundaries // NASA STI/Recon Technical Report. – 1980. – N 81. – 14281.
33. *Wilkes E. D.*, *Philips S. D.*, *Basaran O. A.* Computational and experimental analysis of dynamics of drop formation // Phys. of Fluids. – 1999. – **11**, № 12. – P. 3577–3598.
34. *Degroote J., Bruggeman P.*, *Vierendeels J.* A coupling algorithm for partitioned solvers applied to bubble and droplet dynamics // Computers & Fluids. – 2009. – **38**, № 3. – P. 613–624.
35. *Nemchinsky V. A* droplet in the inter-electrode gap during gas metal arc welding // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2011. – **44**, № 44. –P. 445203.
36. *Spatial* structure of the arc in a pulsed GMAW process / R. Kozakov, G. Gott, H. Schopp et al. // Ibid. – 2013. – **46**, № 22. – P. 224001.
37. *Energy* balance in MIG arcs / M. Schnick, M. Hertel, U. Fuessel, D. Uhrlandt // Ibid. – 2013. – **46**, № 22. – P. 224002.

Поступила в редакцию 04.06.2014

НОВАЯ КНИГА

Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона: 80 років / Ред. кол. Б. Є. Патон (голова) та ін. – К.: Академперіодика, 2014. – 400 с.



В сборнике представлены научно-информационные материалы, посвященные основным направлениям развития научно-технической и производственной деятельности Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины на протяжении 80 лет его существования. Освещены основные вехи создания, становления и развития института. Отображены научные достижения в области сварки и родственных технологий, сотрудничество с промышленными предприятиями, международная деятельность. Представлена современная структура института и основные направления исследований и их внедрение в производство.

Рассчитан на широкий круг ученых, преподавателей, аспирантов, студентов вузов, а также исследователей истории развития технических наук.

УДК 539.384

ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ НАГРЕВА НА ВЕЛИЧИНУ УСИЛИЯ ОСАДКИ И ВРЕМЯ ПРОКОВКИ ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ ПЛОСКОГО КОЛЬЦА

А. В. МОЛТАСОВ, С. М. САМОТРЯСОВ, В. В. КНЫШ, П. Н. ЧВЕРТКО, К. В. ГУЩИН
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Одной из причин возникновения напряжений и перемещений в кольцах, изготовляемых контактной стыковой сваркой, является неоднородное температурное поле, которое возникает в результате шунтирования электрического тока. В рамках настоящей работы были экспериментально измерены температуры в различных характерных точках на конечной стадии процесса выполнения контактной стыковой сварки стального кольца на машине К724. Измерения показали, что на исследуемой стадии процесса сварки температуры контролируемых точек мало изменяются во времени, т. е. имеет место квазистационарный тепловой поток. Функция температуры была задана в виде ряда Фурье по окружной координате, причем вследствие симметрии не принимались во внимание нечетные члены этого ряда. Оказалось достаточным ограничиться четырьмя первыми членами ряда. Изменение температур в радиальном направлении, установленное из условий стационарности теплового потока, показало, что действие температурного поля в кольце препятствует сближению свариваемых кромок. Это приводит к тому, что часть усилия осадки расходуется на обеспечение преодоления сил упругости, вызванных неравномерностью нагрева. Для рассмотренного в работе кольца из стали 20 усилие осадки, необходимое для формирования соединения увеличилось на 16,5 %. Кроме того, наличие температурных напряжений увеличивает усилие, стремящееся разорвать стык после сварки, что приводит к необходимости продления времени проковки стыка на 4 с. Библиогр. 7, рис. 4.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, плоские кольца, температурное поле, стационарный тепловой поток, температурные напряжения, усилие осадки, время проковки

Одним из наиболее эффективных способов соединения элементов конструкций кольцевой формы является контактная стыковая сварка (КСС). Машины для КСС [1] обеспечивают различную величину усилия осадки для сварки изделий. При разработке технологических режимов сварки необходимо определить величину усилия сближения для обеспечения достаточного усилия осадки и преодоления сопротивления кольца деформации. Кроме того, в работе [2] было показано, что для условий сварки колец со значительной упругостью следует учитывать возможность разрыва сварного стыка за счет упругости самого кольца, если давление осадки будет слишком быстро снижаться после выключения тока.

Ранее при определении времени проковки сварного стыка считалось [2], что величина усилия, стремящегося разорвать сварное соединение, зависит только от сил упругости шунтирующей части кольца, которые стремятся придать кольцу форму, которую оно имело в холодном состоянии до соединения свариваемых кромок. Однако при этом не учитывались напряжения и перемещения, обусловленные неравномерностью температурного поля, которое возникает при выполнении процесса сварки в результате шунтирования электрического тока. Температуры этого поля достигают своего максимального значения на конечной стадии процесса сварки, а затем при остывании начинают медленно убывать. Поэтому данная работа посвящена исследованию влияния температурного поля, которое реализуется в сваренном кольце на конечной стадии процесса контактной сварки, на величину усилия осадки и усилия, стремящегося разорвать стык.

Экспериментальные измерения (рис. 1) показали, что в процессе нагрева и остывания кольца, выполненного КСС, возникает температурное поле, которое является функцией как радиальной r, так и окружной θ координаты.

Неравномерность распределения температуры в окружном направлении при КСС колец также наблюдается визуально (рис. 2). Отчетливо видно, что участок свариваемого кольца, наиболее удаленный от зажимных устройств сварочной машины, имеет более яркое свечение, чем участки шунтирующей части, близкие к ним. Это объясняется тем, что зажимные устройства обеспечивают высокий теплоотвод.

Изменение температур в контролируемых точках на конечной стадии процесса сварки незначительно (рис. 1, *б*), поэтому, не внося весомой погрешности, можно считать, что температура не зависит от времени, т. е. реализуется квазистационарный тепловой поток [3].

Представим температуру в виде ряда Фурье

© А. В. Молтасов, С. М. Самотрясов, В. В. Кныш, П. Н. Чвертко, К. В. Гущин, 2014

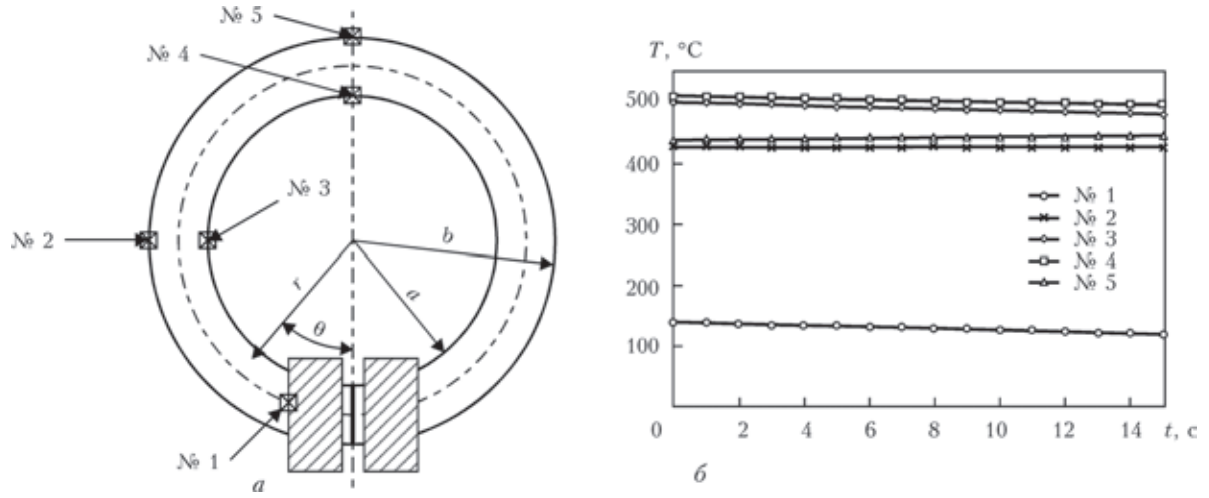


Рис. 1. Схема расположения точек контроля температур на конечной стадии процесса сварки кольца (*а*) и зависимость температур контролируемых точек от времени (*б*)

$$T(r,\theta) = A_0(r) + \sum_1^n A_n(r)\cos n\theta, \qquad (1)$$

члены, пропорциональные sin θ, отброшены, так как в нашем случае температура распределяется симметрично относительно стыка.

Для описания реального распределения температур ограничимся четырьмя первыми членами, входящими в ряд (1), который примет вид

$$T(r,\theta) = A_0(r) + A_1(r)\cos\theta + A_2(r)\cos 2\theta + A_3(r)\cos 3\theta. \qquad (2)$$

Этот ряд соответствует экспериментально установленным значениям в контролируемых точках (рис. 1), если он удовлетворяет две системы уравнений при $r = a$ и $r = b$

$$\begin{cases} A_0(a) + A_1(a) + A_2(a) + A_3(a) = T_1, \\ A_0(a) - A_2(a) = T_3, \\ A_0(a) - A_1(a) + A_2(a) - A_3(a) = T_4; \end{cases}$$
$$\begin{cases} A_0(b) + A_1(b) + A_2(b) + A_3(b) = T_1, \\ A_0(b) - A_2(b) = T_2, \\ A_0(b) - A_1(b) + A_2(b) - A_3(b) = T_5, \end{cases} \qquad (3)$$

где T_1–T_5 — экспериментальные значения температур в точках № 1–5 соответственно (рис. 1, *а*).

Решение систем (3) имеет вид

$$A_0(a) = \frac{T_1 + T_4}{4} + \frac{T_3}{2}, \; A_1(a) + A_3(a) = \frac{T_1 - T_4}{2},$$
$$A_2(a) = \frac{T_1 + T_4}{4} - \frac{T_3}{2},$$
$$A_0(b) = \frac{T_1 + T_5}{4} + \frac{T_2}{2}, \; A_1(b) + A_3(b) = \frac{T_1 - T_5}{2}, \qquad (4)$$
$$A_2(b) = \frac{T_1 + T_5}{4} - \frac{T_2}{2}.$$

Нетрудно заметить, что количества уравнений в системах (3) недостаточно для определения значений всех переменных. Поэтому одна из переменных A_1 или A_3 является свободной. Эти переменные следует выбирать таким образом, чтобы температура монотонно возрастала в интервале изменения θ от 0 до π и монотонно убывала в интервале изменения θ от π до 2π.

Подставив экспериментальные значения температур T_1 = 130 ˚С, T_2 = 430 ˚С, T_3 = 480 ˚С, T_4 = = 510 ˚С, T_5 = 450 ˚С в систему (3) и выбрав переменную A_3 соответствующим образом, получим зависимости, описывающие изменения температуры в окружном направлении на внешнем и внутреннем контуре

$$T(a,\theta) = 400 - 171\cos\theta - 80\cos 2\theta - 19\cos 3\theta,$$
$$T(b,\theta) = 360 - 143\cos\theta - 70\cos 2\theta - 17\cos 3\theta,$$

которые представлены графически (рис. 3).

Изменение температуры в радиальном направлении определяли из условий стационарности теплового потока [4]

$$\nabla_1^2 T(r,\theta) = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} = 0. \qquad (5)$$

Условие (5) выполнимо, если каждое из слагаемых в правой части (2) удовлетворяет это условие

$$\nabla_1^2\left[A_0(r)\right] = 0; \; \nabla_1^2\left[A_1(r)\cos\theta\right] = 0;$$
$$\nabla_1^2\left[A_2(r)\cos 2\theta\right] = 0; \; \nabla_1^2\left[A_3(r)\cos 3\theta\right] = 0. \qquad (6)$$

Рис. 2. Контактная стыковая сварка стального кольца (*a* = = 135 мм, *b* = 190 мм) на машине К724

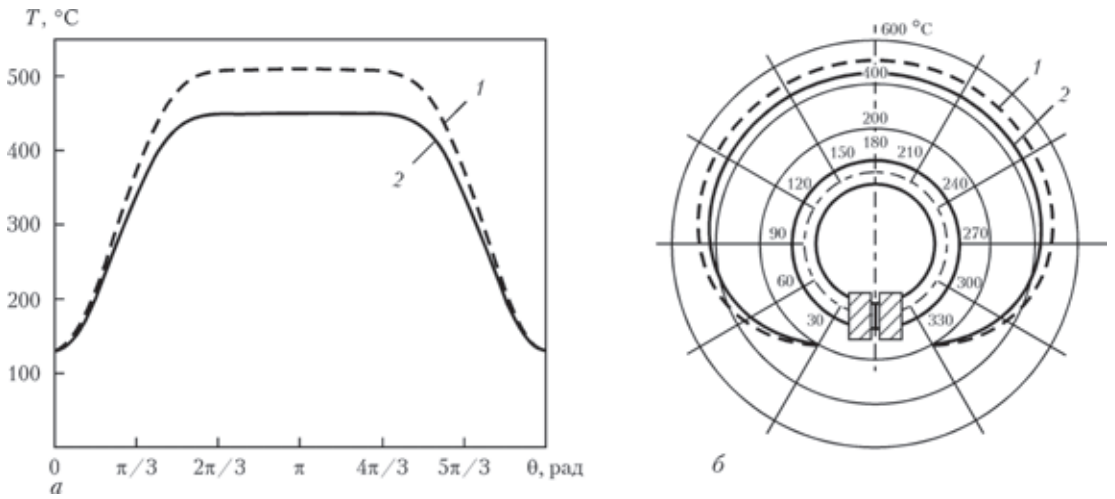


Рис. 3. Графики зависимости температуры от окружной координаты при $r = a$ (кривая *1*) и при $r = b$ (кривая *2*) в декартовых (*а*) и полярных (*б*) координатах

Решения уравнений (6) представим в виде

$$A_0(r) = K_0 + H_0 \ln r,\ A_1(r) = K_1 r + \frac{H_1}{r},$$
$$A_2(r) = K_2 r^2 + \frac{H_2}{r^2},\ A_3(r) = K_3 r^3 + \frac{H_3}{r^3}, \quad (7)$$

где K_i, H_i — константы интегрирования, определяемые из условий $A_0(r) = A_0(a)$, $A_1(r) = A_1(a)$, $A_2(r) = A_2(a)$, $A_3(r) = A_3(a)$ при $r = a$, $A_0(r) = A_0(b)$, $A_1(r) = A_1(b)$, $A_2(r) = A_2(b)$, $A_3(r) = A_3(b)$ при $r = b$:

$$K_0 = \frac{A_0(a)\ln b - A_0(b)\ln a}{\ln b - \ln a};$$
$$K_1 = \frac{1}{b^2 - a^2}(bA_1(b) - aA_1(a));$$
$$K_2 = \frac{1}{b^4 - a^4}(b^2 A_2(b) - a^2 A_2(a));$$
$$K_3 = \frac{1}{b^6 - a^6}(b^3 A_3(b) - a^3 A_3(a));$$
$$H_0 = \frac{A_0(b) - A_0(a)}{\ln b - \ln a}; \quad (8)$$
$$H_1 = \frac{ab}{b^2 - a^2}(bA_1(a) - aA_1(b));$$
$$H_2 = \frac{a^2 b^2}{b^4 - a^4}(b^2 A_2(a) - a^2 A_2(b));$$
$$H_3 = \frac{a^3 b^3}{b^6 - a^6}(b^3 A_3(a) - a^3 A_3(b)).$$

Таким образом, функция, описывающая изменение температур в кольце $T(r, \theta)$, определена. Для экспериментальных данных, соответствующих изменению температуры в окружном направлении (рис. 3), построены графики изменения температур в радиальном направлении для различных значений θ (рис. 4).

Определение температурных напряжений, действующих в плоском кольце на конечной стадии КСС, сводится к решению двумерной задачи термоупругости со стационарным тепловым потоком. Для решения данной задачи используется аналогия между квазистатической задачей термоупругости и задачей изотермической теории упругости с соответствующими объемными и поверхностными силами, рассмотренная в работе [5].

Поскольку в [6] доказано, что члены ряда (1) при $n > 1$ не оказывают влияния на напряженное состояние, компоненты напряжений имеют вид

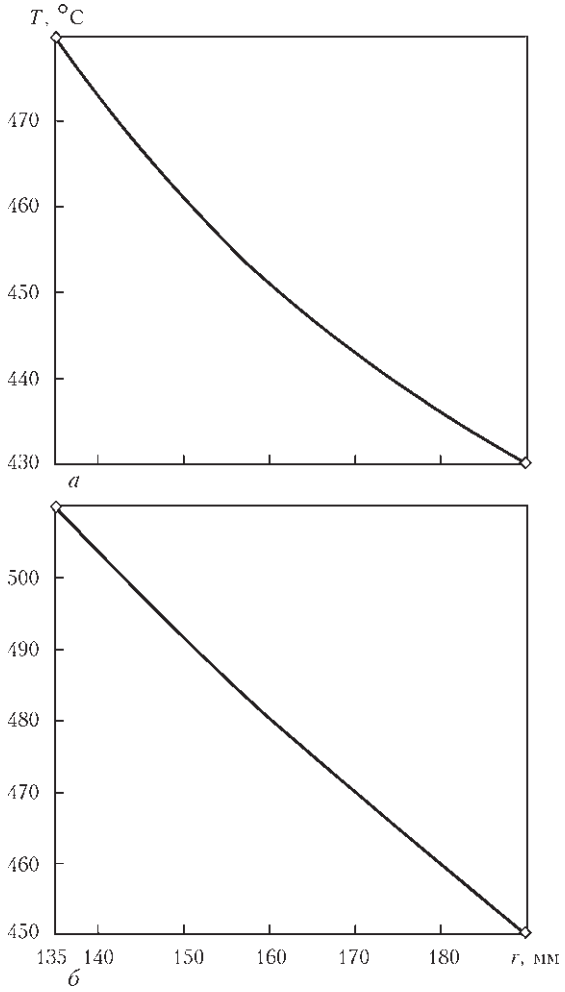


Рис. 4. Зависимость температуры от радиальной координаты для $\theta = \pi/2$ (*а*) и $\theta = \pi$ (*б*)

$$\sigma_r = B_0\frac{1}{r^2} + 2C_0 + D_0(1+2\ln r) + \\ + \left(2B_1 r - \frac{2C_1}{r^3} + \frac{D_1}{r}\right)\cos\theta,$$

$$\sigma_\theta = -B_0\frac{1}{r^2} + 2C_0 + D_0(3+2\ln r) + \\ + \left(6B_1 r + \frac{2C_1}{r^3} + \frac{D_1}{r}\right)\cos\theta, \quad (9)$$

$$\tau_{r\theta} = \left(2B_1 r - \frac{2C_1}{r^3} + \frac{D_1}{r}\right)\sin\theta,$$

где B_0, C_0, D_0 и B_1, C_1, D_1 — постоянные интегрирования, в нашем случае

$$B_0 = -\frac{\alpha E H_0}{2(b^2-a^2)}a^2b^2\ln\frac{b}{a}, B_1 = \frac{\alpha E H_1}{4(a^2+b^2)},$$

$$C_0 = \frac{\alpha E H_0}{4}\frac{b^2\ln b - a^2\ln a}{b^2-a^2} + \frac{\alpha E H_0}{8},$$

$$C_1 = -\frac{\alpha E H_1}{4(a^2+b^2)}a^2b^2,$$

$$D_0 = -\frac{\alpha E H_0}{4} D_1 = -\frac{\alpha E H_1}{2},$$

где α — коэффициент линейного расширения, 1/°С.

В работе [7] установлено, что усилие осадки и усилие, стремящееся разорвать стык после сварки, связано с величиной зазора δ_y, который представляет собой сумму первоначального зазора между свариваемыми кромками и укорочения каждого из концов в результате оплавления и осадки. Однако поскольку кольцо нагрето, к величине зазора необходимо добавить также смещения свариваемых кромок, вызванные неравномерностью нагрева.

Как показано в работе [6], наличие напряжений (9) в сплошном кольце эквивалентно смещению кромок кольца с зазором в окружном направлении

$$\delta_т = -2\pi\alpha(H_0\frac{a+b}{2} + H_1), \quad (10)$$

причем если $\delta_т$ положительна, то зазор увеличивается, если отрицательна, то он уменьшается.

Если подсчитать величины H_0 и H_1, которые соответствуют экспериментальным данным по формулам (8), то $\delta_т$ положительное, т. е. зазор увеличивается. Этот результат соответствует данным исследований, проведенных в работе [6], где доказано, что если в трубе с разрезом температура внутренней поверхности выше чем, температура внешней, то расстояние между берегами разреза увеличивается.

Усилие осадки рассчитано по формулам [7], а время проковки — по данным работы [2] с учетом смещения свариваемых кромок, вызванного неравномерностью нагрева, и без его учета.

Для исследуемого стального кольца (сталь 20, $\alpha = 1{,}5\cdot10^{-5}$ 1/°С, $E = 2\cdot10^5$ МПа) смещение, вызванное неравномерностью нагрева, составило 3,57 мм, что привело к увеличению как необходимого усилия осадки на 16,5 %, так и времени проковки на 4 с.

Выводы

1. Показано, что ряды Фурье могут быть эффективно использованы для описания плоских температурных полей. В частности, для температурного поля, которое реализуется при остывании кольца, выполненного КСС, достаточная точность описания этого поля обеспечивается, если ограничиться четырьмя первыми членами этого ряда.

2. Установлена аналитическая зависимость, описывающая температурное поле в плоском кольце, которое реализуется на конечной стадии процесса КСС. Для стального кольца с внутренним радиусом a = 135 мм и внешним радиусом b = 190 мм построены графики распределения температур в радиальном и окружном направлениях.

3. Обосновано и подтверждено расчетами, что часть усилия осадки, необходимого для формирования соединения, расходуется на обеспечение преодоления сил упругости, вызванных неравномерным нагревом. Поэтому для рассмотренного в работе случая силы упругости, вызванные неравномерным нагревом, приводят к необходимости увеличения усилия осадки на 16,5 %. Наличие температурных напряжений во время остывания кольца также приводит к незначительному возрастанию усилия, действующего в сварном соединении, из-за чего время проковки необходимо продлить на 4 с.

1. *Контактная* стыковая сварка изделий из высокопрочных сплавов на основе алюминия / С. И. Кучук-Яценко, П. Н. Чвертко, Л. А. Семенов и др. // Автомат. сварка. – 2013. – № 7. – С. 3–7.
2. *Кочергин К. А.* Выбор технологии контактной сварки. – Л.: Судпромгиз, 1952. – 110 с.
3. *Карслоу Г., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
4. *Боли Б., Уэйнер Дж.* Теория температурных напряжений / Под ред. Э. И. Григолюка. – М.: Мир, 1964. – 518 с.
5. *Тимошенко С. П.* Теория упругости. – Л.; М.: ОНТИ, 1937. – 452 с.
6. *Тимошенко С. П.*, *Гудьер Дж.* Теория упругости / Пер. с англ. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
7. *Чвертко П. Н.*, *Молтасов А. В.*, *Самотрясов С. М.* Расчет усилия осадки при контактной стыковой сварке изделий замкнутой формы // Автомат. сварка. – 2014. – № 1. – С. 50–53.

Поступила в редакцию 24.03.2014

УДК 621.791.3.04

МИКРОСТРУКТУРА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИДОВ НИКЕЛЯ

С. В. МАКСИМОВА, В. Ф. ХОРУНОВ, В. В. МЯСОЕД, В. В. ВОРОНОВ, П. В. КОВАЛЬЧУК
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Интерметаллидные сплавы на основе фаз Ni_3Al и NiAl принадлежат к новому классу перспективных литейных конструкционных материалов. Применение материалов на основе Ni_3Al позволяет повысить срок службы деталей в 3–4 раза, рабочие температуры газа перед трубиной — на 50...100 °С, снизить массу турбин и, как следствие, увеличить их удельную тягу и экономичность. Широкое применение сплавов на основе Ni_3Al в промышленности требует разработки технологических процессов получения неразъемных соединений, в том числе методом пайки, поскольку сплавы, содержащие большой процент γ′-фазы, относятся к классу трудно свариваемых из-за возможного образования трещин. В настоящее время для пайки жаропрочных высоколегированных никелевых сплавов применяют никелевые припои, содержащие в качестве депрессантов кремний и бор, которые приводят к образованию в соединениях хрупких фаз (силицидов, боридов), отрицательно влияющих на усталостную долговечность. Их устранение связано с длительными режимами термообработки или практически невозможно. В данной работе показана возможность применения эвтектического припоя на никелевой основе, не содержащего бор и кремний. Приведены результаты металлографических исследований и микрорентгеноспектрального анализа паяных соединений интерметаллидных сплавов на основе γ′-фазы (Ni_3Al). Показаны морфологические особенности структурообразования паяных швов, полученных с помощью высокотемпературной вакуумной пайки и припоев на базе системы Ni–Cr–Zr и Ni–Co–Cr–W–Mo–Al–Nb–B. Библиогр. 7, табл. 3, рис. 15.

Ключевые слова: интерметаллидные сплавы, алюминиды никеля, вакуумная пайка, припой, паяный шов, исследования на растекание, микроструктура, микрорентгеноспектральный анализ

Интерметаллидные сплавы на основе фаз Ni_3Al и NiAl принадлежат к новому классу перспективных литейных конструкционных материалов, содержащих большое количество γ′-фазы, и являются реальной альтернативой металлическим материалам высокотемпературного назначения. Интерметаллиды Ni_3Al и NiAl характеризуются упорядоченной кристаллической решеткой, что обеспечивает им комплекс высоких физико-механических свойств: повышенную стабильность при температурах до 1200…1300 °С, пониженную плотность (соответственно 7,3 и 5,9 г/см^3), высокий модуль упругости и сопротивление окислению. Это открывает широкие перспективы их использования в высокотемпературных условиях, позволяет уменьшить массу создаваемых конструкций и увеличить их коэффициент полезного действия [1–5]. Для расширения применения сплавов на основе Ni_3Al в промышленности необходима разработка технологических процессов получения неразъемных соединений, в том числе пайки, поскольку сплавы с высоким содержанием γ′-фазы (92…95 %) относят к классу трудно свариваемых из-за риска образования трещин.

В настоящее время для пайки жаропрочных высоколегированных никелевых сплавов применяют никелевые припои (Ni–Cr–Si–B, Ni–Cr–Co–B, Ni–W–Co–B, Ni–Cr–Al–B, Ni–Cr–Al–Si–B, Ni–Si–B), в которых в качестве депрессантов выступают кремний и бор. Они приводят к образованию в соединениях хрупких фаз (силицидов и боридов), устранение которых связано с длительным процессом термообработки или практически невозможно. Присутствие боридов в паяных соединениях нежелательно вследствие их отрицательного воздействия на усталостную долговечность. Примеры использования припоев систем Ni–Cr–Fe–Si–B (MBF20) и Ni–Co–Ti–Zr приведены в работах [6, 7].

В данной работе рассматриваются микроструктурные особенности соединений интерметаллидных сплавов на основе γ′-фазы (Ni_3Al), выполненных высокотемпературной вакуумной пайкой с использованием промышленного припоя ВПр27 (Ni–Co–Cr–W–Mo–Al–Nb–B) и опытного припоя системы Ni–Cr–Zr.

Для проведения экспериментов были выплавлены интерметаллидные никелевые сплавы двух составов (мас. %): Ni–14Al и Ni–14Al–5Mo–4Co–2,5W, а также Ni–Cr–Zr припой. Выплавку осуществляли электродуговым методом с обдувом аргоном на холодной подложке, пятикратным переворачиванием и переплавом. Полученные слитки имели каплевидную форму (рис. 1, *а*). Применяли также метод индукционного переплава с формированием слитка в секционном охлажда-

© С. В. Максимова, В. Ф. Хорунов, В. В. Мясоед, В. В. Воронов, П. В. Ковальчук, 2014

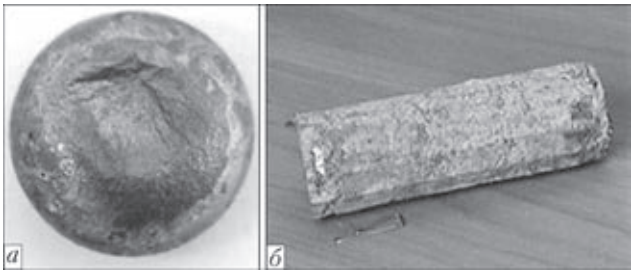


Рис. 1. Внешний вид опытных слитков, выплавленных с использованием дугового (*а*) и индукционного (*б*) нагрева

емом кристаллизаторе (рис. 1, *б*). В некоторых случаях с помощью вакуума расплав металла вытягивали в кварцевую трубку диаметром 4 мм. Полученные стержни длиной 10…15 мм и диаметром 4 мм распускали на шайбы высотой 1,2 мм и зачищали на наждачной бумаге. Такие пластины использовали для экспериментов по растеканию припоев и отработке технологического процесса пайки.

Сборку образцов производили с помощью контактной машины, затем паяли их в вакууме $1{,}33 \cdot 10^{-4}$ Па с использованием радиационного нагрева. Температуру нагрева контролировали двумя термопарами: основной, находящейся в печи, и дополнительной, расположенной рядом с образцами (рис. 2).

Для определения контактного угла смачивания проводили эксперименты по растеканию припоев по нестандартной методике: навески припоев в литом виде устанавливали на середину выплавленных интерметаллидных сплавов, фиксировали с помощью контактной сварки и загружали в печь. Для статистики загружали по три образца с каждым припоем за одну садку, устанавливали их в печи на керамическую подставку рядом с термопарой и нагревали. Паяные соединения исследовали с помощью оптической (Neophot-32) и сканирующей электронной (Tescan MIRA 3 LMU) микроскопии, микрорентгеноспектральные исследования проводили на энергодисперсионном спектрометре «Oxford Instruments X-MAX 80» с программным пакетом INCA.

Результаты экспериментов показали, что при $T_п$ = 1200 °С, τ = 5 мин Ni–Cr–Zr припой хорошо растекается по Ni–Al подложке, кристаллизация

Рис. 2. Внешний вид образцов, подготовленных для пайки

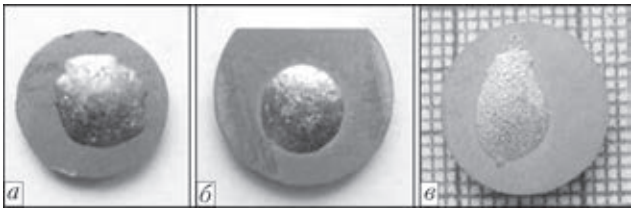


Рис. 3. Растекание при $T_п$ = 1200 °С опытного Ni–Cr–Zr припоя по Ni–Al (τ = 5 мин) (*а*) и Ni–Al–Mo–Co–W (τ = 15мин) подложке (*б*) и промышленного припоя ВПр27 по Ni–Al–Mo–Co–W подложке (τ = 15 мин) (*в*)

растекшейся капли происходит с образованием чистой поверхности (рис. 3, *а*). Данный припой относится к эвтектическим сплавам, характеризуется узким интервалом кристаллизации (T_S = = 1175 °С, T_L = 1200 °С), что положительно сказывается на его способности к растеканию. Промышленный припой ВПр27 (T_S = 1030 °С, T_L = 1080 °С) тоже хорошо смачивал поверхность Ni–Al–Mo–Co–W интерметаллидного сплава (рис. 3, *в*).

Для определения контактного угла смачивания, который является одним из главных факторов при изучении растекания припоев, образцы после расплавления припоя разрезали перпендикулярно плоскости основного материала (пластине), изготавливали микрошлифы, замеряли контактный угол, образованный поверхностью капли припоя и основным металлом, и затем проводили металлографические исследования и микрорентгеноспектральный анализ. Полученные результаты показали, что при использовании промышленного припоя ВПр27 контактный угол составляет 12° (рис. 4, *а*), а при применении опытного Ni–Cr–Zr

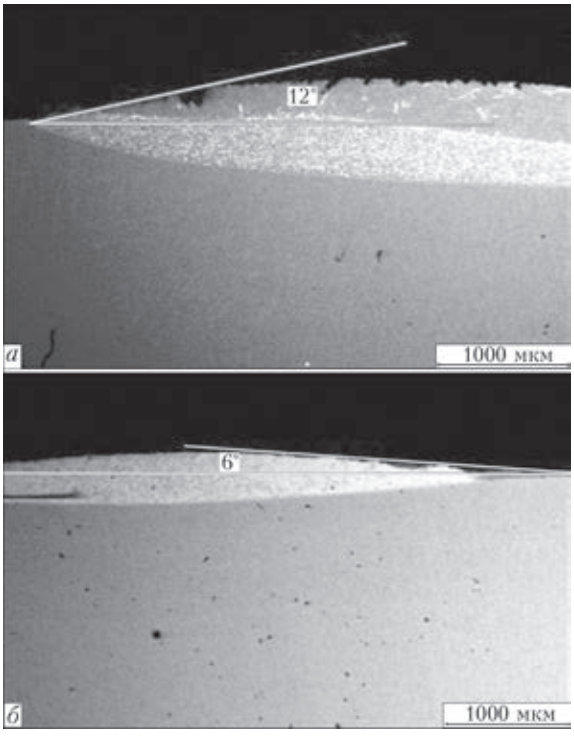


Рис. 4. Микроструктура расплавленного ВПр27 (*а*) и Ni–Cr–Zr (*б*) припоя на интерметаллидной подложке

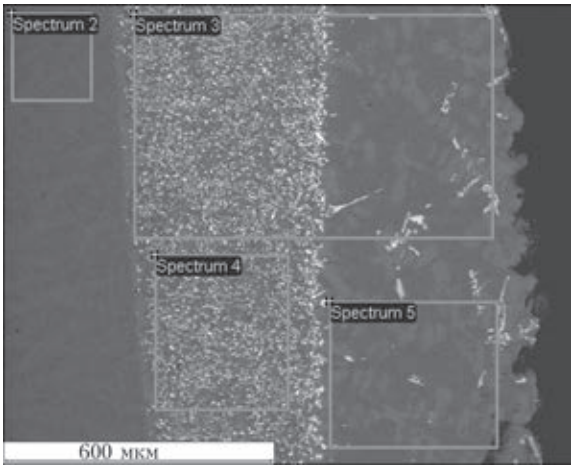


Рис. 5. Микроструктура и зональная ликвация в исследуемых участках при растекании припоя ВПр27 по Ni–Al–Mo–Co–W подложке

припоя он уменьшается до 6° (рис. 4, *б*), что подтверждает его лучшую способность к растеканию.

Микрорентгеноспектральный анализ выявил на границе раздела между припоем ВПр27 и интерметаллидным сплавом эрозию основного металла и зональную ликвацию с образованием двух зон, отличающихся по химическому составу (рис. 5, табл. 1). Было установлено также обогащение металла припоя, прилегающего к основному металлу, вольфрамом (до 14,19 %) и молибденом (4,59 %). Наблюдалась диффузия алюминия из основного металла в расплавленный припой, в результате чего его концентрация в зоне, прилегающей к основному металлу, составляла 3,97 %, а в верхней (наружной) зоне припоя она увеличивалась до 5,16 %. Концентрация остальных элементов отличалась незначительно (см. табл. 1).

С целью снижения эрозии основного металла пайку алиминидов никеля в состоянии после литья припоем ВПр27 в виде порошка проводили при более низкой температуре (1170 °С) в течение 3 мин. Паяные соединения бинарного Ni–Al сплава формировались с полными галтелями, в которых наблюдались ликвационные процессы (рис. 6). Структура галтельных участков существенно отличалась от структуры паяных швов как морфологическим строением, так и химическим составом. На фоне матрицы твердого раствора на основе никеля выделяются сложные интер-

Таблица 1. Распределение элементов в исследуемых участках при растекании промышленного припоя ВПр27 по Ni–Al–Mo–Co–W сплаву

Номер спектра (см. рис. 5)	Состав, мас. %							
	Al	Cr	Fe	Co	Ni	Nb	Mo	W
2	10,03	-	-	4,85	76,42	-	6,11	2,59
3	4,17	5,24	0,26	8,04	66,99	1,25	3,32	10,73
4	3,97	5,12	0,31	7,52	63,37	0,93	4,59	14,19
5	5,16	5,48	0,18	8,53	74,07	1,03	1,97	3,57

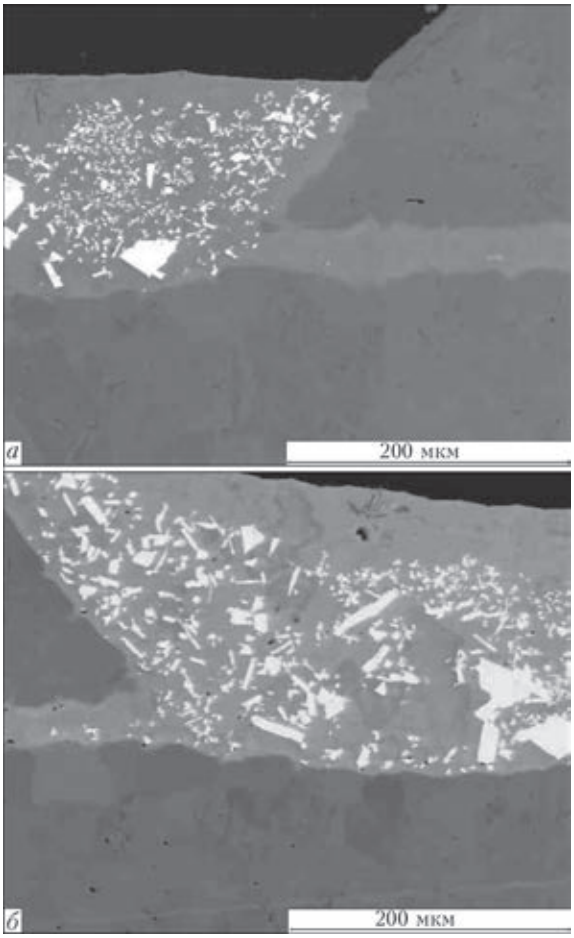


Рис. 6. Соединения Ni–Al сплава, выполненные припоем ВПр27, в состоянии после пайки (*а*) и термообработки при 1050 °С в течение 30 мин (*б*)

металлидные фазы, обогащенные вольфрамом (до 56) , молибденом (до 9), кобальтом (до 5) и никелем (до 14 мас. %), которые кристаллизуются преимущественно в зоне, прилегающей к основному металлу. Встречаются к тому же единичные включения Cr–30Ni–8W–4Mo–5Co (мас. %).

Паяные швы также характеризуются химической неоднородностью. Наблюдаются участки, в которых по центру шва формируется фаза Cr–14Ni–19W–8Mo–6Co–0,7Nb (мас. %). В некоторых участках она выделяется в виде отдельных светлых зерен. Встречаются также единичные поры (рис. 7). Серая матрица шва, т. е. зона, прилегающая к паяемому материалу, является твердым раствором на основе никеля, содержащим около 7 мас. % Al и другие элементы в незначительном количестве. В околошовной зоне основного металла на основе никеля микрорентгеноспектральный анализ показал кроме 13 мас. % Al присутствие незначительного количества легирующих элементов припоя, мас. %: 0,24 Mo; 0,40 W; 0,24 Nb. Термическая обработки при 1050˚С в течение 30 мин не влияла на структуру паяных соединений, количество составляющих фаз и их размер оставались без изменений (см. рис. 6, *б*).

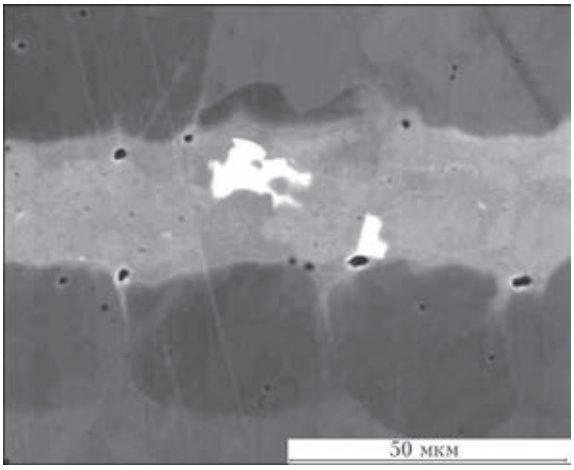


Рис. 7. Микроструктура паяного шва на алюминиде никеля, выполненного припоем ВПр27

Пайка на том же режиме сплава Ni–Al–Mo–Co–W, легированного тугоплавкими элементами, отличалась иным формированием структуры как в галтельных участках, так и в швах (рис. 8). Судя по результатам рентгеноспектрального микроанализа, матрицей шва является твердый раствор на основе Ni, легированный Al (7 %), Cr (5 %), Co (8 %), Mo (1 %), W (2 %). В виде дисперсных игловидных частиц выделяется фаза сложного состава на основе W, обогащенная Mo (22 %), Ni (27 %), Cr (6 %). Массовая доля алюминия в этих частицах снижается до 0,4 %. По морфологическому строению эту фазу можно отнести к интерметаллидному соединению на основе тугоплавких элементов из-за присущих им характерных правильных геометрических форм (рис. 8). В галтельном участке эта фаза занимает довольно малый процент площади (~1 %) по сравнению со швом. Основной структурной составляющей является твердый раствор на основе Ni (76 %), содержащий такие упрочняющие легирующие элементы, как Cr (6 %), Co (8 %), Al (4 %), и незначительную массовую долю (по ~1,5 %) остальных элементов — Nb, Mo и W.

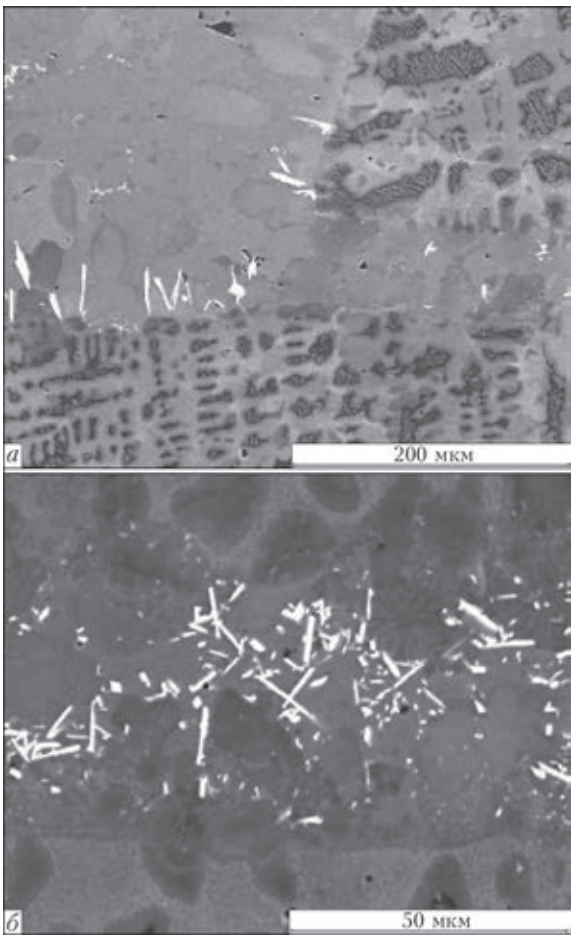


Рис. 8. Структура соединения Ni–Al–Mo–Co–W сплава, выполненного припоем ВПр27 при $T_п$ = 1170 °С, τ = 3 мин: *а* — галтельный участок; *б* — паяный шов

Таблица 2. Распределение элементов в исследуемых участках паяного соединения Ni–Al сплава при применении Ni–Cr–Zr припоя

Номер спектра (см. рис. 9)	Состав, мас. %			
	Al	Cr	Ni	Zr
2	11,67	-	88,33	-
3	8,45	0,54	91,01	-
4	0,40	4,97	82,31	12,32
5	0,37	3,23	80,06	16,34
6	0,45	8,49	90,37	0,69
7	0,11	0,85	74,11	24,93
8	-	1,18	19,47	79,34

Проведенные исследования показали, что на морфологическое строение паяных соединений оказывают влияние не только температурно-временные параметры технологического процесса пайки, но и химический состав паяемого материала. Так, при использовании легированного сплава Ni–14Al–5Mo–4Co–2,5W в качестве основного металла наблюдаются выделения фазы, обогащенной вольфрамом, в виде дисперсных игловидных частиц шириной 1,5...2,0 мкм как в галтельном участке, так и в паяном шве (см. рис. 8). При пайке бинарного Ni–14Al сплава фаза, обогащенная

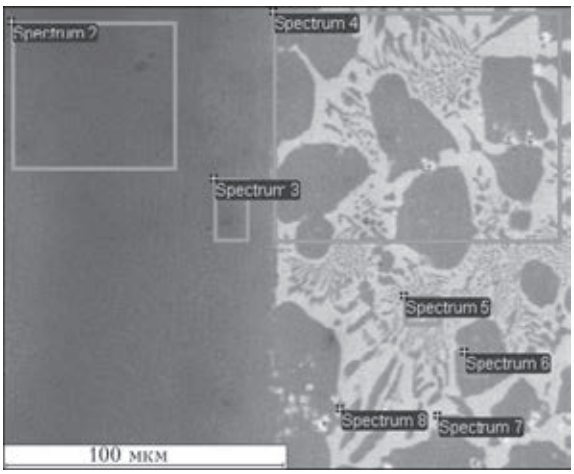


Рис. 9. Микроструктура межфазной границы Ni–Al сплав/Ni–Cr–Zr припой

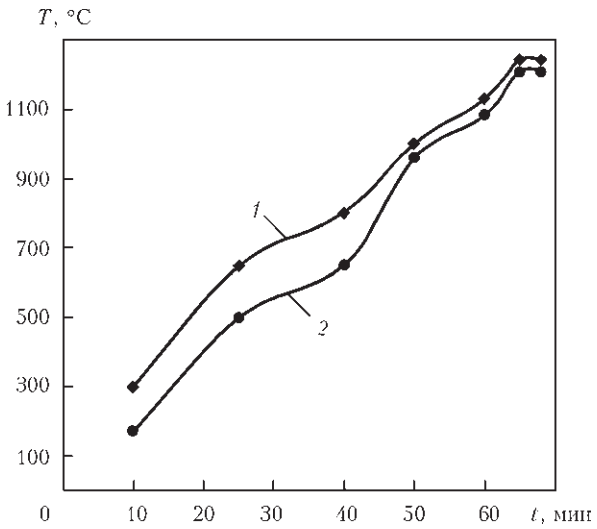


Рис. 10. Термограмма при пайке Ni–Cr–Zr припоем ($T_п$ = 1170 °С, τ = 3 мин): *1* — термопара в камере; *2* — на образце

вольфрамом, выделяется в виде довольно крупных включений. В галтельном участке их размер составляет около 40 мкм, в шве — около 18 мкм.

Кроме того, микроструктура расплавленного припоя на интерметаллидной подложке отличается от микроструктуры паяного шва. Это можно объяснить влиянием на протекание диффузионных процессов при нагреве геометрических параметров (капиллярных зазоров, длины границы раздела основной металл–припой), а также количества припоя. При растекании Ni–Cr–Zr припоя по подложке бинарного Ni–Al сплава зональная кристаллизация отсутствует (см. рис. 4, *б*; рис. 9). Расплавленный припой кристаллизуется в виде эвтектического сплава, образованного первичными зернами твердого раствора на основе никеля и интерметаллидом, содержащим до 25 % Zr (см. рис. 9; табл. 2). Наблюдается незначительное количество единичных дисперсных выделений фазы на основе циркония (79,34 %). Алюминий в расплавленный припой практически не диффундирует, что подтверждают результаты микрорентгеноспектральных исследований.

Вакуумную пайку стыковых соединений припоем Ni–Cr–Zr проводили при 1210 °С с выдержкой 3 мин. Температурный режим пайки записывали в виде термограммы (рис. 10). При пайке Ni–Al сплава и легированного Ni–Al–Mo–Co–W сплава припой системы Ni–Cr–Zr расплавляется, смачивает паяемый материал, затекает в капиллярный зазор и на обратную сторону образца с образованием полных плотных галтелей (рис. 11), что является подтверждением хорошей жидкотекучести эвтектического припоя.

Таблица 3. Распределение элементов в исследуемых участках паяного соединения Ni–Al сплава, выполненного Ni–Cr–Zr припоем

Номер спектра (см. рис. 13)	Состав, мас. %						
	Al	Cr	Co	Ni	Zr	Mo	W
2	8,57	-	4,76	78,13	-	5,52	3,02
3	4,61	3,05	3,10	83,10	-	3,39	2,75
4	0,47	4,45	0,11	79,72	14,60	-	0,64
5	0,34	2,22	0,16	76,30	20,98	-	-
6	0,42	4,58	0,41	78,50	15,26	-	0,83
7	0,46	4,33	0,19	79,34	14,93	-	0,75

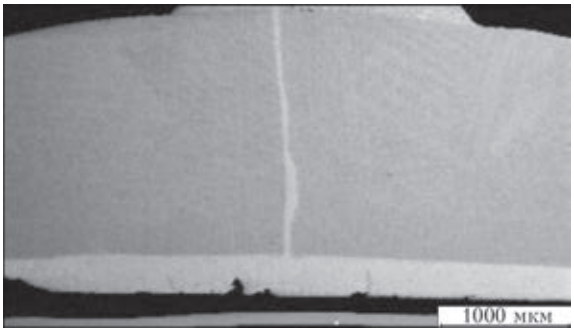


Рис. 11. Макрошлиф стыкового соединения Ni–Al сплава, выполненного Ni–Cr–Zr припоем

После пайки опытные образцы разрезали на пластины для дальнейших исследований. Металлографические исследования паяных соединений интерметаллидного сплава Ni–14Al показали, что Ni–Cr–Zr припой формирует плотные швы переменной ширины от 30 до 50 мкм. В центральной зоне шва в виде нитевидной полосы шириной 5 мкм кристаллизуется эвтектическая фаза на основе никеля, обогащенная цирконием до

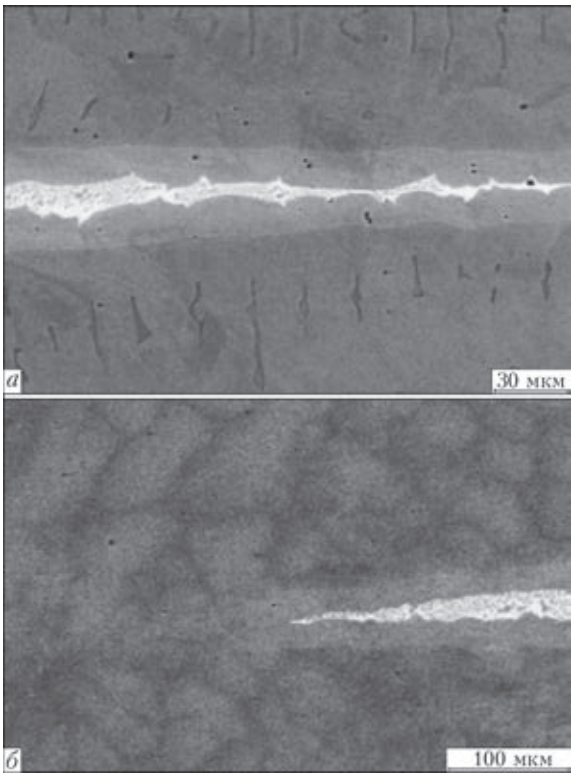


Рис. 12. Микроструктура паяного шва на Ni–Al сплаве, выполненного Ni–Cr–Zr припоем (*а*), и зона общих зерен основного металла (*б*)

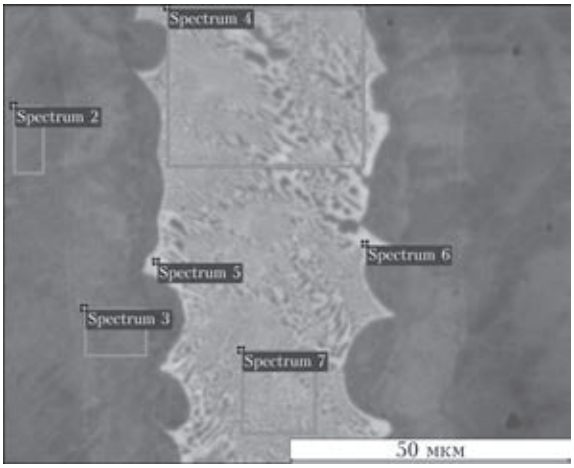


Рис. 13. Участки локального микроанализа после пайки Ni–Al сплава Ni–Cr–Zr припоем

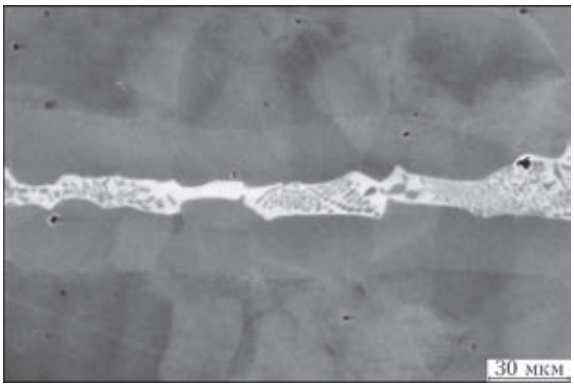


Рис. 14. Эвтектическая структура паяного шва (Ni–Al сплав, Ni–Cr–Zr припой) после термообработки при 1150 °С в течение 30 мин

7 мас. % (рис. 12, *а*). На границе соединения наблюдается зона общих зерен основного металла, в которой шов в классическом понимании отсутствует (рис. 12, *б*). Следует отметить, что концентрация циркония в темной части шва не превышает 0,49 мас. %, а концентрация алюминия достигает 7 мас. %, что свидетельствует о протекании диффузионных процессов на межфазной границе. Микрорентгеноспектральным анализом определено, что эвтектика образована твердым раствором на основе никеля и интерметаллидной фазой, обогащенной цирконием до 21 % (табл. 3, рис. 13).

После термической обработки паяных соединений при 1150 °С в течение 30 мин ширина шва составляла 32 мкм. Состав интерметаллидной фазы, которая кристаллизуется по центру шва, несколько изменяется: на фоне светлой фазы интерметаллида циркония, содержащего 20–23 мас. % Zr, формируется вторая фаза в виде глобулей темного цвета размером около 1,5 мкм, которая содержит 13–15 мас. % Zr. Выделения темной фазы (твердого раствора) в некоторых участках шва носят непрерывный характер, их состав соответствует соединению 87,66Ni–6,76Al–4,59Cr–0,99Zr.

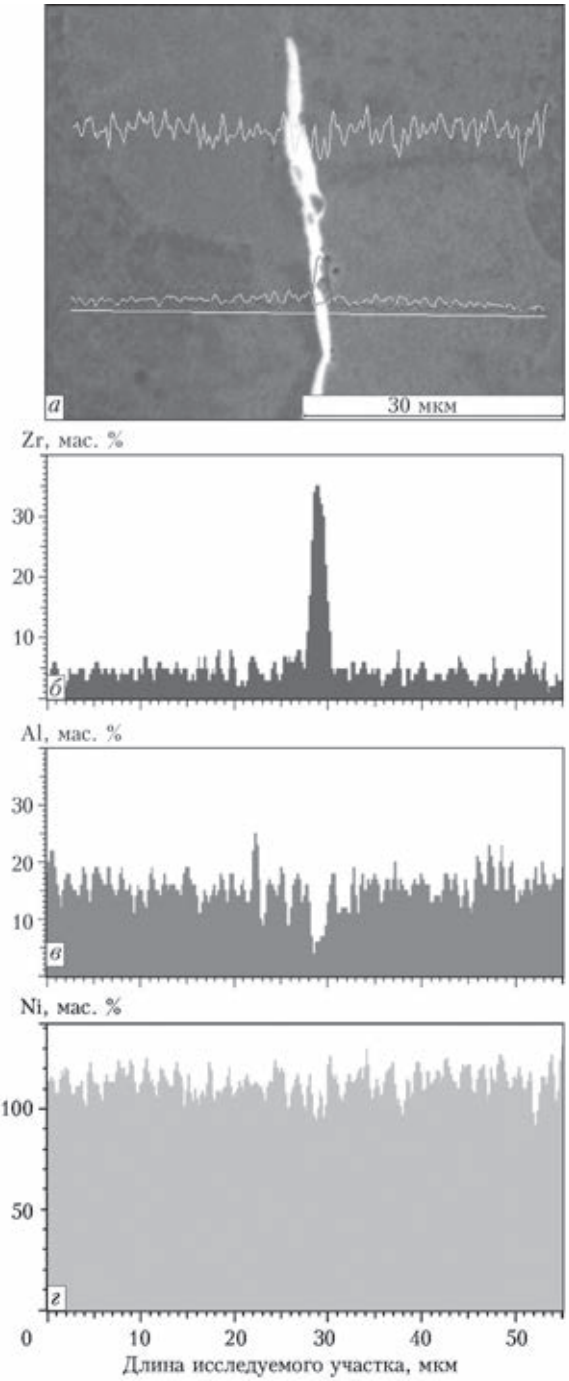


Рис. 15. Микроструктура (*а*) и распределение циркония (*б*), алюминия (*в*), никеля (*г*) в паяном шве (Ni–Al сплав, Ni–Cr–Zr припой)

Зона шва, прилегающая непосредственно к основному металлу, содержит около (мас. %) 1Zr, 6…7Al, 4Cr. После 30-минутной выдержки при 1150 °С за счет диффузионных процессов между паяемым материалом и металлом шва в последнем увеличивается концентрация хрома и циркония примерно на 1 мас. %. В швах сохраняется эвтектическая структура (рис. 14). Увеличение времени выдержки до 60 мин не оказало влияния на структуру швов: в центральной части кристаллизуется эвтектика, обогащенная цирконием; кон-

центрация алюминия снижается незначительно, никеля — не изменяется (рис. 15).

На основе проведенных исследований был сделан вывод, что эвтектические припои системы Ni–Cr–Zr хорошо растекаются по алюминиду никеля (контактный угол смачивания составляет 6°), затекают в вертикальные капиллярные зазоры и формируют плотные швы с эвтектической структурой. По длине образца встречаются довольно однородные участки шва, в которых наблюдаются сросшиеся зерна основного металла.

Металлографические исследования являются промежуточным этапом при разработке припоев. Работы следующего этапа будут включать определение механических свойств паяных соединений.

1. *Гринберг Б. А.*, *Иванов М. А.* Интерметаллиды Ni_3Al: микроструктура, деформационное поведение. – Екатеринбург, 2002. – 360 с.
2. *Поварова К. Б.*, *Казанская Н. К.*, *Бунтушкин В. П.* и др. Термостабильность структуры сплава на основе Ni_3Al и его применение в рабочих лопатках малоразмерных ГТД // Металлы. – 2003. – № 3. – С. 95–100.
3. *Бунтушкин В. П.*, *Каблов Е. Н.*, *Базылева О. А.* и др. Сплавы на основе алюминидов никеля // МиТОМ. – 1999. – № 1. – С. 32–34.
4. *Бунтушкин В. П.*, *Бронфин М. Б.*, *Базылева О. А.* и др. Влияние легирования и структуры отливок на жаропрочность интерметаллида Ni_3Al при высокой температуре // Металлы. – 2004. – № 2. – С. 107–110.
5. *Каблов Е. Н.*, *Бунтушкин В. П.*, *Поварова К. Б.* и др. Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида Ni_3Al // Там же. – 1999. – № 1. – С. 58–65.
6. *Хорунов В. Ф.*, *Перевезенцев Б. Н.*, *Убирайло О. Г.* Изучение структуры и химической неоднородности соединений интерметаллидного сплава Ni_3Al // Сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Пайка–2013». – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. – С. 255–264.
7. *Хорунов В. Ф.*, *Максимова С. В.* Перспективные системы припоев для пайки жаропрочных сплавов на основе никеля и титана. Физико-технические проблемы современного материаловедения. В 2-х т. – Киев: Академпериодика, 2013. – Т. 1. – С. 105–134.

Поступила в редакцию 12.03.2014

Международная конференция

«СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ. ВОПРОСЫ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ»

в рамках выставки по судоходству, судостроению и развитию портов **«ОДЕССА-2014»**

21–23 октября 2014 г. Одесса, Морской вокзал

На конференции будут работать секции по тематике **сварка в судостроении** и **судоремонте, подводная сварка, технологии и сварочное оборудование для эксплуатации контейнеров и портовых сооружений**.

Основными задачами выставочных мероприятий является стимулирование отечественного судостроения и судоремонта, укрепление инвестиционного климата отрасли, обсуждение путей консолидации государственных, технологических и инвестиционных ресурсов, а также развитие и модернизация портов и гидротехнических сооружений.

Контакты: ЧП «РИА «МедиаКомпас Украина», 65026, Одесса, ул. Жуковского, 15.
Тел./факс: +38(0482) 355-999. E-mail: conference@mediacompass.com.ua

УДК 539.424+544.452.12

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРЕВА НА ТЕМПЕРАТУРУ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ФОЛЬГИ Ti/Al

Д. Н. КУЗЬМЕНКО, А. И. УСТИНОВ, С. Г. КОСИНЦЕВ, Л. В. ПЕТРУШИНЕЦ
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Самоподдерживающаяся экзотермическая реакция синтеза в многослойной фольге, состоящей из интерметаллидообразующих элементов, может протекать путем самораспространения фронта реакции высокотемпературного синтеза по фольге (самораспространяюшийся высокотемпературный синтез (СВС)) или в результате протекания реакции синтеза по всему объему (самовоспламенение (СВ)). Последнее реализуется при условии нагрева всей фольги до некоторой критической температуры, при которой реакция синтеза протекает по всему объему без внешнего подвода тепла. В работе на примере многослойной фольги Ti/Al исследовано влияние скорости ее нагрева на температуру СВ. Показано, что существует критическая скорость нагрева, ниже которой СВ фольги не наблюдается, а при скоростях нагрева выше критической температура СВ снижается с увеличением скорости нагрева. Зависимость температуры СВ от скорости нагрева имеет немонотонный характер: при небольших скоростях нагрева температура СВ резко снижается, а при дальнейшем повышении скорости нагрева температура СВ остается практически неизменной. Такая немонотонная зависимость температуры СВ фольги от скорости нагрева связывается с протеканием в ней в процессе нагрева термически активированных твердофазных реакций, которые сопровождаются образованием прослоек интерметаллида на границе между слоями титана и алюминия, препятствующих диффузионному перемешиванию элементов. С увеличением скорости нагрева толщина прослоек уменьшается, что способствует снижению температуры СВ. Библиогр. 11, рис. 4.

Ключевые слова: многослойная фольга, самовоспламенение, электронно-лучевое вакуумное осаждение, тепловой взрыв, тепловыделение

Известно, что консолидированные системы на основе элементов, способных вступать в реакцию синтеза, получили широкое применение, в первую очередь благодаря возможности синтезировать в процессе реакции тугоплавкие соединения, интерметаллиды и керамику, а также осаждать покрытия на их основе и получать неразъемные соединения [1, 2]. Последнее обусловлено, главным образом, тем, что процесс синтеза в таких системах сопровождается интенсивным выделением тепла, которого достаточно для реализации процесса сварки или пайки с ограниченным использованием внешних источников энергии [3–5]. В случае локального разогрева зоны соединения с помощью реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) существенным фактором, ограничивающим ее применение, является теплоотвод [6]. Условия для инициирования самовоспламенения (СВ) в многослойной фольге были исследованы только на порошковых материалах. Поэтому для практической реализации этого подхода при сварке необходимо определить условия инициирования СВ в многослойной системе.

Как известно, характер выделения тепла зависит от способа инициирования твердофазной реакции в системе [7]. Если разогрев системы осуществлять локально, то в месте разогрева можно инициировать твердофазную реакцию, которая будет способна распространяться по системе без внешнего подвода тепла (СВС-реакция). При этом выделение тепла будет локализовано главным образом на фронте реакции [7, 8]. Когда весь объем системы однородно нагревается до температуры инициирования в нем реакции синтеза (температура СВ), выделение тепла происходит во всем объеме. Это позволяет получить максимальную интенсивность его выделения (тепловой взрыв) [2].

Полагают, что для обеспечения условий реализации в реакционной системе СВС-процесса необходимо подвести тепловой импульс, мощность которого соизмерима с теплотой образования интерметаллида, а для СВ необходимо разогреть систему до некоторой критической температуры, при которой реакция синтеза будет протекать без дополнительного подвода тепла [2, 8].

Первые экспериментальные исследования условий СВ были проведены на системах, полученных консолидацией порошков чистых элементов [1, 2]. На примере систем с высокой теплотой образования интерметаллидов, таких, как Ni/Al, Ti/Al и т. п., было показано, что для инициирования СВ необходимо нагреть систему до температуры плавления алюминия. Последнее обусловлено тем, что в порошковых материалах отдельные частицы покрыты оксидной пленкой и необходимым условием начала реакции между ними является ее разрушение. Наиболее устойчива оксидная пленка алюминия (температура плавления оксида алюми-

© Д. Н. Кузьменко, А. И. Устинов, С. Г. Косинцев, Л. В. Петрушинец, 2014

ния 2040 °С), поэтому ее удаление с поверхности частиц алюминия при низких температурах невозможно. Однако оказалось, что для начала диффузионного взаимодействия между элементами достаточно нарушить цельность оксидной пленки. Этого можно достичь, например, при плавлении алюминия. Из-за объемного эффекта при его плавлении оксидная оболочка на частицах алюминия трескается и он, вытекая из частицы, вступает в реакцию с другим элементом [2].

Иная ситуация в многослойных системах, полученных в процессе послойного вакуумного осаждения слоев интерметаллидообразующих элементов. В этом случае между слоями элементов отсутствует барьер в виде оксидной пленки, затрудняющий их диффузионное взаимодействие. Поэтому уже при незначительном подогреве такой многослойной структуры в ней возможно протекание реакционной диффузии элементов [2]. Ясно, что такая структура реакционной системы будет оказывать существенное влияние на условия инициирования в ней реакции синтеза. Так, например, согласно результатам работы [7], СВ фольги Ti/Al наблюдали при ее нагреве до температуры около 350 °С.

В то же время известно, что твердофазные реакции в фольге Ti/Al интенсивно протекают уже при температурах около 300 °С, что сопровождается образованием на границах слоев прослоек интерметаллидной фазы. Образующиеся интерметаллидные слои могут служить барьерами для диффузионного перемешивания элементов. Ранее теоретически было показано, что наличие такой прослойки оказывает существенное влияние на скорость перемещения фронта реакции СВС [9]. Можно предположить, что в зависимости от того, с какой скоростью осуществляется нагрев фольги, толщина прослойки будет изменяться, что должно оказывать влияние на температуру ее СВ.

В работе на примере многослойной фольги Ti/Al проведены исследования зависимости температуры ее СВ от скорости нагрева.

Методика эксперимента. Многослойные фольги Ti/Al, состоящие из чередующихся слоев титана и алюминия, были получены методом послойного электронно-лучевого осаждения элементов на горизонтально вращающуюся подложку, закрепленную на вертикальном вале, по методике, описанной в работе [10]. Из анализа микроструктуры поперечного сечения фольги (рис. 1) было установлено, что период чередования слоев (т. е. толщина мультислоя Ti + Al) составлял 68 нм при общей толщине многослойной пленки 26 мкм.

Схема установки для измерения температуры СВ представлена на рис. 2. Особенности методики обусловлены малой массой (порядка 50 мг) и малой толщиной (26 мкм) образцов. Для уменьшения влияния внешних факторов и снижения теплопотерь на образце измерительный блок, в котором располагалась многослойная фольга, был экранирован алюминиевой фольгой.

Для исследования процесса СВ использовали механически вырезанные полоски многослойной фольги шириной 1,5 см и длиной 2,5…3,0 см. Исследуемая полоска крепилась за концы в держателе из нихромовых нитей. Фольгу прогревали инфракрасным излучением от плоского нагревателя, изготовленного из нихромовой проволоки, который располагался под фольгой на фиксированном расстоянии. Питание нагревателя и, следовательно, интенсивность радиационного нагрева подбирали таким образом, чтобы обеспечить заданную скорость нагрева фольги, близкую к линейной, вплоть до температуры СВ. Температуру образца регистрировали с помощью двух термопар хро-

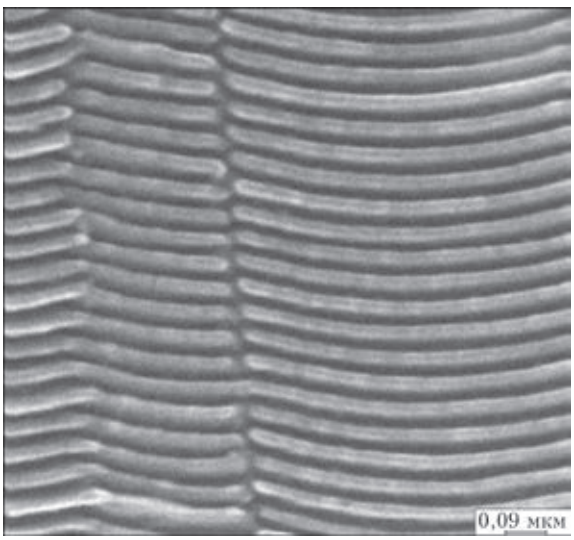


Рис. 1. Микроструктура поперечного сечения фольги, полученная методом СЭМ (светлые полосы соответствуют слоям титана, темные — алюминия)

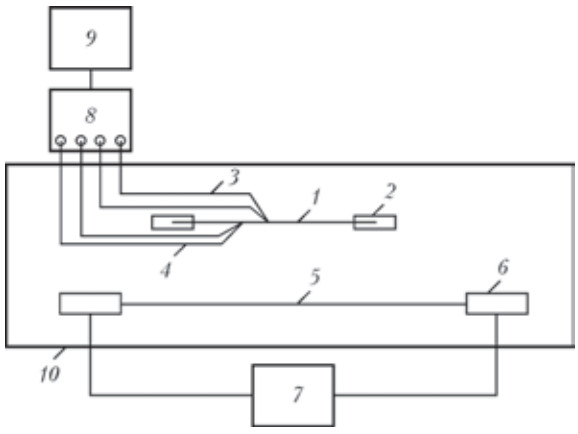


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: *1* — образец; *2* — держатель; *3*, *4* — соответственно верхняя и нижняя термопара; *5* — нихромовый нагреватель; *6* — медные контакты; *7* — лабораторный автотрансформатор; *8* — АЦП; *9* — компьютер; *10* — алюминиевый экран

мель-алюмель толщиной 0,7 мм, находящихся в контакте с образцом с двух сторон.

Показания термопар регистрировали аналого-цифровым преобразователем с записью на компьютер. Разница показаний термопар на противоположных поверхностях фольги находилась в пределах 30…50 °С во всем исследуемом интервале температур. В качестве температуры образца принимали среднюю по показаниям двух термопар.

Результаты и обсуждение. На рис. 3 представлены термограммы нагрева фольги Ti/Al с различными скоростями. За отсчет времени процесса принят момент времени начала резкого скачка температуры фольги (СВ многослойной фольги). Среднюю скорость нагрева определяли по наклону участка прямой линии, примерно за 200 °С до СВ, наилучшим образом описывающей зависимость температуры от времени. Видно, что температура фольги увеличивается равномерно с заданной скоростью до достижения некоторой критической величины, при которой происходит ее резкое повышение (скачок). Такое резкое повышение температуры сопровождается ярким свечением по всему объему фольги, что свидетельствует об интенсивном тепловыделении вследствие объемного протекания твердофазной реакции (СВ).

Из представленных термограмм видно, что с уменьшением скорости нагрева увеличивается температура фольги в момент СВ, а при скоростях меньше 2,5 °С/с (критическая скорость) СВ фольги не наблюдается. Обращает на себя внимание то, что температура воспламенения фольги, полученная для различных скоростей нагрева, находится в диапазоне 350…500 °С, что на 200…300 °С ниже температуры воспламенения порошковых образцов аналогичного состава (Ti + Al) [1, 2].

Как видно из термограмм, представленных на рис. 3, СВ фольги происходит при различных температурах образца. Температура СВ заметно различается в зависимости от скорости нагрева фольги. Так, например, для скорости нагрева 21,2 °С/с (*3*) составляет 380 °С, в то время как для 4,6 °С/с (*2*) — 475 °С.

Кроме того, обращает на себя внимание то, что при уменьшении скорости нагрева величина скачка температуры образца при СВ уменьшается вплоть до полного его исчезновения при нагреве фольги со скоростями ниже критической. Поскольку температура образца определяется в основном количеством элементов, вступивших в реакцию в момент СВ, то из анализа термограмм можно предположить, что с уменьшением скорости нагрева фольги объемная доля элементов, не прореагировавших до начала процесса СВ, уменьшается.

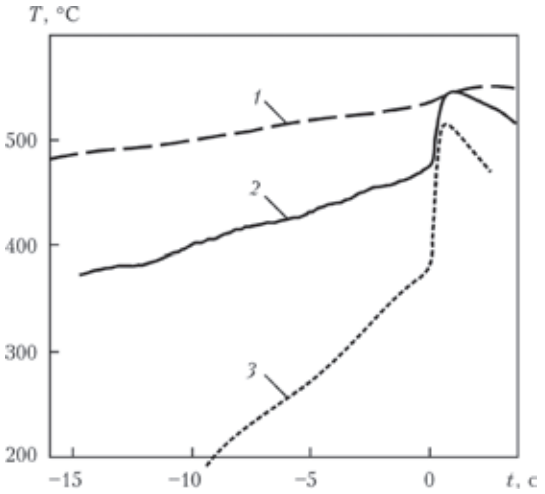


Рис. 3. Зависимость температуры от времени при постоянном нагреве со скоростями 2,5 (*1*), 4,6 (*2*) и 21,2 °С/с (*3*)

На основании измерений была построена зависимость температуры СВ от скорости нагрева, представленная на рис. 4. Полученные данные показывают, что СВ фольги реализуется для скоростей нагрева, превышающих некоторое критическое значение $V_{кр} \sim 2{,}5$ °С/с. Для случая скоростей нагрева менее 2,5 °С/с признаки СВ не наблюдались, что соответствует квазистационарному прохождению реакции образования интерметаллидов. При скоростях нагрева больше критической температура СВ изменяется. Ее зависимость от скорости нагрева условно можно разделить на два интервала: в первом интервале (2,5…7,5 °С/с) температура СВ резко уменьшается с увеличением скорости нагрева, а во втором (при скоростях выше 7,5 °С/с) температура СВ слабо зависит от скорости нагрева.

Таким образом, возможны три качественно различные картины протекания реакции образования интерметаллидов в многослойной фольге в зависимости от скорости ее нагрева. В случае скоростей нагрева меньше критической $V_{кр}$ твердофазная реакция протекает в квазистационарном режиме при условии непрерывного повышения температуры фольги. Поскольку интенсивность протекания реакции синтеза в многослойной системе определяется двумя факторами — температурой, повышение которой увеличивает диффузионную подвижность атомов, и толщиной интерметаллидной прослойки между реакционными слоями, увеличение которой препятствует диффузионному перемешиванию элементов, то можно предположить, что при скоростях нагрева меньше критической увеличение толщины прослоек происходит быстрее, чем повышается диффузионная подвижность. Из этого следует, что при скоростях нагрева выше критической, при достижении температуры СВ промежуточные прослойки, образовавшиеся при нагреве фольги до этой темпе-

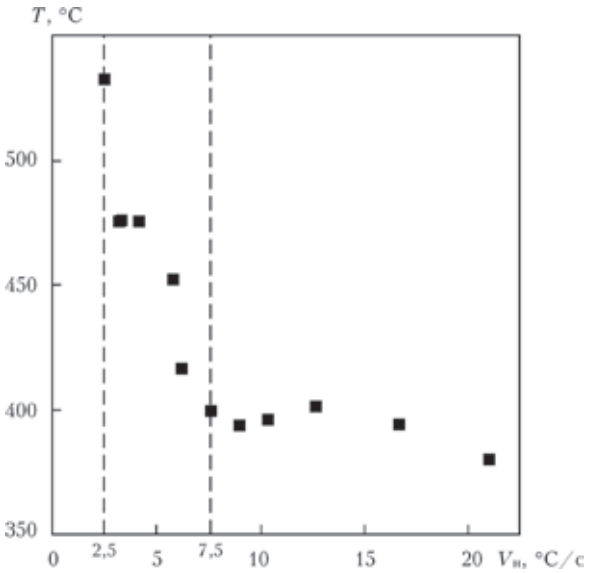


Рис. 4. Зависимость температуры воспламенения многослойной фольги от скорости ее нагрева

ратуры, не препятствовали интенсивному диффузионному перемешиванию элементов.

Ясно, что с увеличением скорости нагрева толщина прослоек будет уменьшаться, что способствует снижению температуры СВ. Этим можно объяснить снижение температуры СВ в диапазоне скоростей нагрева от критической $V_{кр}$ до некоторой переходной скорости $V_п$, выше которой температура СВ практически не изменяется при дальнейшем повышении скорости нагрева. При таких скоростях нагрева свыше переходной $V_п$ интерметаллидная прослойка, по-видимому, не успевает сформироваться к моменту начала реакции и структура многослойных фольг, нагреваемых с различными скоростями, в момент СВ практически не отличается друг от друга.

В пользу того, что именно толщина интерметаллидной прослойки, зависящая от скорости нагрева, влияет в конечном результате на температуру СВ, могут свидетельствовать результаты работ [9, 11], в которых было показано, что с увеличением толщины прослойки скорость распространения фронта СВС-реакции замедляется, а при некоторой критической толщине СВС-процесс может быть подавлен.

Таким образом, на примере многослойной фольги Ti/Al показано, что температура ее СВ нелинейно зависит от скорости нагрева. При этом существует пороговая скорость нагрева фольги (в данном случае $V_{кр}$ ~ 2,5 °C/c), при которой ее СВ не происходит. При повышении скорости нагрева выше критической (в интервале 2,5…7,5 °C/c) наблюдается резкое понижение температуры СВ (с 530 °C при скорости 2,5 °C/c до 400 °C для 7,5 °C/c), которое замедляется и становится слабозависящим от скорости нагрева при достижении некоторой переходной ее величины (выше $V_п$ ~ 7,5 °C/c). Установленная нелинейная зависимость температуры СВ многослойной фольги от скорости ее нагрева связывается с изменением ее структуры в результате образования промежуточной прослойки на границе раздела между слоями титана и алюминия в процессе нагрева до температур, при которых возможно интенсивное диффузионное перемешивание элементов.

1. *Мержанов А. Г.* Самораспространяющийся высокотемпературный синтез. — М.: Химия, 1983.
2. *Мержанов А. Г.* Твердопламенное горение. – Черноголовка: ИСМАН, 2000. – 224 с.
3. *Diffusion* welding of gamma-TiAl alloys through nanolayered foil of Ti/Al system / A. I. Ustinov, Yu. V. Falchenko, A. Ya. Ishchenko et al. // Intermetallics. – 2008. – **16**. – P. 1043–1045.
4. *Room* temperature soldering with nanostructured foils / J. Wang, E. Besnoin, A. Duckham et al. // Appl Phys Lett. – 2003. – **83**. – P. 3987–3989.
5. *Reactive* nanostructured foil used as a heat source for joining titanium / A. Duckham, S. J. Spey, J. Wang et al // J Appl Phys. – 2004. – **96**. – P. 2336–2342.
6. *Запорожец Т. В.*, *Гусак А. М.*, *Устинов А. И.* Условия распространения фронта реакции СВС в нанослойных фольгах, контактирующих с теплопроводящим материалом // Автомат. сварка. – 2011. – № 8. – С. 43–47.
7. *Безгазовое* горение многослойных биметаллических нанопленок Ti/Al / А. С. Рогачев, А. Э. Григорян, Е. В. Илларионова и др. // Физ. горения и взрыва. – 2004. – **40**, № 2. – С. 45–51.
8. *Концепция* развития СВС как области научно-технического прогресса. – Черноголовка: Территория, 2003. – С. 7–12, С. 92–108.
9. *Inverse* problem for SHS in multilayer nanofoils: prediction of process parametrs for single-stage SHS reaction / T. V. Zaporozhets, A. M. Gusak, Ya. D. Korol, A. I. Ustinov // Intern. J. of SHS. – 2013. – **22**, № 4. – P. 217–226.
10. *Диффузионная* сварка микродисперсного композита АМг5 + Al_2O_3 с применением нанослойной фольги Ni/Al / А. Я. Ищенко, Ю. В. Фальченко, А. И. Устинов и др. // Автомат. сварка. – 2007. – № 7. – С. 5–9.
11. *Phase* transformations during rapid heating of Al/Ni multilayer foils / J. C. Trenkle, L. J. Koerner, M. W. Tate et al. // Applied Physics Letters. – 2008. – **93**. – № 8.

Поступила в редакцию 18.09.2014

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Совет научной молодежи ИЭС

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

20–22 мая 2015 г. Ворзель, Киевская обл.

www.paton.kiev.ua/wmicys2015; E-mail: wmicys2015@gmail.com

УДК 621.791.754

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА МНОГОПРОХОДНОЙ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Д. С. БУЗОРИНА[1,2], М. А. ШОЛОХОВ[2], М. П. ШАЛИМОВ[1]

[1] Уральский федеральный ун-т. 620002, РФ, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

[2] ООО «ШТОРМ». РФ, г. Екатеринбург, ул. Народной Воли, 115. E-mail: ekb@shtorm-its.ru

Применение в современном сварочном производстве автоматических и роботизированных установок для сварки требует создания алгоритмов управления параметрами режима сварки, а именно назначения и адаптивной корректировки параметров в зависимости от условий. Кроме основных параметров режима сварки (сварочный ток, напряжение, скорость сварки) и геометрии разделки на параметры, определяющие формирование сварного шва и эффективность использования тепловой энергии дуги для образования сварного соединения, оказывают влияние величина вылета электрода и состав защитного газа. Экспериментально установлены зависимости площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки от вылета электрода и состава защитного газа. С учетом данных зависимостей усовершенствована ранее разработанная методика для расчета параметров режима сварки. Уравнения учитывают как технологические параметры (угол разделки, положение электрода в разделке, скорость сварки), так и состав защитного газа и величину вылета электрода. Библиогр. 7, рис. 2.

Ключевые слова: многопроходная дуговая сварка, плавящийся электрод, полный тепловой КПД, коэффициент площадей, параметры режима сварки

При проектировании технологии сварки важным моментом является определение параметров режима сварки, обеспечивающих получение сварных соединений с заданными параметрами. Широкое применение в современном сварочном производстве автоматических и роботизированных установок для сварки требует создания алгоритмов управления параметрами режима сварки, а именно назначения и адаптивной корректировки параметров в зависимости от условий. Адаптивная корректировка режимов сварки должна основываться на точном определении влияния каждого из параметров процесса и их сочетаний на качественные показатели сварного шва [1]. В основу большинства математических моделей, создаваемых для управления сварочными процессами, заложены статистические зависимости между энергетическими параметрами режима сварки (сварочный ток, напряжение на дуге, скорость сварки и т. д.) и параметрами, характеризующими качество сварного соединения (геометрические характеристики, механические свойства и т. д.) [2].

В работе [3] предложена методика расчета параметров, основанная на результатах исследования влияния технологических факторов (угла разделки α, положения электрода в разделке x, скорости сварки $v_{св}$) на параметры, определяющие формирование сварного шва и эффективность использования тепловой энергии дуги на образование сварного соединения.

Анализ литературных данных показал, что кроме основных параметров режима сварки (сварочный ток, напряжение, скорость сварки) и геометрии разделки, учитываемых в указанной выше методике [3], на исследуемые параметры (площадь сечения валика и на тепловой КПД процесса сварки) также оказывают влияние вылет электрода [4] и состав защитного газа [4, 5].

Известно, что состав защитного газа оказывает значительное влияние на технологические характеристики и форму проплавления. При постоянном напряжении с ростом доли CO_2 в смеси до 50 % дуга укорачивается, шов становится уже, глубина проплавления и высота усиления увеличиваются, возрастает площадь проплавления [4].

Вылет электрода при сварке сплошными проволоками влияет на стабильность процесса сварки. Обусловлено это изменением нагрева электрода на вылете проходящим током. Допустимый вылет электрода зависит от диаметра, удельного электрического сопротивления электрода и силы сварочного тока. При малых вылетах затрудняется видимость зоны сварки и возможно подплавление токоподвода, а при больших — возможно нарушение стабильности процесса. Увеличение вылета позволяет повысить коэффициент расплавления электрода и уменьшает глубину провара [4]. По данным работы [6] при увеличении вылета электрода ширина шва и глубина проплавления уменьшаются (при прочих равных условиях), а выпуклость шва увеличивается. Механизм влияния вылета электрода на глубину проплавления заключается в том, что при повышенной величине вылета возрастает количество наплавленного металла, усиливается подтекание жидкого металла под дугу; возникает эффект экранирования нерас-

© Д. С. Бузорина, М. А. Шолохов, М. П. Шалимов, 2014

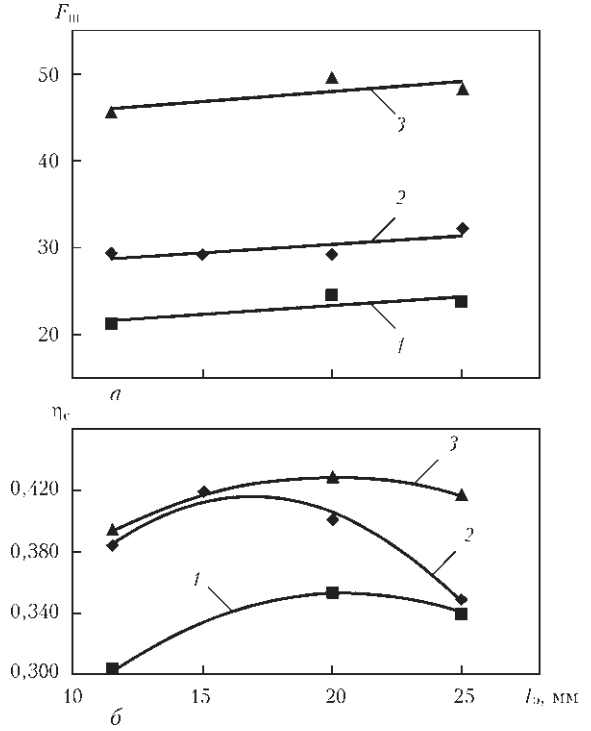


Рис. 1. Влияние вылета электрода на площадь сечения валика (*а*) и на полный тепловой КПД процесса сварки (*б*) (*1* — 180; *2* — 220; *3* — 260 А)

плавленного основного металла прослойкой жидкого металла, что приводит к уменьшению глубины проплавления свариваемого металла [7].

Таким образом, для применения методики расчета параметров режима многопроходной сварки [3] на практике, например, при создании алгоритмов управления параметрами режима сварки, в уравнениях должны учитываться как основные технологические параметры (угол разделки, положение электрода в разделке, скорость сварки), так и состав защитного газа и вылет электрода, оказывающие влияние на формирование сварного шва.

Цель работы — установление зависимостей между параметрами, характеризующими формирование сварного шва, и технологическими параметрами сварки, в том числе составом защитного газа и вылетом электрода, а также определение на основе полученных зависимостей параметров режима многопроходной сварки, обеспечивающих отсутствие несплавлений.

В общем виде уравнения для определения площади сечения валика и полного теплового КПД могут быть записаны в следующем виде:

$$F = F^{v}_{ш}(\alpha, x, v_{св})\theta^{F}_{l}(I_{св})\theta^{F}_{\%}(\%CO_2)\theta^{F}_{l}(l_э), \quad (1)$$

$$\eta_с = \eta^{v}_{с}(\alpha, x, v_{св})\theta^{\eta}_{l}(I_{св})\theta^{\eta}_{\%}(\%CO_2)\theta^{\eta}_{l}(l_э), \quad (2)$$

где $F^{v}_{ш}(\alpha, x, v_{св})$, $\eta^{v}_{с}(\alpha, x, v_{св})$ — функции зависимости площади сечения валика и теплового КПД соответственно от угла разделки α, положения электрода в разделке x, скорости сварки $v_{св}$. Определяются по формулам, приведенным в работе [3]:

$$F_ш = (47{,}50 - 0{,}031\alpha + 4{,}21x - 0{,}956v_{св} - 0{,}113\alpha x + 0{,}003\alpha v_{св} - 0{,}143xv_{св} + 0{,}004\alpha x v_{св})(0{,}0134I_{св} - 1{,}559) \quad (3)$$

$$\eta_с = (0{,}125 - 0{,}006\alpha + 0{,}018x + 0{,}024v_{св} + 0{,}00006\alpha^2 + 0{,}0006x^2 - 0{,}0005v^2_{св} - 0{,}0005\alpha x + 0{,}00012\alpha v_{св} - 0{,}00013xv_{св})(0{,}0047I_{св} + 0{,}084), \quad (4)$$

где $F_ш$ — площадь сечения валика, мм^2; $\eta_с$ — полный тепловой КПД процесса сварки; α — угол разделки, град; x — положение электрода в разделке, мм; $v_{св}$ — скорость сварки, м/ч; $I_{св}$ — сварочный ток, А; $\theta^{F}_{I}(I_{св})$, $\theta^{F}_{\%}(\%CO_2)$, $\theta^{F}_{l}(l_э)$ — функции зависимости площади сечения валика от сварочного тока $I_{св}$, состава защитного газа (процентного содержания углекислого газа $\%CO_2$ в смеси Ar + CO_2) и вылета электрода $l_э$ соответственно; $\theta^{\eta}_{I}(I_{св})$, $\theta^{\eta}_{\%}(\%CO_2)$, $\theta^{\eta}_{l}(l_э)$ — функции зависимости полного теплового КПД процесса сварки от сварочного тока $I_{св}$, состава защитного газа (процентного содержания углекислого газа в смеси Ar + CO_2) и вылета электрода $l_э$ соответственно.

Для определения функций

$$\theta^{F}_{I}(I_{св}),\ \theta^{F}_{\%}(\%CO_2),\ \theta^{F}_{l}(l_э),$$

$$\theta^{\eta}_{I}(I_{св}),\ \theta^{\eta}_{\%}(\%CO_2),\ \theta^{\eta}_{l}(l_э)$$

провели ряд экспериментов.

При исследовании влияния вылета электродной проволоки и состава защитного газа приняли два допущения: состав защитного газа и вылет электродной проволоки оказывают независимое от ранее исследованных параметров (I, $U_д$, $v_{св}$, x, α) влияние на площадь сечения валика и полный тепловой КПД процесса сварки; состав защитного газа и вылет электродной проволоки не оказывают взаимного влияния на площадь сечения валика и полный тепловой КПД процесса сварки.

По полученным в ходе экспериментальных работ данным построены графики влияния вылета электрода на площадь сечения валика и на полный тепловой КПД процесса сварки (рис. 1).

Графики, приведенные на рис. 1, *а* показывают, что при увеличении сварочного тока в исследуемом диапазоне характер зависимости площади сечения валика от вылета электрода фактически не изменяется. Следовательно, при определении площади сечения валика можно принять ранее введенное допущение об отсутствии взаимного влияния вылета электрода и сварочного тока на площадь сечения валика. После обработки результатов экспериментов функция зависимости площади сечения валика от вылета электрода $l_э$ может быть записана в следующем виде:

$$\theta^{F}_{l}(l_э) = 0{,}001l_э + 0{,}956. \quad (5)$$

Иной характер зависимости наблюдается при рассмотрении влияния вылета электрода на пол-

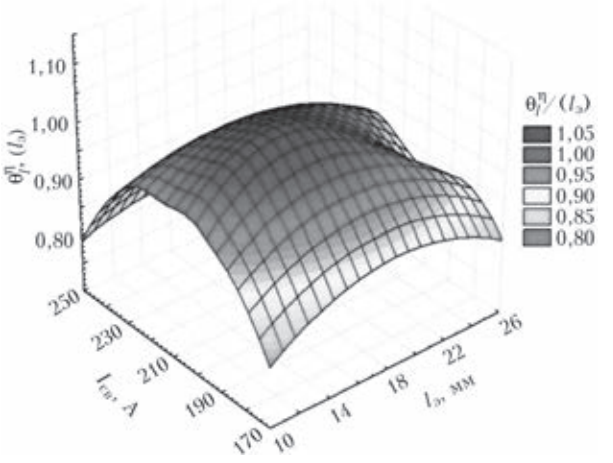


Рис. 2. Поверхность отклика функции $\theta_l^{\eta}(l_э)$ в зависимости от значения сварочного тока и вылета электрода

ный тепловой КПД процесса сварки (рис. 1, *б*). Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении сварочного тока изменяется характер влияния вылета электрода на полный тепловой КПД, следовательно, можно сделать вывод о взаимном влиянии вылета электрода и сварочного тока на полный тепловой КПД процесса сварки. Функция $\theta_l^{\eta}(l_э)$ может быть представлена в виде полинома второй степени от двух аргументов ($I_{св}$, $l_э$) и после обработки экспериментальных данных с помощью регрессионного анализа записана в следующем виде:

$$\theta_l^{\eta}(l_э) = -I_{св}{}^2 \cdot 10^{-4} - 0{,}001 l_э^2 + \\ + 0{,}05 I_{св} + 0{,}03 l_э - 3{,}98. \quad (6)$$

На рис. 2 представлена поверхность отклика функции $\theta_l^{\eta}(l_э)$ в зависимости от сварочного тока и вылета электрода.

Полученные результаты и данные, представленные на рис. 2, косвенно подтверждают ранее сделанные выводы [3] о сложном взаимном влиянии параметров режима сварки на формирование сварного шва. Существует сочетание факторов, обеспечивающих максимально эффективное использование энергии дуги.

При исследовании влияния состава защитного газа установлено, что при увеличении доли CO_2 в смеси защитных газов (от 0 до 30 %) площадь сечения валика увеличивается. В данном случае увеличение площади сечения валика обусловлено возрастанием площади проплавления, что согласуется с известными литературными данными [5].

После обработки результатов экспериментов получены функции зависимости площади сечения валика и теплового КПД соответственно от процентного содержания CO_2:

$$\theta_{\%}^{F}(\%CO_2) = 0{,}003 \cdot \%CO_2 + 0{,}945. \quad (7)$$

$$\theta_{\%}^{\eta}(\%CO_2) = 0{,}003 \cdot \%CO_2 + 0{,}907. \quad (8)$$

Тогда общие уравнения (3), (4) примут вид:

$$F = (47{,}50 - 0{,}03\alpha + 4{,}21x - 0{,}96 v_{св} - 0{,}113\alpha x + \\ + 0{,}003\alpha v_{св} - 0{,}143 x v_{св} + 0{,}004\alpha x v_{св}) \times \\ \times (0{,}013 I_{св} - 1{,}56)(0{,}001 l_э + 0{,}956)(0{,}003 \cdot \%CO_2 + 0{,}945),$$

$$\eta_{св} = (0{,}125 - 0{,}006\alpha + 0{,}018x + 0{,}024 v_{св} + \\ + 0{,}00006\alpha^2 + 0{,}0006x^2 - 0{,}0005 v_{св}^2 - 0{,}0005\alpha x + \\ + 0{,}00012\alpha v_{св} - 0{,}00013 x v_{св})(0{,}005 I_{св} + 0{,}084) \times \\ \times (-I_{св}^2 \cdot 10^{-4} - 0{,}001 l_э^2 + 0{,}05 I_{св} + \\ + 0{,}03 l_э - 3{,}98)(0{,}003 \cdot \%CO_2 + 0{,}907).$$

Учитывая зависимости, ранее предложенные авторами в работе [3], и полученные в настоящей работе зависимости площади сечения валика и теплового КПД от вылета электрода (5), (6) и процентного содержания CO_2 (7), (8), уравнения для определения параметров режима сварки могут быть представлены в следующем виде:

Сварочный ток:

$$I_{св} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \text{ А} \quad (9)$$

Коэффициенты a, b, c определяются по формулам:

$$a = -0{,}015 \frac{\pi d^2}{F_н}.$$

$$b = 0{,}64 + 0{,}06x + \frac{\pi d^2}{F_н}(3{,}34 + 0{,}35x - 0{,}01\alpha).$$

$$c = -74{,}05 + 0{,}05\alpha - 6{,}56x - \\ - \frac{\pi d^2}{F_н}(185{,}97 - 0{,}6\alpha x - 0{,}58\alpha + 27{,}81x) - \\ - \frac{(1+\kappa)F_н}{(0{,}001 l_э + 0{,}956)(0{,}003 \cdot \%CO_2 + 0{,}945)},$$

где d — диаметр электрода, мм; $F_н$ — площадь наплавленного металла, мм^2; к — коэффициент площадей (при сварке плавящимся электродом при используемых режимах к = 0,18…4,0).

Напряжение:

$$U_{эф} = \frac{B_{эф} v_{пп}}{\eta_c I_{св}}, \text{ В} \quad (10)$$

Значение коэффициента $B_{эф}$ определяется по формуле

$$B_{эф} = \gamma_м H_{пл} \frac{(1+k)}{4} \pi d^2.$$

Значение теплового КПД процесса сварки определяется по формуле

$$\eta_{св} = (0{,}125 - 0{,}006\alpha + 0{,}018x + \\ + 0{,}024 v_{св} + 0{,}00006\alpha^2 + 0{,}0006x^2 - 0{,}0005 v_{св}^2 - \\ - 0{,}0005\alpha x + 0{,}00012\alpha v_{св} - 0{,}00013 x v_{св}) \times \\ \times (0{,}0047 I_{св} + 0{,}084)(-I_{св}^2 \cdot 10^{-4} - 0{,}001 l_э^2 + \\ + 0{,}05 I_{св} + 0{,}003 l_э - 3{,}98)(0{,}003 \cdot \%CO_2 + 0{,}91),$$

где $\gamma_м$ — удельная плотность металла, кг/м^3; $H_{пл}$ — энтальпия при температуре плавления с учетом скрытой теплоты плавления, Дж/кг; k — коэффициент сплавления.

Скорость сварки:

$$v_{св} = \frac{\pi d^2 (0{,}078 I_{св} - 8{,}32) \cdot 60}{4 F_н}, \text{ м/ч} \qquad (11)$$

Выводы

1. Получены в аналитическом виде функции зависимости теплового КПД процесса сварки и площади сечения валика от вылета электрода и состава защитного газа.

2. Полученные уравнения для определения расчета параметров режима многопроходной механизированной сварки в защитных газах на основе определения полного теплового КПД процесса сварки позволяют рассчитать режимы сварки (с точностью около 12 %) при условии получения гарантированного проплавления (при заданном коэффициенте площадей к). Данные уравнения учитывают как технологические параметры (угол разделки, положение электрода в разделке, скорость сварки), так и состав защитного газа и вылет электрода. Уравнения могут быть применены при разработке технологии многопроходной сварки углеродистых, низколегированных и среднелегированных сталей в смесях защитных газов на основе аргона.

1. *Полосков С. И.*, *Ерофеев В. А.*, *Масленников А. В.* Определение оптимальных параметров автоматической орбитальной сварки на основе компьютерного моделирования // Свароч. пр-во. – 2005. – №10. – С. 6–13.
2. *Лебедев В. А.* Управление проплавлением при механизированной сварке и наплавке // Там же. – 2011. – № 1. – С. 3–11.
3. *Шолохов М. А.*, *Бузорина Д. С.* Расчет параметров режима наплавки пристеночного валика при многопроходной сварке в защитных газах // Автомат. сварка. – 2013. – № 7. – С. 63–67.
4. *Потапьевский А. Г.* Сварка в защитных газах плавящимся электродом. – М.: Машиностроение, 1974. – 240 с.
5. *Лащенко Г. И.* Способы дуговой сварки стали плавящимся электродом. – Киев: Екотехнологія, 2006. – 384 с.
6. *Жерносеков А. М.* Влияние вылета электрода на параметры шва при импульсно-дуговой сварке сталей // Автомат. сварка. – 2004. – № 8. – С. 52–53.
7. *Березовский Б. М.* Математические модели дуговой сварки: в 3 т. – Т. 2. Математическое моделирование и оптимизация формирования различных типов сварных швов. – Челябинск: Изд-во ЮурГУ, 2003. – 601 с.

Поступила в редакцию 26.02.2014

СВАРКА и РЕЗКА
15-я международная специализированная выставка

7.04 – 10.04 2015 г.
Место проведения: Беларусь, Минск, проспект Победителей, 20/2
Организатор: ЗАО «МинскЭкспо»

Направления экспозиций

- ► 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»**, **«Порошковая металлургия»** и международным специализированным салоном **«Защита от коррозии. Покрытия»**.

Руководитель проекта: Федорова Елена Владимировна
тел.: +375 17 226 98 58, 226 90 83 факс: +375 17 226 98 58, 226 99 36; e-mail: e_fedorova@solo.by

УДК 621.791:629.44

РАСЧЕТ НА УСТАЛОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА

Л. М. ЛОБАНОВ, О. В. МАХНЕНКО, Г. Ю. САПРЫКИНА, А. Д. ПУСТОВОЙ
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Статистика аварийности на железных дорогах Украины и России свидетельствует об увеличении в последние годы случаев, связанных с разрушением литых несущих элементов двухосных трехэлементных тележек грузового вагона. Анализ эксплуатационной надежности литых конструкций боковой рамы и надрессорной балки тележки типа 18-100 показал, что основной причиной отказа является появление усталостных трещин. Целесообразным является поиск альтернативы относительно возможности использования технологии сварки при изготовлении указанных деталей из листового проката с целью повышения их надежности и живучести. Показано, что существующие Нормы на проектирование сварных соединений и узлов вагонов железных дорог существенно завышают реальное сопротивление сварных соединений циклическим нагрузкам по сравнению с Рекомендациями Международного института сварки. Этот недостаток характерен для многих действующих в России и Украине нормативных документов, регламентирующих расчетное определение сопротивления усталости сварных соединений и узлов, что приводит к негативным результатам проектирования по требуемой долговечности сварных элементов. При разработке надежных и технологичных сварных элементов тележки грузовых вагонов необходимо использовать последние достижения в области усталостной прочности сварных соединений. Библиогр. 13, табл. 4.

Ключевые слова: сварные конструкции, сварное соединение, грузовой вагон, трехэлементная тележка, боковая рама, разрушение рамы, сопротивление усталости, амплитуда напряжений

Статистика аварийности на железных дорогах Украины и России свидетельствует об увеличении в последние годы случаев, связанных с разрушением литых несущих элементов двухосных трехэлементных тележек грузового вагона. Анализ эксплуатационной надежности литых конструкций боковой рамы и надрессорной балки тележки типа 18-100 и ее модификаций показал, что основной причиной отказа является появление усталостных трещин [1, 2]. Задача повышения сопротивления усталости и живучести несущих элементов тележки является крайне актуальной.

Перспективным является изготовление указанных деталей из листового проката с использованием технологии сварки с целью повышения их эксплуатационных характеристик надежности при переменных нагрузках [3].

В Западной Европе широко используются сварные конструкции тележек грузовых вагонов. Известны попытки по созданию в Украине и России конструкций цельносварных несущих элементов двухосных трехэлементных тележек грузовых вагонов, взаимозаменяемых с литыми конструкциями [4–8]. Однако ни одна из разработанных сварных конструкций боковой рамы и надрессорной балки не применяется сегодня при регулярных грузоперевозках, поскольку их конструкции в большинстве случаев были плохо оптимизированы с точки зрения сопротивления усталости сварных соединений.

При создании конкурентоспособных сварных конструкций несущих элементов, взаимозаменяемых с литыми элементами тележки типа 18-100, необходимо обеспечить надежность сварного варианта несущих элементов за счет повышения сопротивления усталости и живучести по сравнению с литой конструкцией. Расчет сопротивления усталости разрабатываемых цельносварных конструкций элементов тележки грузового вагона регламентируется действующими в настоящее время на территории Украины и России Нормами для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колей 1520 мм (несамоходных) [9] (далее Нормами) по коэффициентам запаса сопротивления усталости для различных оценочных зон (основного металла и сварных швов) с учетом распределения коэффициента вертикальной динамики по диапазонам скоростей эксплуатации (спектр нагрузки).

К сожалению, действующие Нормы на проектирование сварных соединений и узлов вагонов железных дорог существенно завышают реальное сопротивление сварных соединений циклическим нагрузкам, что обусловливает негативные результаты проектирования по требуемой долговечности.

Значения этих нагрузок зависят от скорости движения вагона, состояния пути и т. п., т. е. это целый спектр циклических нагрузок, элементы которого имеют различную вероятность появления

© Л. М. Лобанов, О. В. Махненко, Г. Ю. Сапрыкина, А. Д. Пустовой, 2014

Таблица 1. Значения $\left(\bar{K}_\sigma\right)_\alpha$ для некоторых типичных элементов несущих конструкций вагонов в соответствии с Нормами [9]

Характеристика элемента и расчетной зоны	Значение $\left(\bar{K}_\sigma\right)_\alpha$
Стандартный образец с полированной поверхностью по ГОСТ 25.502–79	1,0
Полоса прокатная или литая с сечением 20 см^2 без концентраторов напряжений по основному металлу	1,3…1,5
Балки из фасонного проката (двутавр, швеллер, зет, уголок) и штампованные из листового проката по основному металлу полок (вдали от концентраторов напряжений)	1,3…1,5
Балки коробчатые, сваренные из фасонного проката и штамповок продольными стыковыми швами по верхним и нижним полкам без поперечных ребер жесткости и диафрагм, по сварному шву	1,4…1,6
Балки коробчатые, сваренные из фасонного проката продольными угловыми швами без поперечных ребер жесткости и диафрагм, по сварному шву	1,5…1,7
Балки из фасонного проката и штамповок, пояса коробчатых балок из листового проката, сваренные двусторонними прямыми поперечными стыковыми швами, в зоне сварного шва	2,0…2,4
То же, двусторонними косыми под 45° швами	1,8…2,2
То же, двусторонними прямыми, обработанными заподлицо с поверхностью основного металла швами	1,5…1,7
То же, односторонними прямыми швами (с непроваром корня шва или при отсутствии подварки)	4,0…4,8

во времени эксплуатации вагона. Этот вопрос достаточно хорошо изучен и в Нормах имеются соответствующие рекомендации, позволяющие количественно определить силовые характеристики циклического нагружения в эксплуатационных условиях. Недостатком Норм являются рекомендации относительно значений сопротивления несущих сварных соединений циклическим нагрузкам.

В Нормах предел выносливости $\sigma_{a,N}$ (по амплитуде) при условии, что $\sigma_{a,N}$ соответствует вероятности $P = 0,95$ неразрушения, для сварных рам и балок из листового и фасонного проката при полуавтоматической и ручной сварке:

$$\sigma_{a,N} = \frac{\overline{\sigma_{-1}}}{(\bar{K}_\sigma)_\alpha}(1 - z_p v_\sigma), \qquad (1)$$

где $\overline{\sigma_{-1}}$ — среднее (медианное) значение предела выносливости гладкого стандартного образца из материала детали (по ГОСТ 25.502–79) при симметричном цикле изгиба ($R = -1,0$) на базе N циклов; $\left(\bar{K}_\sigma\right)_\alpha$ — среднее значение коэффициента снижения предела выносливости детали по отношению к пределу выносливости стандартного образца; z_p — квантиль распределения $\sigma_{a,N}$ как случайной величины; v_σ — коэффициент вариации предела выносливости при условии, что $\sigma_{a,N}$ соответствует вероятности $P = 0,95$ неразрушения ($(1 - z_p v_\sigma) = 0,88$).

В табл. 1 приведены данные из Норм [9] относительно величин $\left(\bar{K}_\sigma\right)_\alpha$ для типичных элементов несущих конструкций вагонов.

Из зависимости (1) следует, что, поскольку $\bar{\sigma}_{-1}(N)$ зависит от прочности основного металла, увеличиваясь с ростом $\sigma_в$, то у пользователей Норм складывается мнение, что повышение прочности $\sigma_в$ конструкционной стали способствует, согласно (1), увеличению $\sigma_{a,N}$. Между тем достаточно известным фактом, четко сформулированным в Рекомендациях Международного института сварки [10] на основе обработки многочисленных экспериментальных данных, является положение, что для необработанных сварных соединений конструкционных сталей ферритного (перлитного) классов с пределом прочности $\sigma_в$ от 400 до 900 МПа значение $\sigma_{a,N}$ для достаточно представительной выборки испытаний не зависит от величины $\sigma_в$, т. е. для сварной рамы и балки из низкоуглеродистой стали с пределом прочности $\sigma_в = 400$ МПа и высокопрочной низколегированной стали с $\sigma_в = 900$ МПа сопротивление малоцикловой усталости сварных соединений будет примерно одинаковым.

Существенные замечания имеются и относительно рекомендуемых в Нормах значений коэффициентов $\left(\bar{K}_\sigma\right)_\alpha$ для сварных соединений. Так, для продольных сварных соединений балок, изготовленных из листового проката, рекомендуют (см. табл. 1) значения $\left(\bar{K}_\sigma\right)_\alpha$ на уровне 1,5…1,7, т. е. для стали с пределом прочности $\sigma_в = 450$ МПа и $\bar{\sigma}_{-1} = 225$ МПа на базе 10^7 циклов величина $\sigma_{a,N}$ по (1) для сварных соединений равна

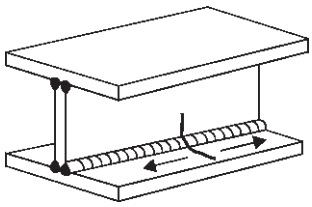
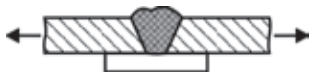
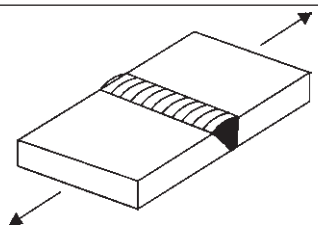
$$\sigma_{a,N} = \frac{225}{1,7} \cdot 0,88 = 117 \text{ МПа}.$$

По Рекомендациям [10] предел выносливости для сварных соединений (по амплитуде) на базе $2 \cdot 10^7$ циклов:

$$\sigma_{a,N} = 0,5\text{FAT}f(R)f(N), \qquad (2)$$

где FAT — предел выносливости (по размаху) на базе $2 \cdot 10^6$ циклов при симметричном цикле, определяется классом сварного соединения (табл. 2); $f(R)$ — функция коэффициента асимметрии цикла нагружения R и уровня остаточных напряжений. При $R = -1,0$ значение $f(R)$ находится в пределах $f(R)$=1,6 при уровне остаточных напряжений менее 0,2 и $f(R) = 1,0$ при более высоких остаточных напряжениях; $f(N)$ — параметр, учитывающий ограниченную усталость. В диапазоне $10^4 < N < 10^8$ циклов $f(N)$ определяется зависимостью

Таблица 2. Фрагменты значений FAT для различных сварных соединений из Рекомендаций МИС [10]

Номер	Эскиз детали	Описание	FAT (для стали)
300	Продольно нагруженные угловые (тавровые) сварные соединения		
321		Продольные сплошные швы с К-образной разделкой, автоматическая сварка без остановок, неразрушающий контроль (напряжения в полке)	125
322		Продольные сплошные швы без К-образной разделки кромок стенки, автоматическая сварка без остановок, неразрушающий контроль (напряжения в полке)	100
323		Продольные сплошные угловые швы, ручная сварка с К-образной разделкой или без нее (напряжения в полке)	90
200	Стыковые соединения (поперечная нагрузка)		
	Двусторонние соединения		
211		Поперечно нагруженный шов, Х- либо V-образная подготовка кромок, усиление снято. 100%-ый неразрушающий контроль	112
212		Поперечный шов, сварка в цеховых условиях в нижнем положении. Неразрушающий контроль, усиление шва <0,1 толщины	90
213		Поперечный шов, не подходящий под условия № 212. Неразрушающий контроль. Примечание: сварной шов с углом усиления шва ≤50°, сварные швы с углом усиления шва >50°.	80
	Односторонние соединения		
214		Поперечный шов с неплавящейся подкладкой, корневая трещина	80
215		Поперечный шов на остающейся подкладке, закрепленной на расстоянии > 10 мм от края пластины < 10 мм от края пластины	71 63
216		Поперечные стыковые сварные швы, сварка с одной стороны, без подложки, полное проплавление Корень контролируется неразрушающими методами без неразрушающего контроля	71 36

$$f(N) = \left(\frac{C}{N}\right)^{\frac{1}{m}}, \qquad (3)$$

где N — долговечность сварного соединения; $C = 2 \cdot 10^6$, $m = 3$ при $10^4 < N < 10^7$ циклов, при $N > 10^7$ циклов можно принять, что амплитуда не меняется.

Таким образом, для продольных сварных соединений балок при FAT = 90…125 МПа, $f(R)$=1,0 и $f(N)$ = 0,585 ($N = 10^7$ циклов) $\sigma_{a,N}$ по работе [10] не превышает $\sigma_{a,N}$ = 26 МПа.

Соответственно допускаемые амплитуды $[\sigma_{a,N}] = \sigma_{a,N} / n$, где n — коэффициент безопасности. По Нормам значения n принимаются для элементов кузовов вагонов всех типов в пределах n = = 1,3…1,8 в зависимости от степени надежности данных по $\sigma_{a,N}$, а для новых конструкций рекомендуется назначать n = 2. По Рекомендациям МИС значение коэффициента безопасности для ответственных конструкций принимается в пределах n = 1,15…1,4. При таком допущении получим для рассматриваемых продольных сварных соединений соответствующие допускаемые амплитуды

$[\sigma_{a,N}]$ = 117/2 = 58,5 МПа и

$$[\sigma_{a,N}] = \frac{26}{1{,}15...1{,}4} = 24\ldots 19 \text{ МПа}.$$

Видно, что допускаемые значения амплитуд номинальных напряжений $[\sigma_{a,N}]$ при регулярном переменном нагружении на базе 10^7 циклов для продольных сварных соединений балок по Нормам на 145…210 % выше таковых по Рекомендациям МИС.

Аналогично продольным сварным соединениям выполнено сравнение допускаемых значений $[\sigma_{a,N}]$ для односторонних и двусторонних стыковых сварных швов, расположенных поперечно по отношению к действию номинальных напряжений. Результаты сравнения, представленные в табл. 3, подтверждают, что действующие Нормы существенно завышают реальное сопротивление сварных соединений циклическим нагрузкам. Такие примеры показывают, что спроектированные в рамках Норм сварные несущие конструкции железнодорожных вагонов могут не иметь достаточную долговечность. Возможно, это одна из причин, почему до сих пор не было разработано

Таблица 3. Сравнение допускаемых значений амплитуд номинальных напряжений $[\sigma_{a,N}]$ при регулярном переменном нагружении на базе 10^7 циклов для различных сварных соединений по Нормам [9] И ГСН [11], а также по Рекомендациям МИС для конструкций из стали с пределом прочности $\sigma_в$ = 450 МПа

Тип сварного соединения	Нормы [9] (при n = 2)		Рекомендации МИС [10]			ГСН [11] (при n = 2)
	$\left(\bar{K}_\sigma\right)_\alpha$	$[\sigma_{a,N}]$, МПа	FAT, МПА	n	$[\sigma_{a,N}]$, МПа	$[\sigma_{a,N}]$, МПа
Продольное угловое	1,5…1,7	58…66	90…125	1,15 1,40	26…32 19…23	23
Поперечное стыковое двустороннее	2,0…2,4	41…50	80…112	1,15 1,40	23…28 17…20	33
Поперечное стыковое одностороннее	4,0…4,8	21…25	36…80	1,15 1,40	17…20 7,5…9,0	16

надежных и технологичных конструкций цельносварных несущих элементов трехэлементной тележки грузового вагона, способных составить конкуренцию литым деталям.

Надо отметить, что имеется положительный опыт применения Рекомендаций МИС при разработке сварных конструкций тележек грузовых вагонов. В 2002 г. ООО «ГСКБВ»(г. Мариуполь) совместно с ГУП НВЦ «Вагоны» (г. Санкт-Петербург) разработали сварную конструкцию трехэлементной тележки модели 18-1711 с осевой нагрузкой 25 тс [12]. Первоначальные опытные образцы надрессорных балок не прошли стендовых испытаний на усталость. С помощью специалистов ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины цельносварная конструкция надрессорной балки была усовершенствована с позиций повышения сопротивления усталости ее сварных соединений [13]. При последующем проведении сокращенных ускоренных испытаний двух опытных образцов надрессорной балки на циклическую нагрузку в первой балке макротрещину длиной 30 мм обнаружили при $2{,}745\cdot10^6$ циклах нагружения, во второй балке после $6\cdot10^6$ циклов нагружений усталостная макротрещина обнаружена не была и испытания прекратили. Таким образом, проведенные испытания показали, что разработанная сварная конструкция надрессорной балки обеспечивает требуемую долговечность, по прочностным и весовым показателям она не уступает литой и может быть рекомендована для проведения полного цикла испытаний.

Одним из действующих в Украине нормативных документов, регламентирующих расчет на сопротивление усталости элементов стальных конструкций, в том числе сварных, являются Государственные строительные нормы (ГСН) [11]. Согласно этому документу, при расчете суммарной повреждаемости стальных конструкций граничное допустимое количество циклов N_i рассчитывается следующим образом:

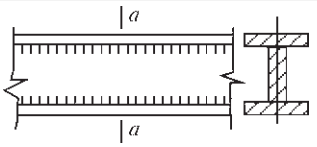
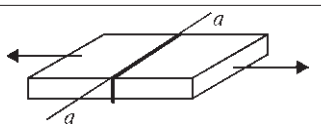
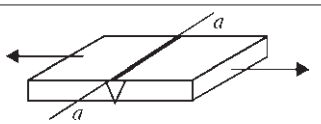
$$N_i = \frac{A_\rho \cdot 10^3}{\ln\left[\dfrac{2\sigma_{a,i}}{(1-\rho_i)R_{\rho i}}\right]} - B_\rho \cdot 10^3, \qquad (4)$$

где $\sigma_{a,i}$ — амплитудные напряжения цикла; ρ — ассиметрия цикла; $R_{\rho i}$ — расчетный предел выносливости рассчитываемого сечения, определяется по формуле

$$R_\rho = \frac{2\sigma_{-1}}{2 - D_n(1+\rho)}\left(1 - 1{,}63\frac{S_{\sigma_{-1}}}{\sigma_{-1}}\right), \qquad (5)$$

где значения параметров σ_{-1}, D_n, $S_{\sigma-1}$ принимаются по таблицам [11]; A_ρ и B_ρ — параметры, которые заданы таблично в документе [11]. При этом по конструктивно-технологическим признакам основной металл, сварные соединения, соединения на высокопрочных болтах элементов и узлов конструк-

Таблица 4. Некоторые группы элементов и соединений при расчете на выносливость [11]

Схема элемента и положение рассчитываемого сечения	Характеристика элемента	Группа элемента
	Сварные сечения двутаврового, таврового и других типов, сваренные непрерывными продольными поясными швами при действии усилия вдоль оси шва	3*а* и 3*б*
	Стыковой необработанный шов при действии нагружения, приложенного перпендикулярно линии шва; при этом элементы, которые стыкуются, одинаковой ширины и толщины	2
	Стыковой шов, выполненный на подкладном листе, при действии нагружения, приложенного перпендикулярно линии шва	4*а* и 4*б*

ций с учетом действия усилий относительно расчетного сечения поделены на группы. В табл. 4 показаны группы элементов разных соединений [11].

Таким образом, согласно [11] для продольных угловых сварных соединений балок при асимметрии цикла ρ = -1 и коэффициентах σ_{-1} = 62 МПа, $S_{\sigma-1}$ = 12 МПа, D_n = 0,89 из выражения (5) предел выносливости на базе 10^7 циклов будет равен 42 МПа.

Допускаемые амплитуды номинальных напряжений $[\sigma_{a,N}]$ равны амплитуде напряжений цикла $\sigma_{a,i}$ при регулярном переменном нагружении на базе 10^7 циклов и коэффициенте асимметрии цикла ρ = -1 и могут быть определены из зависимости (4):

$$\sigma_{a,i} = \exp\left(\frac{A_\rho \cdot 10^3}{10^7 + B_\rho \cdot 10^3}\right) \cdot \frac{(1-\rho_i)\cdot R_\rho}{2} =$$

$$= \exp\left(\frac{525 \cdot 10^3}{10^7 + 470 \cdot 10^3}\right) \cdot \frac{(1+1)\cdot 42}{2} = 45 \text{ (МПа)}.$$

Для более корректного расчета на основе ГСН [11] допускаемых амплитуд номинальных напряжений для боковых рам и надрессорных балок тележек железнодорожных вагонов необходимо полученные по формуле (4) значения поделить на коэффициент запаса n = 2 для таких ответственных конструкций. В табл. 3 добавлены значения допустимых амплитуд номинальных напряжений $[\sigma_{a,N}]$ согласно [11] для различных сварных соединений без послесварочной термообработки в сравнении с данными по действующим Нормам [9] и Рекомендациям МИС [10]. Видно, что расчеты на сопротивление усталости сварных соединений по ГСН [11] дают более консервативные результаты по сравнению с Нормами [9], которые существенно завышают реальное сопротивление сварных соединений циклическим нагрузкам, что может приводить к ошибкам при проектировании новых сварных конструкций несущих элементов тележек грузовых вагонов.

Выводы

1. Разработка цельносварных конструкций несущих элементов тележки грузового вагона, взаимозаменяемых с литыми элементами тележки типа 18-100, может обеспечить повышение их надежности и долговечности, уменьшение массы, точность базового размера боковой рамы в пределах одного типоразмера. Внедрение производства элементов тележки по технологии сварки является не столь затратным по сравнению с технологией литья, что может создать условия насыщения рынка качественными элементами грузовой тележки.

2. Спроектированные в рамках действующих Норм сварные конструкции несущих элементов тележек грузовых железнодорожных вагонов могут не иметь достаточную долговечность, что подтверждает практика.

3. При разработке надежных и технологичных сварных элементов тележки грузовых вагонов необходимо использовать последние достижения в области усталостной прочности сварных соединений. Действующие Нормы расчета и проектирования железнодорожных вагонов в части сварных соединений этих конструкций требуют радикальной переработки с учетом накопленной информации Международным институтом сварки (Рекомендации МИС).

1. *Пранов В. А.* Повышение усталостной долговечности боковой рамы тележки грузового вагона: Дис. … канд. техн. наук. – Екатеринбург: Уральский гос. ун-т путей сообщ., 2012. – 115 с.
2. *Соколов А. М.* О формировании комплексной программы научно-исследовательских работ по проблеме изломов боковых рам тележек грузовых вагонов // Бюл. объединенного Ученого совета ОАО «РЖД». –2012. – № 3. – С. 3–11.
3. *Перспективы* создания сварных конструкций несущих элементов тележки грузового вагона / О. В. Махненко, Г. Ю. Сапрыкина, И. В. Мирзов, А. Д. Пустовой // Автомат. сварка. – 2014. – № 3. – С. 36–42.
4. *Пат. 2275308 RU*. Тележка двухосная для грузовых вагонов / В. А. Волков, А. Д. Чепурной, В. М. Бубнов и др. – Опубл. 27.04.2004; Бюл. № 12.
5. *Свидетельство* на полезную модель RU №37683 U1. Боковая рама тележки грузового вагона / В. С. Хоминич, М. А. Тройников, В. П. Богданов. – Опубл. 10.05.2004.
6. *Пат. 2246416 C2 RU, МПК7: B61F5*. Двухосная тележка грузового вагона / С. Ю. Дейнеко, В. И. Приходько, Н. А. Бондарь и др. – Опубл. 20.06.2004.
7. http://www.nvc-vagon.ru
8. *Пат. 2373091 C2 RU, МПК7:B16F5.* Тележка железнодорожного вагона, боковая рама и надрессорная балка тележки железнодорожного вагона / А. А. Шарапов, Б. Л. Головизнин, Н. А. Малых и др. – Заявл. 04.10.2007; Опубл. 20.11.2009.
9. *Нормы* для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колей 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ–ВНИИЖТ, 1995. – 317 с.
10. *Recommendations* for fatigue design of welded joints and components. – [2006]. – 147 p. – (Intern. Inst. of Welding; Doc XIII – 1965r14–03/XV – 1127r14–03.
11. *ДБН В.2.6-163:2010*. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 202 с.
12. *Пат. 2275308 RU*, МПК7: B61F5/38; B61F5/26; B61F5/12; B61F3/02 / В. А. Волков, А. Д. Чепурной, В. М. Бубнов и др. Тележка двухосная для грузовых вагонов. – Опубл. 27.04.2004; Бюл. № 12.
13. *Проект* сварной надрессорной балки тележек грузовых вагонов / В. И. Махненко, Э. Ф. Гарф, С. Т. Римский и др. // Автомат. сварка. – 2006. – № 4. – С. 3–10.

Поступила в редакцию 02.06.2014

УДК 621.791.3.05:620.17

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ РАВНОПРОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ КРУПНЫХ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ АВТОВАКУУМНОЙ ПАЙКИ РЕЗЬБОВОГО ПРОФИЛЯ

М. А. ПОЛЕЩУК, М. Г. АТРОШЕНКО, А. Л. ПУЗРИН, В. Л. ШЕВЦОВ
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Исследованы механические свойства резьбовых паяных соединений из одно- и разнородных сталей в направлении поперек резьбы, полученных методом автовакуумной пайки. Установлено, что при пайке низколегированных конструкционных сталей предел прочности на отрыв соответствует пределу текучести стали после стандартной термической обработки. В паяных резьбовых соединениях стали 12Х18Н10Т со сталью 40Х сопротивление отрыву значительно превосходит границу текучести нержавеющей стали. Неразъемные соединения, полученные с помощью резьбы с последующей автовакуумной пайкой, можно рекомендовать для прозводства изделий ответственного назначения. Библиогр. 11, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: автовакуумная пайка, резьбовые соединения, разнородные стали, механические свойства

В настоящее время специальными методами высокотемпературной пайки можно получать паяные швы, прочность которых равна или близка прочности материала соединяемых деталей из различных марок сталей. Такой результат достигается при минимально возможной ширине паяного шва с использованием припоев с высокой температурой плавления, так как тугоплавкие припои имеют больший модуль упругости и обеспечивают более высокую прочность паяного соединения [1, 2].

Технологию получения равнопрочных паяных швов можно использовать для создания в крупногабаритных изделиях неразъемных резьбовых соединений, которые должны выдерживать большие усилия, вызванные нагрузками или давлением. В этом случае требуемая прочность изделия вдоль продольной оси обеспечивается выбором резьбы соответствующего профиля, а поперек оси — прочностью паяного соединения. Такие соединения могут быть применены для изготовления фасонных изделий, в том числе из разнородных сталей, при выполнении силовых швов обечаек, составляющих толстостенные сосуды, участков толстостенных трубопроводов энергетических установок вместо электрошлаковой или многопроходной дуговой сварки [3].

Резьбовые паяные соединения используют в различных отраслях, например, в авиастроении, нефтяной, газовой промышленности и др. Однако при ранее применяемых методах пайки припой проникает в резьбовое соединение только на глубину нескольких витков. В связи с этим пайка резьбовых соединений производится только для их уплотнения [4–6].

Увеличить глубину затекания припоя в узкий капиллярный зазор позволяет метод автовакуумной пайки (АВП). Благодаря этому методу можно соединять металлы, в том числе и разнородные, путем заполнения припоем герметичного зазора между деталями. При нагреве стальных деталей до температуры выше 1000 °С металлические поверхности, обращенные в герметичный зазор, самопроизвольно очищаются от оксидных пленок за счет диффузии кислорода с поверхности вглубь металла [7]. Этот процесс продолжается до тех пор, пока весь кислород, находящийся в герметичном зазоре, продиффундирует в объем металла. При этом в зазоре образуется вакуум. Самопроизвольная очистка от оксидных пленок и отсутствие заметного испарения компонентов припоя в герметичном объеме способствует увеличению глубины его проникновения в зазор [8].

Цель настоящей работы — оценка принципиальной возможности получения резьбовых соединений, пропаянных методом АВП. На первом этапе определяли способность припоя затекать в резьбовые соединения на значительную глубину, а на втором этапе проверяли механические свойства паяных соединений, в том числе прочность в направлении поперек резьбы.

Для проведения работы в качестве припоя была выбрана медь, которая является наиболее распространенным припоем для пайки углеродистых и низколегированых сталей. Температура пайки составляла 1150 °С.

Для обеспечения высокой прочности всего изделия температура плавления припоя должна быть выше температуры закалки сталей, исполь-

© М. А. Полещук, М. Г. Атрошенко, А. Л. Пузрин, В. Л. Шевцов, 2014

зуемых для изготовления резьбового соединения, поскольку пайка должна предшествовать термической обработке готового изделия.

Известно, что нагрев стали при пайке значительно выше температуры закалки приводит к росту зерна и потере ею пластичности и вязкости. Специальные исследования показали, что дальнейшая закалка с отпуском стальных деталей, паяных при температуре более 1000 °С, не только полностью восстанавливает прочностные свойства металла, но и повышает показатели пластичности и вязкости по сравнению с такими же показателями металла, который предварительно не нагревался до высокой температуры [9].

Для проведения экспериментов изготавливали специальные образцы двух типов. На одном резьбовое соединение выполняли из стали одной марки (40Х), на другом — из сталей разного класса (40Х и 12Х18Н10Т). Корпуса экспериментальных образцов выполняли из круглого проката диаметром 80 мм, длиной 300 мм. В них высверливали сквозные отверстия диаметром 18 мм. На половине длины этих отверстий нарезали резьбу М18×1, а вторая половина оставалась гладкой.

Экспериментальные корпуса изготавливали из стали 40Х, которая после стандартной термической обработки (закалка в масле с последующим отпуском) обеспечивает механические свойства металла для широкого диапазона размеров поковок на уровне требований категории прочности КП 490 [10], в частности для изготовления деталей ответственного назначения.

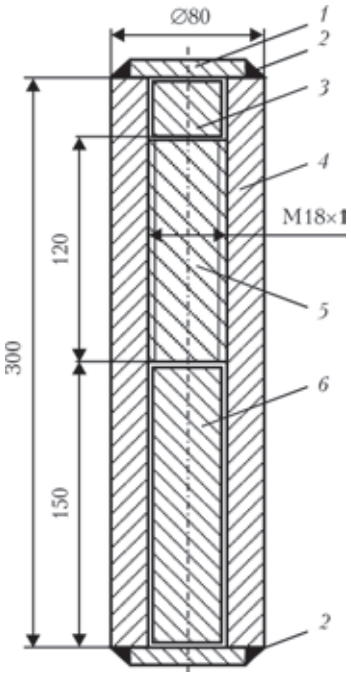


Рис. 1. Схема образца для АВП в сборе: *1* — технологический фланец; *2* — герметизирующие швы; *3* — припой; *4* — корпус; *5* — стержень с резьбой; *6* — гладкий стержень

Для каждого корпуса изготавливали по два стержня. Один с резьбой М18×1, а другой с гладкой поверхностью, причем зазор между ним и корпусом составлял 0,02 мм на сторону.

Один комплект стержней изготовляли из прутка стали 40Х диаметром 20 мм, а другой — из нержавеющий стали 12Х18Н10Т того же диаметра. В качестве припоя использовали пруток меди М1 диаметром 15 мм длиной 30 мм.

Перед сборкой для пайки все детали тщательно отмывали от остатков эмульсии, которую использовали при механической обработке деталей. После сборки образцов для пайки (рис. 1) зазоры с обеих сторон корпуса герметизировали электродуговой сваркой.

Пайку проводили в печи с воздушной атмосферой, корпуса в печи размещали вертикально припоем вверх.

Термический цикл пайки был следующим: нагрев до температуры 1150 °С, выдержка 1 ч, охлаждение с печью до комнатной температуры. После пайки корпуса подвергли закалке с отпуском по стандартному режиму для стали 40Х. Затем по центру корпусов вдоль продольной оси вырезали темплеты толщиной 14 мм. Визуальный осмотр этих шлифованных темплетов показал, что в однородном образце со стержнем из стали 40Х медный припой проник не только через резьбу, но и на всю длину гладкого паяльного зазора. С помощью лупы с десятикратным увеличением непропаев в образце обнаружено не было (рис. 2).

В то же время в комбинированном образце припой лишь частично заполнил резьбу, а в гладкий зазор совсем не проник. Причиной этого мо-

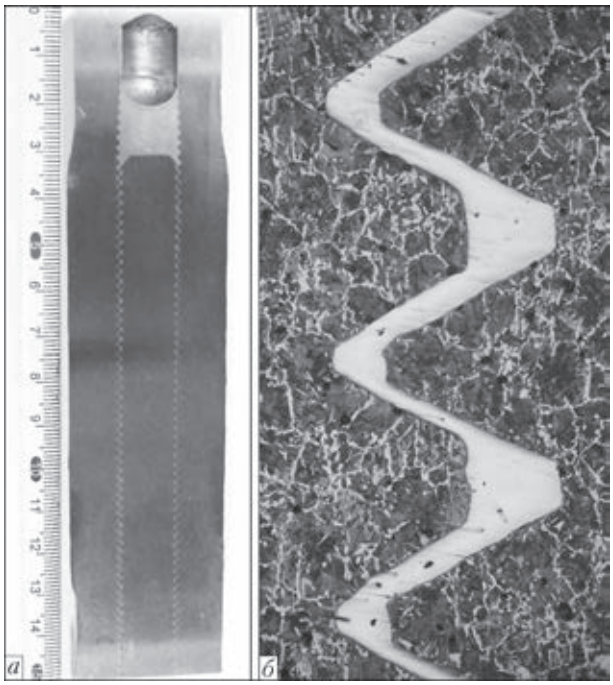


Рис. 2. Макрошлиф темплета (*а*) и микрошлиф резьбовой части паяного образца (*б*) из стали 40

Результаты механических испытаний основного металла после нагрева для пайки и последующей термической обработки

Место вырезки образцов	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
Корпус сталь 40Х	540,9…581,8 561,4	771,8…778,4 775,1	17,5…19,1 18,3	62,4…65,4 63,9
Стержень сталь 40Х	552,6…561,4 557,0	742,2…763,1 752,7	16,2…18,2 17,2	60,3…61,2 60,8
Стержень сталь12Х18Н10Т	207,7…215,0 211,4	555,0…555,0 555,0	61,3…61,7 61,5	69,5…69,8 69,7

Примечание. 1. В числителе приведены минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние значения по трем образцам. 2. Требования ГОСТ к КП ≥ 490.

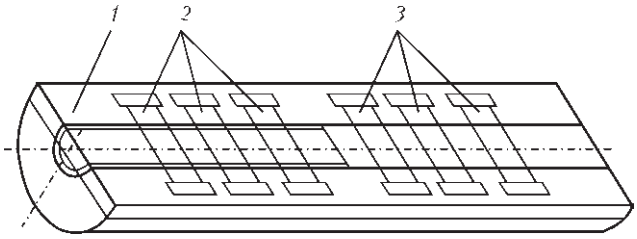


Рис. 3. Схема вырезки образцов для механических испытаний: *1* — темплет; *2*, *3* — образцы с резьбой и без соответственно

жет быть различие в тепловом расширении конструкционных и нержавеющих сталей. Так, на длине 20 мм разница в тепловом расширении таких сталей составляет 0,14 мм, а фактический зазор до нагрева у гладких образцов — 0,04 мм. Однако это не может быть единственной причиной отсутствия пайки, поскольку медь успешно применяют даже для пайки деталей из углеродистых сталей, предварительно собранных прессовой посадкой [11].

Причиной также препятствующей проникновению меди в узкий зазор комбинированного образца может быть растворение в ней легирующих компонентов нержавеющей стали в первую очередь хрома и никеля, что повышает температуру плавления легированной меди до температуры пайки.

Образцы для механических испытаний паяных соединений изготавливали из заготовок, вырезанных поперек продольных темплетов (рис. 3).

Испытания проводили путем растяжения образцов с рабочей частью диаметром 8 мм. При этом на ней находились по два паяных соединения, расположенных на растоянии 18 мм друг от друга. При испытаниях на растяжение разрушение проходило по одному соединению.

Так, у паяного соединения из однородной стали 40Х с гладкой поверхностью сопротивление на отрыв составляло 485,0…500,1 МПа, с резьбой — 412,6…458,4, а у образцов из разнородной стали 40Х + 12Х12Н10Т с резьбой — 294,7…323,7 МПа.

Визуальный осмотр образцов после испытаний показал, что паяное соединение поперек продольной оси разрушается без пластической деформации. Так как при оценке прочности деталей в качестве расчетного значения принимают значение предела текучести материала, из которого изготавливается данная деталь, то результаты, приведенные выше, необходимо сравнивать с пределом текучести основного металла. Результаты механических испытаний на растяжение образцов из основного металла стали 40Х и нержавеющий стали 12Х18Н10Т представлены в таблице.

Сравнение результатов сопротивления на отрыв паяных соединений с пределом текучести основного металла показало, что сопротивление на отрыв паяного соединения стали 40Х с такой же сталью при гладких поверхностях составляет 485…500 МПа. Это соответствует требованиям стандарта для КП 490, но несколько ниже предела текучести реальных образцов стали 40Х после термической обработки (540…580 МПа), полученных в направлении прокатки. Известно, что свойства катаного металла в поперечном направлении будут ниже. Следовательно, полученные нами результаты механических испытаний гладких образцов на отрыв можно считать хорошими.

Сопротивление на отрыв паяного соединения с резьбой из однородной стали (40Х) в направлении поперек ее оси оказалось несколько ниже (413…458 МПа).

Меньшее значение прочности на отрыв поперек резьбового соединения по сравнению с гладким может быть объяснено большей шириной зазора между деталями резьбы.

При испытании паяных образцов нержавеющей стали 12Х18Н10Т со сталью 40Х с резьбой прочность соединений (295…308 МПа) была заметно выше предела текучести нержавеющий стали (208…215 МПа).

Таким образом, неразъемные соединения, полученные с помощью резьбы с последующей АВП, можно применять для производства изделий ответственного назначения. Медь в качестве припоя может быть эффективно использована для получения такого типа соединений из конструкционных сталей, а для комбинированных (нержавеющая – конструкционная стали) лишь для резьбовых соединений относительно небольшой глубины.

1. *Хорунов В. Ф.* Основы пайки тонкостенных конструкций из высоколегированных сталей. – Киев: Наук. думка, 2008. – 238 с.
2. *Справочник* по пайке / Под ред. С. Н. Лоцмонова. – М.: Машиностроение, 1975. – 408 с.
3. *Серебряник И. П.* Автовакуумная некапиллярная конструкционная пайка. – Киев: Альфа Реклама, 2011. – 62 с.
4. *Кузнецов В. А.* Определение величины давления газа при пайке с принудительным заполнением зазора расплавленным припоем // Материалы семинара «Современное состояние и перспективы развития высокотемпературной пайки». – М.: Знание, 2004. – 35 с.
5. *Карабанов В. В.*, *Бохаров И. О.* Решение проблемы герметичности и надежности обсадных колонн // Нефт. хозво. – 2012. – № 1. – С. 42–45.
6. *Пат. 2193477 2002 кл 23К 1/00 РФ.* Способ пайки тонкостенных труб при телескопическом соединении / В. И. Муравьев, Б. Н. Марьин, Л. В. Чернышов. – Опубл. 27.11.2002; Бюл. № 33.
7. *О растворении* газов воздуха в твердом металле в процессе самопроизвольной очистки его поверхности / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Л. Г. Пузрин и др. // Докл. АН СССР. – 1968. – **181**, № 1. – С. 70.
8. *Пузрин Л. Г.*, *Бойко Г. А.*, *Атрошенко М. Г.* Автовакуумная высокотемпературная пайка. – Киев: Знание, 1975. – 18 с.
9. *Влияние* высокотемпературного нагрева на свойства сталей при пайке композиционных корпусов фланцевых задвижек высокого давления / Г. М. Григоренко, А. Л. Пузрин, М. Г. Атрошенко, М. А. Полещук, В. Л. Шевцов // Совр. электрометаллургия. – 2012. – № 2. – С. 45–50.
10. *ГОСТ 8 479–70.* Поковки из конструкционной углеродистой и легированной стали. – Введ. 01.01.71.
11. *Брукер Х. Р.*, *Битсон Е. В.* Пайка в промышленности. – М.: Оборонгиз, 1957.– 296 с.

Поступила в редакцию 02.04.2014

IX конференция
«Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы»

28–29 ноября 2014 г. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона

Организаторы:

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины
НТК ИЭС
Международная ассоциация «Сварка»
Киевский городской центр электрохирургии

Архивы сборников трудов предыдущих семинаров за 2009-2013 гг. на http://weldinglivetissues.com/rus/seminars.

По вопросам участия в конференции просьба обращаться:
тел.: (38044) 200-81-45, 200-81-08
E-mail: tomik@mac.relc.com

УДК 621.791:621.38

СВАРНОПАЯНЫЕ ТРУБНЫЕ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ И СОСУДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ*

А. А. ПИСЬМЕННЫЙ, Р. С. ГУБАТЮК, А. С. ПРОКОФЬЕВ, А. Ф. МУЖИЧЕНКО, А. С. ШИНКАРЕНКО
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

С целью снижения массы конструкций трубопроводов, а также сосудов, работающих под давлением, представляется перспективным использование двухслойных оболочек для образования общей стенки. Произведен расчет трех однотипных конструкций сосудов, работающих под давлением, у которых общая стенка выполнена как двухслойная оболочка. При этом проанализированы применяемые материалы и их сочетание для изготовления внутренней и наружной оболочки общей двухслойной стенки трех типов сосудов, работающих под давлением с учетом их прочностных показателей. Установлено, что использование в двухслойной конструкции одной и той же марки стали не приводит к эффективному нагружению общей стенки. Применение при изготовлении наружной оболочки материала с более высокими прочностными свойствами приводит к эффективному нагружению их общей стенки, уменьшению ее толщины и соответственно росту ее внутренних напряжений, т. е. рациональному нагружению. Рассмотрены вопросы использования для изготовления наружной оболочки сетеподобного материала, а также применение высокочастотной сваркопайки давлением при изготовлении перспективных трубных заготовок, предназначенных для трубопроводов и сосудов высокого давления. Библиогр. 12, табл. 7, рис. 8.

Ключевые слова: прессовая сваркопайка, трубные заготовки, тонкостенная оболочка, напряжения, расчетная модель

Корпуса сосудов, работающих под давлением, как правило, имеют цилиндрическую форму. При их изготовлении используют трубы соответствующих типоразмеров или корпуса изготавливают из трубных заготовок, в том числе и тонкостенных, предназначенных для производства прямо- или спиральношовных труб с непрерывным швом. Трубы со спиральношовным швом имеют ряд преимуществ. Благодаря тому, что шов выполняют под углом к оси цилиндра, обеспечивается частичная разгрузка его от радиальных напряжений, возникающих в стенке корпуса сосуда, который работает под давлением [1].

Рациональная эксплуатация сосуда, работающего под давлением, может быть достигнута при обеспечении равномерного распределения напряжений в его стенке. При этом образующиеся напряжения в цилиндрической стенке корпуса не должны превышать допустимых значений для материала, используемого в производстве сосуда. Очевидно, что применение конструкционных материалов с повышенными прочностными свойствами приводит к снижению как толщины цилиндрической стенки корпуса сосудов, работающих под давлением, так и массы такой промышленной продукции.

Рациональное использование материала и достижение снижения толщины стенки цилиндрических корпусов сосудов возможно также, если сделать их составными, например, изготовить двух и более оболочковую стенку корпуса. Известно, что две коаксиальные оболочки, посаженные с натяжением, обеспечивают более рациональное распределение образующихся в их общей стенке напряжений [2].

Возникающие в результате действия внутреннего давления в цилиндрической стенке корпуса сосуда напряжения, действующие в радиальном и осевом направлении, не являются однородными. Установлено [2, 3], что напряжения в радиальном направлении в два раза превышают напряжения, действующие в осевом направлении. Эти особенности необходимо учитывать при выборе конструкционного материала с соответствующими прочностными характеристиками и толщины стенки.

Известен опыт изготовления [4, 5] металлокомпозитных баллонов для компримированных газов, конструкция корпуса которых по сути является двухоболочковой. При этом наружная силовая оболочка выполняется из композитного материала — синтетического леера или роувинга, намотанных на внутреннюю оболочку под натяжением.

В настоящей работе рассмотрены предпосылки применения технологии высокочастотной сваркопайки при изготовлении предлагаемой перспективной, на наш взгляд, конструкции сосудов для работы под давлением. При этом предполагается обеспечение рационального распределения напряжений в стенках сосуда, его улучшен-

* Работа выполнена под руководством А. С. Письменного и О. В. Махненко.

© А. А. Письменный, Р. С. Губатюк, А. С. Прокофьев, А. Ф. Мужиченко, А. С. Шинкаренко, 2014

ные массовые и прочностные показатели, а также технологические преимущества в изготовлении. Использована расчетно-экспериментальная модель сосуда. Такой моделью конструкции может быть модель баллона, у которого цилиндрическая часть выполнена в виде двух коаксиальных оболочек, посаженных с натяжением. При этом внутренняя цилиндрическая оболочка может выполнять функцию обеспечения герметичности, стойкости при контакте с рабочей средой, а также иметь хорошую свариваемость с донными частями баллона для получения прочных, герметичных и стойких к коррозии сварных швов.

Наружная оболочка цилиндрической части корпуса может быть изготовлена из материала, прочностные показатели которого выше по сравнению с внутренней оболочкой.

Такая двухоболочковая цилиндрическая часть корпуса должна обладать рядом преимуществ, а именно: обеспечивать более рациональное распределение образующихся в их общей стенке напряжений, а также снижать общую массу всего баллона за счет уменьшения толщины стенки наружной оболочки в случае ее изготовления из более прочного материала.

В работе рассмотрены три однотипные конструкции образцов сосудов, работающих под давлением (баллонов), у которых стенка цилиндрического корпуса представляет собой двухслойную оболочку. Внутренняя тонкостенная (отношение диаметра к толщине стенки 10 и более) оболочка цилиндрического корпуса во всех моделях конструкций имеет одинаковые геометрические размеры. В расчетных моделях наружная оболочка посажена на внутреннюю оболочку с минимальным натяжением, близким к нулю, при этом ее внутренний диаметр совпадает с наружным диаметром внутренней оболочки, а ее наружный диаметр рассчитывается для каждого применяемого материала.

Определены образующиеся напряжения во внутренней и наружной оболочках, а также суммарные напряжения в общей стенке двухоболочечного баллона. При этом соблюдались следующие условия:

– расчеты производили с учетом одного и того же внутреннего эксплуатационного давления для всех трех типов баллонов $p_{\text{экс. раб}} = 20$ МПа и одних и тех же геометрических размерах стенки внутренней оболочки ($d_{\text{вн 1}} = 147{,}5$ мм; $d_{\text{нар 1}} = 152$ мм, толщина стенки внутренней оболочки постоянная $S_1 = 2{,}25$ мм) для всех трех типов баллонов;

– внутренний диаметр наружной оболочки соответствует наружному диаметру стенки внутренней оболочки и для всех трех типов баллонов является постоянным ($d_{\text{нар 1}} = d_{\text{вн 2}} = 152$ мм);

– размеры стенки наружной оболочки ($d_{\text{нар 2}}$, S_2) рассчитывали исходя из образующихся напряжений в наружной оболочке и прочностных показателей используемой марки стали;

– в конструкции баллона из расчетных толщин общей стенки баллона $S_{\text{бал}}$ применяли ее минимальное значение;

– напряжения в отдельных оболочках, а также суммарные напряжения в общей стенке баллона определеляли без учета натяжения;

– расчет производили в соответствии с действующими нормативными документами и положениями работы [6], при этом эксплуатационное рабочее давление модели баллона рассчитывали, исходя из коэффициента запаса прочности $n = 2{,}7$, по максимально допустимым значениям образующихся напряжений в металле $[\sigma]_{\text{раб}} = \sigma_0/n$, где σ_0 — критически опасное напряжение. В зависимости от марки стали для мягких материалов $\sigma_0 = \sigma_т$, для хрупких материалов $\sigma_0 = \sigma_в$.

С целью оптимизации конструкции модели использовали сочетание (комбинацию) разных марок сталей для внутренней и наружной оболочки. Соответственно в расчетные модели (трех однотипных конструкций двухоболочковых баллонов) закладывались прочностные показатели используемых марок сталей для каждой оболочки.

Прочность донных частей не рассчитывали, однако толщина стенки донышка для данной конструкции согласно техническим свойствам металла не может быть меньше толщины стенки корпуса всего баллона [6].

В расчетных моделях прочность сварных швов принимали равной прочности основного металла. Для данной расчетной математической модели с учетом применения разных марок материалов обеспечение прочности сварных швов достигается путем увеличения суммарной толщины стенки цилиндрического корпуса на значение прибавки толщины стенки, которая во всех случаях должна быть не менее 0,5 мм [6].

Технологические особенности выполнения продольных, спиральношовных и кольцевых сварных швов в расчетных моделях в данной работе не рассматривали. По результатам проведенных расчетов учитывалось влияние как образовавшихся напряжений во внутренней и внешней оболочках, так и технологических факторов (разных марок материалов и других факторов) при проектировании реальных моделей конструкций трубных заготовок и образцов сосудов, работающих под давлением.

На рис. 1 представлен эскиз конструкции двухслойного баллона, состоящего из внутренней S_1 и наружной S_2 оболочек, а в табл. 1 — сочетание

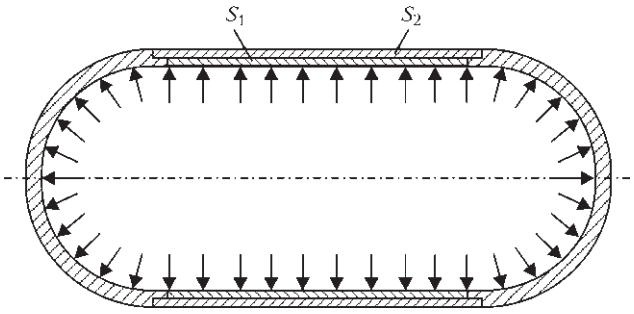


Рис. 1. Эскиз двухслойного баллона

материалов и соотношение толщин стенок оболочки для расчетных моделей.

Результаты расчетов однотипных конструкций образцов № 1–3 баллонов приведены в табл. 2.

Для каждого образца определены рабочие напряжения, образующиеся в металле во внутренней $\sigma_{раб\ 1}$, наружной $\sigma_{раб\ 2}$ и в общей стенке баллона $\sigma_{раб\ бал}$ при поданном в баллон эксплуатационном рабочем давлении $p_{экс.\ раб} = 20$ МПа.

Расчетные значения образующихся рабочих напряжений $\sigma_{раб}$, напряжений во внутренней, наружной оболочках и общей стенке баллона для каждого образца, от поданного во внутрь баллона эксплуатационного рабочего давления $p_{экс.\ раб}$, приведены в табл. 3.

Таблица 1. Сочетание материалов и соотношение толщин стенок оболочки в трех моделях

Номер образца (модели)	Сочетание S_1+S_2 сталей	S_1/S_2, мм
1	Ст.08кп + высокопрочная сталь	2,25/4,11
2	Сталь 20 + сталь 20	2,25/13,29
3	Ст.08кп + Ст.08кп	2,25/20,54

Исходя из допустимых значений образующихся напряжений в металле (с учетом марки стали), определяемых как $[\sigma]_{доп} = \sigma_0/n$, рассчитаны значения образующихся максимально допустимых рабочих давлений во внутренней $p_{доп\ 1}$ и наружной $p_{доп\ 2}$ оболочках, а также $p_{доп.\ бал}$ в общей стенке баллона и установлено их процентное отношение (табл. 4, 5).

Таким образом, для достижения допустимых напряжений в металле стенки каждой оболочки необходимо во внутрь баллона каждого образца подавать приблизительно одинаковые давления, значения которых многократно превышают номинальное внутреннее эксплуатационное давление.

Из результатов расчета видно, что допустимое давление в баллоне каждого образца равно сум-

Таблица 2. Расчетные значения толщины стенки наружной оболочки и общей стенки баллона

Параметр	Образец №1	Образец № 2	Образец № 3
Допустимые напряжения в металле стенки, МПа внутренняя оболочка $[\sigma_1]$ наружная оболочка $[\sigma_2]$	 74,0 370,4	 114,3 114,3	 74,0 74,0
Толщина стенки внутренней оболочки S_1, мм	2,25	2,25	2,25
Диаметр, мм внутренняя оболочка $d_{вн\ 1}$ средняя $d_{ср\ 1}$ наружная $d_{нар.\ 1}$	 147,5 149,75 152	 147,5 149,75 152	 147,5 149,75 152
Толщина стенки наружной оболочки S_2, мм	4,11	13,29	20,54
Диаметр, мм внутренний $d_{вн\ 1}$ средний $d_{ср\ 1}$ наружный $d_{нар\ 1}$	 152 156,11 160,22	 152 165,29 178,58	 152 172,54 193,08
Толщина общей стенки баллона $S_{бал} = S_1 + S_2$, мм	6,36	15,54	22,79
Диаметр баллона, мм внутренний $d_{вн\ 1}$ средний $d_{ср\ 1}$ наружный $d_{нар.\ 1}$	 147,5 153,86 160,22	 147,5 163,04 178,58	 147,5 170,29 193,08
Отношение $d_{нар.\ бал}/S_{бал}$	160,22/6,36 = 25,19	178,58/15,54 = 11,49	193,08/22,79 = 8,472
Отношение S_2/S_1	1,83	5,91	9,1

Таблица 3. Сравнение расчетных напряжений, образовавшихся в металле стенки внутренней $\sigma_{раб\ 1}$, наружной $\sigma_{раб\ 2}$ оболочек и общей стенке баллона $\sigma_{раб.\ бал}$ с допустимыми напряжениями $[\sigma]$ от поданного в баллон эксплуатационного рабочего давления $p_{экс.\ раб} = 20$ МПа

Параметр	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
Допустимые напряжения $[\sigma_1]$, $[\sigma_2]$, МПа	$[\sigma_1] = 74$, $[\sigma_2] = 370,4$	$[\sigma_1] = 114,3$, $[\sigma_2] = 114,3$	$[\sigma_1] = 74$, $[\sigma_2] = 74$
Расчетные напряжения, МПа внутренняя оболочка $\sigma_{раб\ 1}$ наружная оболочка $\sigma_{раб\ 2}$ в общей стенке баллона, МПа $\sigma_{раб.\ бал} < \frac{\sigma_{раб\ 1} + \sigma_{раб\ 2}}{2}$	 6,7 3,8 2,4 < 5,2	 6,7 1,2 1,049 < 3,95	 6,7 0,84 0,747 < 3,77

Таблица 4. Значения допустимых напряжений в металле внутренней $[\sigma_1]$, наружной $[\sigma_2]$ оболочек и общей стенки баллона $[\sigma_{доп.\ бал}]$, МПа

Параметр	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
Допустимые напряжения, МПа стенка внутренней оболочки $[\sigma_1]$ стенка наружной оболочки $[\sigma_2]$	 74 370,4	114,3 114,3	74 74
Сравнение образующихся расчетных напряжений $[\sigma_{доп.\ бал}]$ в стенке баллона, МПа	$[\sigma_{доп.\ бал}] > \frac{[\sigma_1]+[\sigma_2]}{2}$ 262,8 > 222,2	$[\sigma_{доп.\ бал}] = \frac{[\sigma_1]+[\sigma_2]}{2}$ 114,3 = 114,3	$[\sigma_{доп.\ бал}] = \frac{[\sigma_1]+[\sigma_2]}{2}$ 74 = 74

Таблица 5. Расчетные значения образующихся допустимых давлений $p_{доп}$ внутри оболочек и баллона, сравнение их с эксплуатационным рабочим давлением $p_{экс.\ раб}$ = 20 МПа при достижении металлом допустимых напряжений $[\sigma]$

Параметр	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
Допустимые давления, МПа внутренняя оболочка $p_{доп\ 1}$ наружная оболочка $p_{доп\ 2}$ общая стенка баллона $p_{доп.\ бал}$	 222,37 (10,23 %) 1950,4 (89,77 %) 2172,7 (100,00 %)	 343,56 (15,76 %) 1838,52 (84,24 %) 2179,45 (100 %)	 222,37 (11,23 %) 1761,9 (88,94 %) 1980,7 (100 %)
Отношение $p_{доп\ 1}/p_{раб.\ экс}$	11,12	17,178	11,12
Отношение $p_{доп\ 2}/p_{раб.\ экс}$	97,52	91,92	88,1
Отношение $p_{доп.\ бал}/p_{раб.\ экс}$	108,63	108,97	99,035

ме допустимых давлений внутренней и внешней оболочек. При этом сумма допустимых давлений в образцах № 1 и 2 практически совпадает, а снижение суммарного допустимого давления для образца № 3 обусловлено тем, что он переходит в разряд баллонов с толстой стенкой (отношение наружного диаметра к толщине стенки в образце № 3 определяется как $d_{нар.\ бал}/S_{бал}$ = 193,08/22,79 = = 8,472 < 10 (см. табл. 2)), что требует дополнительной корректировки произведенных расчетов. По результатам табл. 5 построен рис. 2.

С учетом марки материала и определяемых как предельное значение образующихся напряжений в металле σ_0 рассчитаны значения образующихся предельных давлений во внутренней $p_{пред\ 1}$ и в наружной $p_{пред\ 2}$ оболочках соответсвенно и в общей стенке баллона $p_{пред.\ бал}$ и установлено их процентное отношение (табл. 6, 7).

При этом металл внутренней, наружной оболочек и общей стенки баллона достигает значений (опасных) напряжений σ_0. По результатам табл. 7 построен рис. 3.

В двухслойной конструкции баллона представляется перспективным в качестве наружной оболочки использовать оболочку, которая представляет собой листовой материал, имеющий сетеподобную структуру определенной толщины, в узлах которой пересекаются три и более стержня, при этом усилия распределяются как в образованном сварном соединении по площади между внутренней и наружной оболочками, так и в стержнях наружной оболочки.

Известны несплошные листовые материалы «Сетка просечная вытяжная» (разных типов)» (ТУ 14-4-1789–96), а также «Рукав сетчастый» (ТУ 26-02-354–85). Изготовление двухслойного конструкционного листового материала, у которого один слой сплошной листовой материал соединен с другим слоем — несплошным листовым материалом по всей площади прилегания методом сварки — может быть перспективными при создании трубных заготовок и корпусов баллонов (рис. 4).

Изготовление такой наружной оболочки из марок стали, имеющих повышенную прочность, позволяет:

Таблица 6. Значения опасных напряжений в металле внутренней σ_{01}, наружной σ_{02} оболочек и общей стенке баллона $\sigma_{0\ бал}$, МПа

Параметр	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
Внутренняя оболочка $\sigma_{0,1}$ Наружная оболочка $\sigma_{0,2}$	200 1000	308,7 308,7	200 200
Сравнение расчетных образующихся предельных напряжений в общей стенке баллона $\sigma_{0\ бал}$, МПа	$\sigma_{0\ бал} > \frac{\sigma_{0,1}+\sigma_{0,2}}{2}$ 709, 6 > 600	$\sigma_{0\ бал} = \frac{\sigma_{0,1}+\sigma_{0,2}}{2}$ 308,6 = 308,7	$\sigma_{0\ бал} = \frac{\sigma_{0,1}+\sigma_{0,2}}{2}$ 199,99 = 200

Таблица 7. Расчетные значения образующихся предельных давлений $p_{пред}$ внутри баллона, МПа

Параметр	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
Внутренняя оболочка $p_{пред\ 1}$ Наружная оболочка $p_{пред\ 2}$ Суммарная стенка баллона $p_{пред.\ бал}$	601 (10,24 %) 5265,5 (89,75 %) 5866,5 (100 %)	927,6 (15,763 %) 4964,0 (84,378 %) 5884,68 (100 %)	601 (11,23 %) 4761,4 (88,94 %) 5353,2 (100 %)

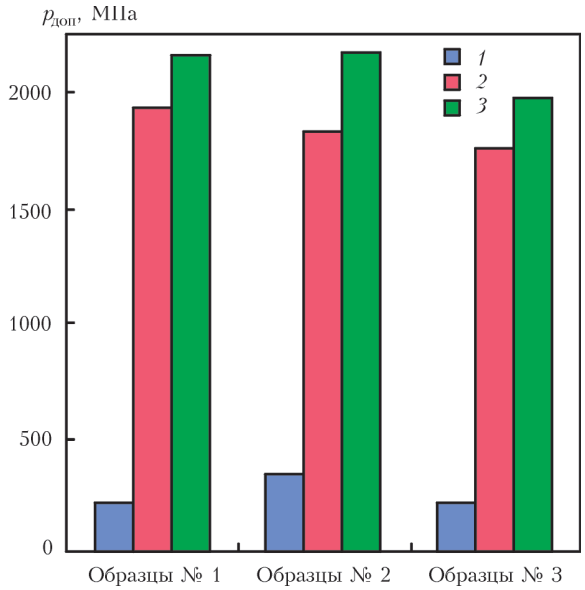


Рис. 2. Значения образующихся допустимых давлений $p_{доп}$ во внутренней (*1*), наружной (*2*) и общей (*3*) стенке баллона соответственно у образцов № 1–3

– равномерно распределить нагружение в «стержнях» оболочки и фрагментарно снизить ее толщину;

– добиться снижения массы оболочки на величину массы объема металла ячеек сетеподобного листового материала.

Известно, что возникающие в цилиндрической оболочке под действием внутреннего давления радиальные напряжения (кольцевые) в два раза больше осевых напряжений (напряжений по образующей цилиндра) [1–3]. Расположение пересекающихся стержней под углом в 60° при определенном ее наложении на цилиндрическую поверхность (внутреннюю оболочку) позволяет создать равномерное распределение как в радиальном, так и в осевом направлении в стержнях такой оболочки от действия внутреннего давления, при этом плотность распределения стержней по поверхности в радиальном на-

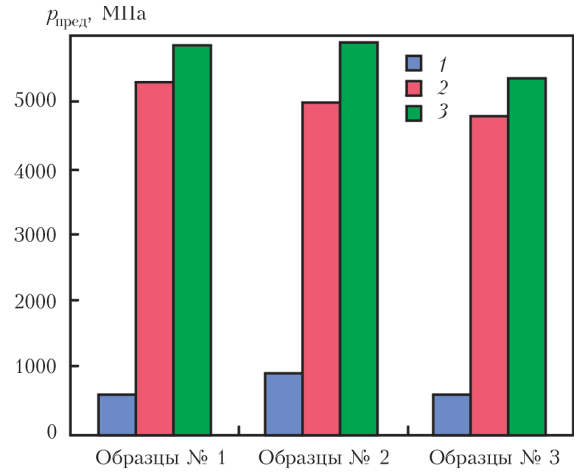


Рис. 3. Значения образующихся предельных давлений $p_{пред}$ во внутренней (*1*), наружной (*2*) и общей (*3*) стенке баллона соответственно у образцов № 1–3

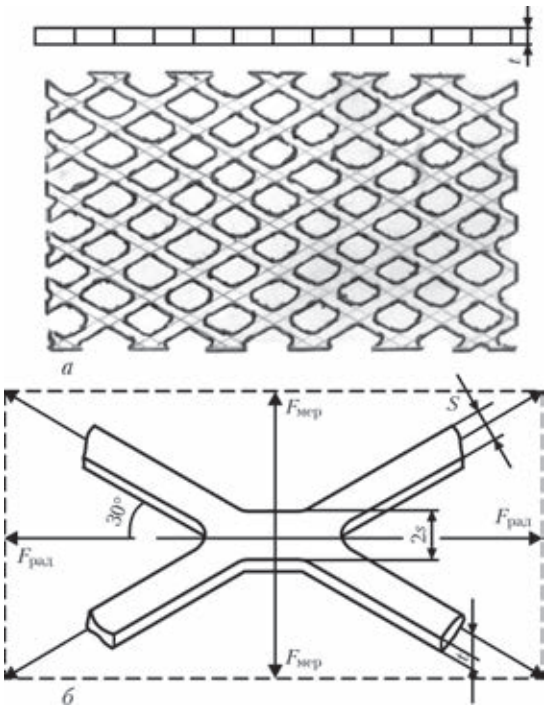


Рис. 4. Листовой материал с сетеподобной структурой (*а*) и узел, в котором пересекаются четыре стержня (*б*)

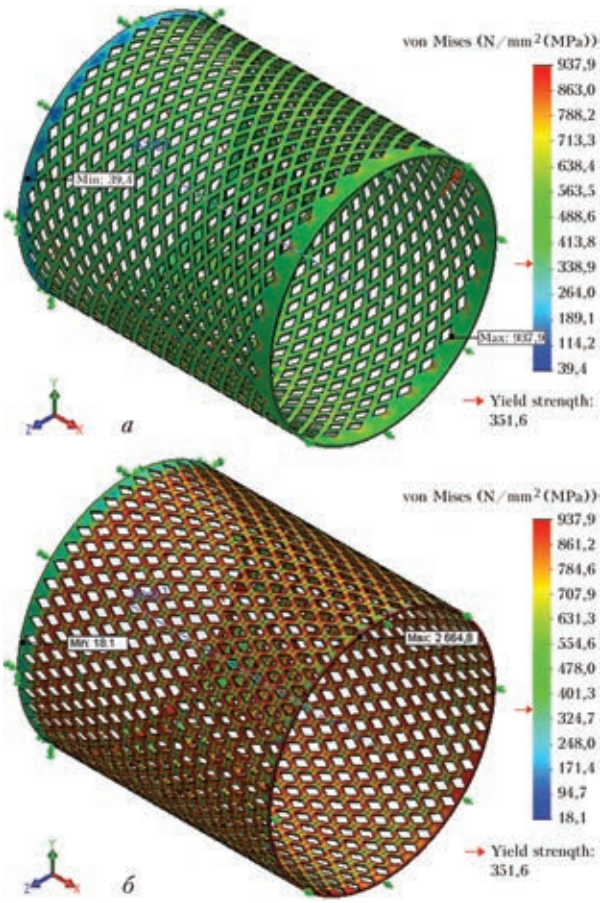


Рис. 5. Уровень и распределение образующихся от действия внутреннего давления напряжений (внутренняя цилиндрическая оболочка в целях наглядности не показана): *а* — наружная оболочка, изготовленная из листового материала с сетеподобной структурой, определенной толщины в узлах, которой пересекаются четыре стержня; *б* — наружная оболочка, повернутая на 90°

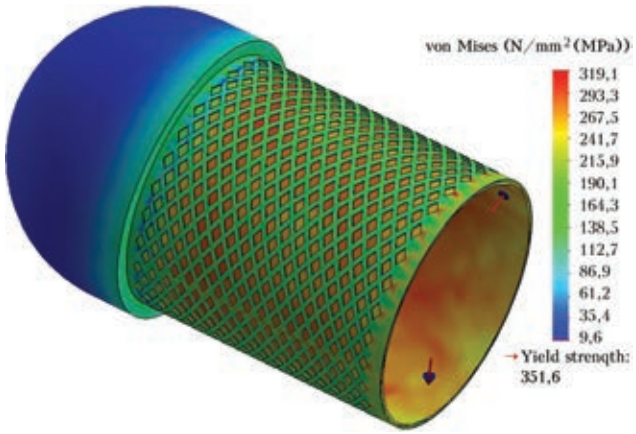


Рис. 6. Моделирование нагружения внутренним давлением модели двухслойного баллона

правлении будет в два раза выше плотности по осевому направлению (рис. 5).

Компьютерное моделирование нагружения внутренним давлением модели двухслойного баллона, у которого наружная оболочка выполнена из листового материала с сетеподобной структурой определенной толщины, подтверждает целесообразность применения данного материала (рис. 6). Образование очагов концентраторов напряжений в узлах сетеподобного материала можно избежать путем приближения профиля ячейки сетки в виде ромба к профилю вытянутого эллипса (рис. 7).

Важным фактором, влияющим на применение той или иной сетеподобной наружной оболочки, является определение размеров ячейки сетки. В наружной оболочке они зависят и определяются исходя из толщины материала, используемого для изготовления внутренней оболочки и его прочностных характеристик. Так, для расчетных моделей — трех однотипных конструкций двухслойного баллона — максимальный просвет ячейки наружной оболочки составляет 10 мм при изготовлении внутренней оболочки из стали Ст. 08кп, а при изготовлении внутренней оболочки из стали 20 — 15 мм,

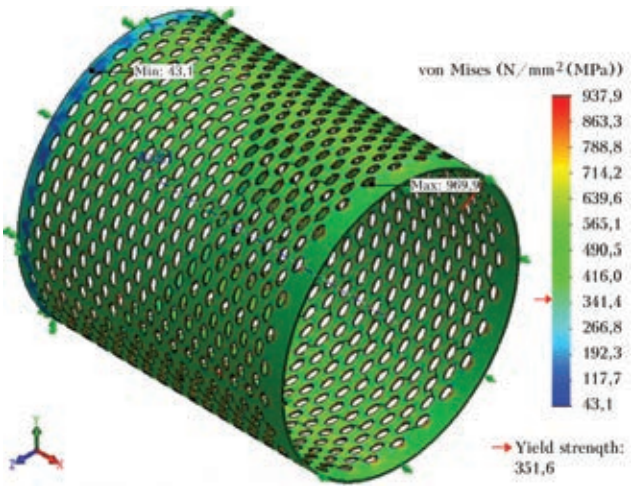


Рис. 7. Наружная оболочка, профиль ячейки сетки которой приближается к профилю вытянутого эллипса

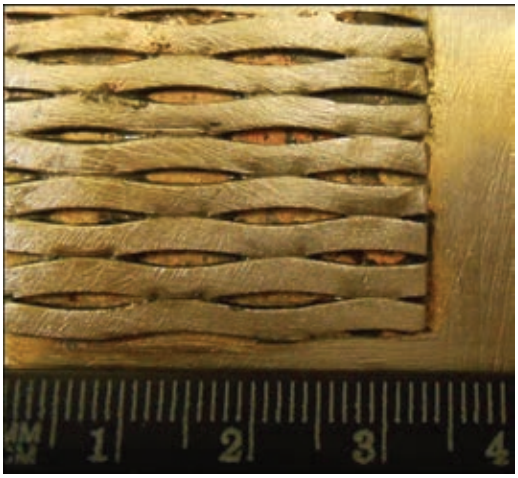


Рис. 8. Фрагмент соединения по всей площади между сетеподобным материалом и сплошным листовым материалом, выполненный прессовой сваркопайкой давлением

при этом толщина наружной оболочки t и ширина стержня s имеют одинаковые значения. Однако для окончательного определения размеров ячейки наружной оболочки необходимо провести испытания образцов двухслойной стенки и натурные испытания двухслойного баллона.

Создание таких многослойных листовых конструкций перспективно с позиции экономии материала, уменьшения удельного веса и сохранения прочностных свойств такой сварной конструкции в определенном направлении. Однако при этом возникает задача создания и формирования сварного соединения по всей площади. Образование соединения между слоями (одним листом и другим по всей площади) выполнимо различными способами сварки давлением (например взрывом). Соединять сетеподобный материал со сплошным листовым по всей площади можно способом индукционной прессовой сваркопайки давлением. Процесс индукционной прессовой сваркопайки давлением описан в [7–10]. Его появлению предшествовало изучение соединений, выполненных с мягкой прослойкой в шве, и паяных соединений, выполненных с осадкой и пластическим деформированием зоны шва [11, 12].

Для образования соединения в данной работе был применен метод индукционной прессовой сваркопайки давлением с применением заранее нанесенных на поверхность сплошного листа активирующих веществ с последующим применением нагрева ТВЧ. Формирование шва происходит на участке определенной длины с термомеханическим влиянием в виде упругопластического деформирования с последующей кристаллизацией под давлением, которая приближается к равномерному объемному распределению, что позволяет получить однородный состав металла шва и с повышением его прочностных характеристик. Благодаря применению прессовой сваркопайки давлением возможно

создавать многолистовые конструкции с применением металлов, сварку которых тяжело выполнить традиционными методами (рис. 8).

При изготовлении двухслойной оболочки корпусов сосудов-баллонов применение нагрева ТВЧ позволяет осуществить термомеханическую усадку наружной оболочки относительно внутренней, т. е. технологию посадки с натяжением, что значительно повышает конструктивную прочность составной стенки всего баллона.

Для получения более равномерного распределения напряжений по толщине стенки баллона целесообразно стенку баллона изготавливать составной — двухслойной.

Изготовление внутренней оболочки из сплошного листового материала обусловлено общими требованиями к баллону — герметичность и способность выдерживать заданное расчетное давление. Сварные швы также должны быть герметичными, плотными и выдерживать заданное давление. Назначение наружной оболочки — обеспечение более равномерного распределения напряжений по общей толщине стенки и разгрузке внутренней оболочки.

Выводы

1. При нагружении баллона рабочим давлением напряжения во внутренней оболочке больше, чем в наружной оболочке корпуса баллона, при этом общая стенка баллона не догружена.

2. Использование в двухслойной конструкции баллона одной и той же марки стали не приводит к эффективному нагружению общей стенки баллона.

3. Применение при изготовлении наружной оболочки материала с более высокими прочностными свойствами приводит к эффективному нагружению общей стенки баллона, что в свою очередь дает возможность снижения толщины ее стенки, росту в ней внутренних напряжений, т. е. рациональному нагружению баллона.

4. Осуществление прессовой посадки наружной оболочки корпуса баллона на внутреннюю оболочку позволяет оптимизировать нагружение общей стенки баллона от действия внутреннего давления.

1. *Повышение* прочностных характеристик спиральношовных труб конструкционного назначения / А. С. Письменный, А. С. Прокофьев, Р. С. Губатюк и др. // Автомат. сварка. – 2012. – № 3. – С. 40–44.
2. *Писаренко Г. С.*, *Яковлев А. П.*, *Матвеев В. В.* Справочник по сопротивлению материалов / Отв. ред. Г. С. Писаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.
3. *Майзель В. С.*, *Навроцкий Д. И.* Сварные конструкции. – Л.: Машиностроение, 1973. – 304 с.
4. *Форум А. М.* Наши баллоны выдержат любой шторм! // АГЗК+АТ. – 2009. – № 2. – С. 31–33.
5. *Сахатов Р. М.* Безосколочные металлокомпозитные баллоны БМК-300В и другие // Там же. – 2009. – № 4. – С. 51–55.
6. *Чернега В. И.* Безопасная эксплуатация паровых котлов, сосудов и трубопроводов (сборник официальных документов). – 2-е изд., стереотип. – Киев: Техніка, 1976. – 529 с.
7. *Табелев В. Д.* Особенности образования соединений при пайке с пластическим деформированием основного металла // Автомат. сварка. – 1991. – № 7. – С. 5–9.
8. *Структура* и фазовый состав швов, выполненных капиллярной пайкой и пайкой с приложением давления / В. Д. Табелев, Н. Л. Карета, А.И. Панасенко и др. // Там же. – 1985. – № 11. – С. 26–29.
9. *Лебедев В. К.*, *Табелев В. Д.*, *Письменный А. С.* Стыковая пайка под давлением // Там же. – 1983. – № 9. – С. 25–27.
10. *ДСТУ 3761.2–98*. Зварювання та споріднені процеси.
11. *Бакши О. И.*, *Шрои Р. З.* Прочность при статическом растяжении сварных соединений с мягкой прослойкой // Свароч. пр-во. – 1962. – № 5. – С. 6–10.
12. *Физическое* моделирование осадки при сварке и пайке-сварке труб встык / В. К. Лебедев, А. С. Письменный, О. Г. Касаткин, М. Е. Шинлов // Автомат. сварка. – 1990. – № 8. – С.17–20.

Поступила в редакцию 11.06.2014

НОВАЯ КНИГА

Г. А. Цыбулькин. **Адаптивное управление в дуговой сварке**. – Киев: Сталь, 2014. – 171 с.

Монография посвящена вопросам построения систем специального класса — электродуговых адаптивных систем, главное назначение которых заключается в том, чтобы придать сварочному автомату или роботу способность самостоятельно, без вмешательства человека-оператора, корректировать свое поведение в зависимости от изменения условий дуговой сварки и геометрических параметров свариваемых изделий. Изложение теоретических положений иллюстрируется примерами и результатами компьютерного моделирования. Даны практические рекомендации по выбору и расчету основных характеристик рассматриваемых систем.

Адресована широкому кругу инженеров и научных работников, интересующихся вопросами автоматизации и роботизации сварочных процессов.

УДК 621.791:62-135

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ УСТАНОВКА L-8 ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЛОПАТКИ ТУРБИН

Н. И. ГРЕЧАНЮК, П. П. КУЧЕРЕНКО, А. Г. МЕЛЬНИК, Д. В. КОВАЛЬЧУК, И. Н. ГРЕЧАНЮК*
ООО «НПП «Элтехмаш». Украина, г. Винница, ул. Ватутина, 25.
E-mail: eltechmach@gmail.com

Электронно-лучевые технологии находят все более широкое применение в мире при производстве и ремонте лопаток турбин. Оборудование для их осуществления производится в Германии, США, Украине и других странах. В работе рассмотрены конструктивные особенности и технологические возможности промышленной электронно-лучевой установки L-8 для нанесения теплозащитных покрытий на лопатки турбин, разработанной в научно-производственном предприятии «Элтехмаш». Отличительной особенностью установки является возможность осаждения всех современных теплозащитных покрытий на одном типе оборудования и при необходимости за один технологический цикл. Решена задача предварительного нагрева лопаток в шлюзовых камерах установки, их ионной очистки перед нанесением теплозащитного покрытия, а также формирования барьерных микрослоев между функциональными слоями теплозащитных покрытий с целью замедления диффузионных процессов на их межфазных границах и контроля толщины теплозащитных покрытий. Библиогр. 14, рис. 3.

Ключевые слова: электронно-лучевая установка, теплозащитные покрытия, лопатки газовых турбин

В настоящее время особое внимание уделяется созданию специализированного электронно-лучевого оборудования для нанесения теплозащитных покрытий (ТЗП) на лопатки турбин. Среди ведущих мировых производителей — фирмы «ALD Vacuum Technologies», «Von Ardenne», «Pratt&Whitney», Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и др. В частности, Институтом электросварки был изготовлен и успешно эксплуатируется ряд промышленных электронно-лучевых установок для нанесения ТЗП [1–4]. Общей особенностью этих установок является применение плосколучевых электронных пушек с ресурсом работы катода не более 50 ч.

Определенные успехи в создании подобного оборудования достигнуты в научно-производственном предприятии «Элтехмаш» (г. Винница, Украина) [5–13].

Отличительной особенностью промышленной электронно-лучевой установки L-8 разработки предприятия «Элтехмаш» является применение газоразрядных пушек и возможность нанесения всех типов и конструкций защитных покрытий: металлических, керамических, композиционных, металло-керамических, однослойных, многослойных, градиентных и т. п. Сложные по своему химическому составу и конструкции ТЗП на лопатках газовых турбин на данной установке могут быть сформированы за один технологический цикл.

Технические данные промышленной электронно-лучевой установки L-8

Размеры цилиндрической кассеты с изделиями, мм, не более:	
– диаметр	250
– длина	500
Скорость вращения изделия на горизонтальном штоке, об/мин	0,5…50
Количество испарителей, шт.	4
Внутренний диаметр тиглей, мм	70
Длина испаряемых слитков, мм, не более	500
Скорость подачи слитков, мм/мин	0,5…350
Расстояние от верхнего среза тиглей до оси вращения кассеты или плоскости напыления, мм	350
Количество и номинальная мощность (кВт) электронных пушек:	
– для испарения материалов из тиглей	4×100
– для нагрева изделий	2×60
Тип электронных пушек – аксиальные с холодным катодом (на основе высоковольтного тлеющего разряда)	
Потребляемая мощность, кВт, не более	
– высоковольтными источниками питания	520
– вспомогательным оборудованием	80
Номинальное ускоряющее напряжение, кВ	30
Рабочий вакуум в камерах, Па (мм рт. ст.)	$6\cdot10^{-3}$…$6\cdot10^{-2}$ ($5\cdot10^{-5}$…$5\cdot10^{-4}$)
Габаритные размеры установки, мм, не более:	
– длина	10500
– ширина	9500
– высота	4300
Масса установки (с источниками питания), т, не более	25

* В работе принимали участие В. И. Мельник, И. В. Мельник, Б. А. Тугай.

© Н. И. Гречанюк, П. П. Кучеренко, А. Г. Мельник, Д. В. Ковальчук, И. Н. Гречанюк, 2014

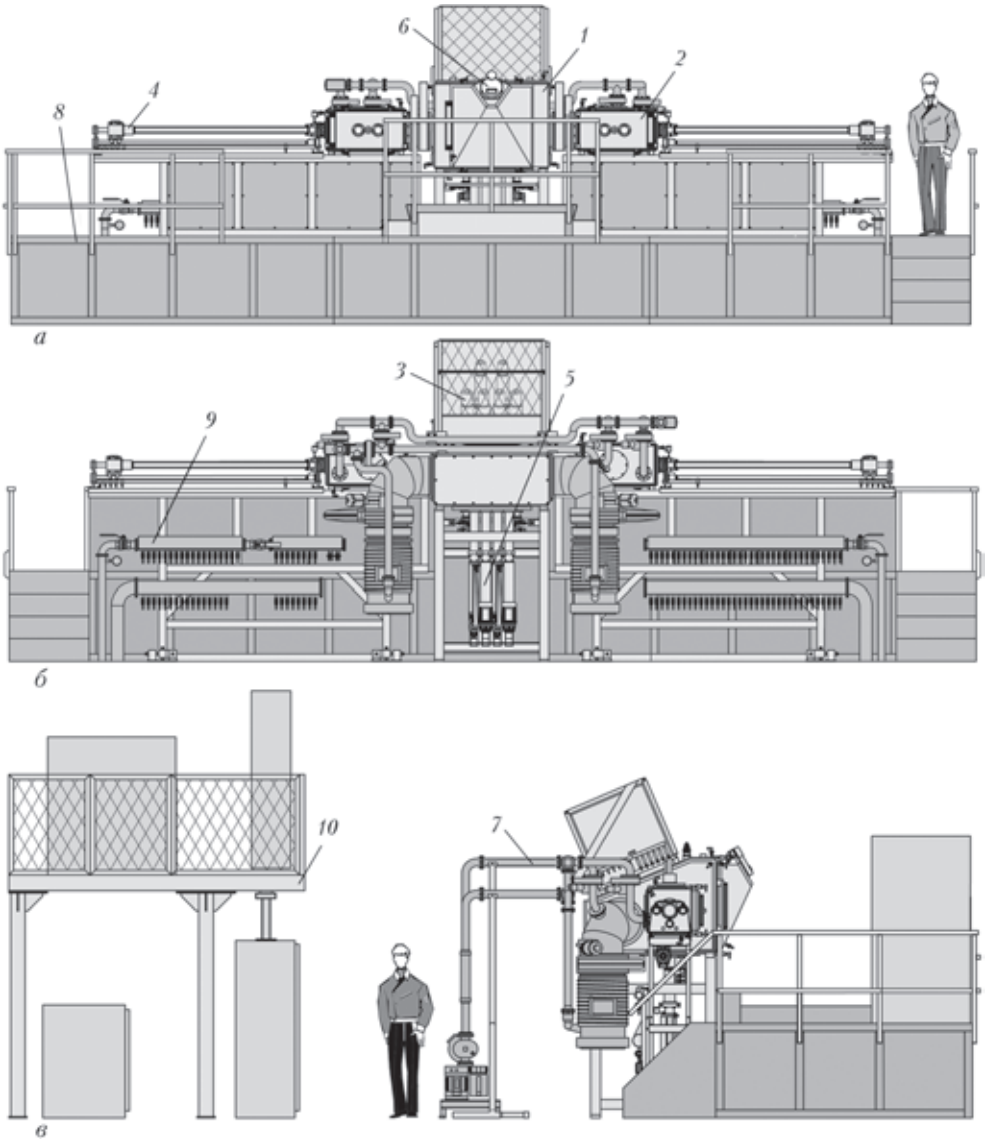


Рис. 1. Общий вид установки L-8: *а* — вид спереди; *б* — сзади; *в* — слева (*1* — камера технологическая; *2* — камера шлюзовая; *3* — электронные пушки; *4* — механизм подачи кассеты (изделий); *5* — механизм подачи слитка; *6* — смотровая система; *7* — вакуумная система; *8* — площадка обслуживания; *9* — система охлаждения; *10* — платформа высоковольтных источников питания)

Общий вид установки приведен на рис. 1.

Установка представляет собой блок вакуумных камер с механизмами, устройствами и системами, обеспечивающими проведение технологического процесса нанесения покрытий в вакууме. Схема камеры осаждения покрытий приведена на рис. 2. Внешний вид установки представлен на рис. 3.

В технологической (рабочей) камере установки (рис. 2) происходит процесс осаждения парового потока на покрываемые заготовки. В рабочей камере с помощью вакуумной системы поддерживается вакуум $5\cdot10^{-5}$…$5\cdot10^{-4}$ мм рт. ст. Снизу камеры пристыкован блок испарителей, в состав которого входят четыре медных водоохлаждаемых тигля и четыре механизма подачи испаряемых слитков. Загрузка слитков испаряемых материалов в механизмы производится сверху через тигли. Электронные пушки установлены на верхней крышке рабочей камеры.

Две синхронно работающие заслонки предназначены для экранирования покрываемых деталей во время разогрева испаряемых материалов и деталей до установления стабильного технологического режима испарения. Две другие заслонки, установленные в рабочей камере, служат для защиты затворов, разделяющих шлюзовые и рабочую камеры от запыления и высокой температуры при проведении технологического процесса.

На верхней стенке камеры установлен датчик контроля толщины осаждаемых покрытий, на задней стенке — шаровый ввод с визирной трубкой и смотровым окном для осуществления возможности бесконтактного измерения температуры. Измерение температуры изделий в установке осуществляется с помощью высокотехнологичного инфракрасного пирометра и специального программного обеспечения. На технологическую

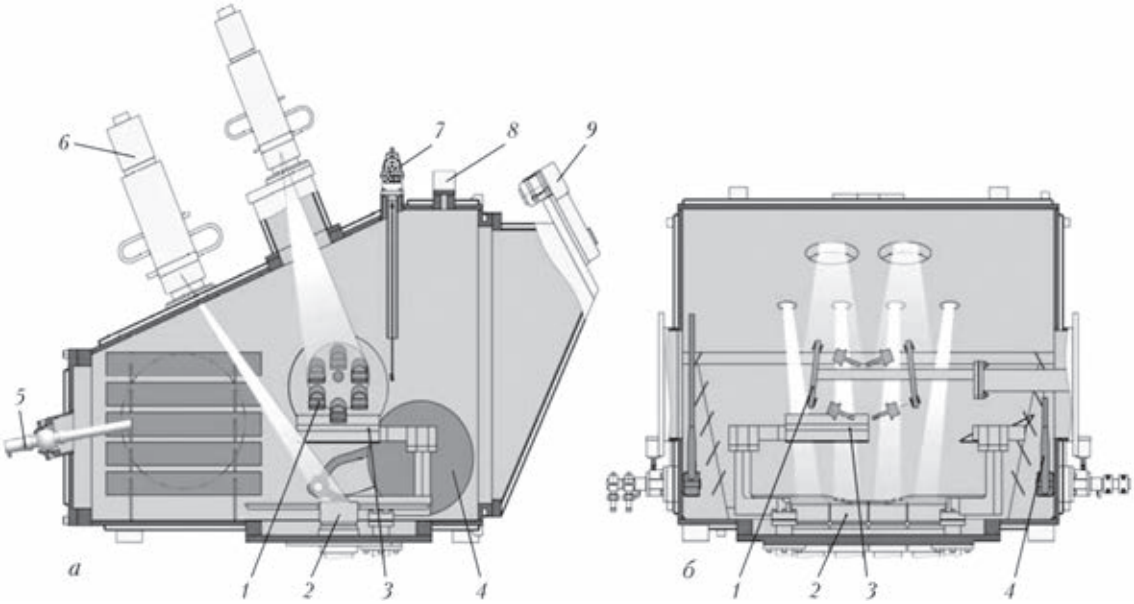


Рис. 2. Схема технологической камеры установки: *а* — поперечный разрез; *б* — продольный (*1* — кассета с лопатками; *2* — тигли; *3* — заслонки испарителей; *4* — заслонки затворов; *5* — шаровый ввод для установки пирометра; *6* — электронная пушка; *7* — весовой датчик; *8* — натекатель технологического газа; *9* — смотровая система)

и загрузочные камеры установлены электромагнитные натекатели газа с системой стабилизации потока, которые позволяют производить дозируемый напуск технологических газов.

Введение небольшого количества газа (аргона) в процессе испарения приводит к рассеиванию парового потока, что позволяет осуществлять более равномерное осаждение материала на открытые и затененные участки изделий [3].

В установке также предусмотрена возможность осуществлять частичную ионизацию технологического газа и металлического пара путем подачи на изделия отрицательного потенциала (до 2 кВ). Ионизация способствует получению покрытия с благоприятной структурой, лишенной кристаллографических дефектов, которые возникают в конденсированном слое при напуске газа [14].

Также предусмотрена возможность подачи в камеру кислорода при осаждении керамики для обеспечения ее стехиометрического состава.

Шлюзовые камеры предназначены для перезагрузки покрываемых изделий. Разобщение объемов перечисленных выше камер производится двумя вакуумными затворами $d = 320$ мм. Наличие двух вспомогательных камер увеличивает производительность установки. Нанесение покрытий на изделия, подаваемые поочередно из шлюзовых камер, происходит без развакуумирования технологической камеры.

В шлюзовых камерах установки предусмотрена возможность производить ионную очистку изделий перед нанесением покрытий, что позволяет улучшить сцепление осажденного слоя с деталью, а также наносить барьерные микрослои между функциональными слоями ТЗП с целью замедления диффузионных процессов на их границах. Для этого установка оборудована дуговыми испарителями, которые установлены на каждую загрузочную камеру, и системой управления ионной очисткой. В шкафу управления размещены источники питания дуговых испарителей и два регулируемых источника напряжения смещения,

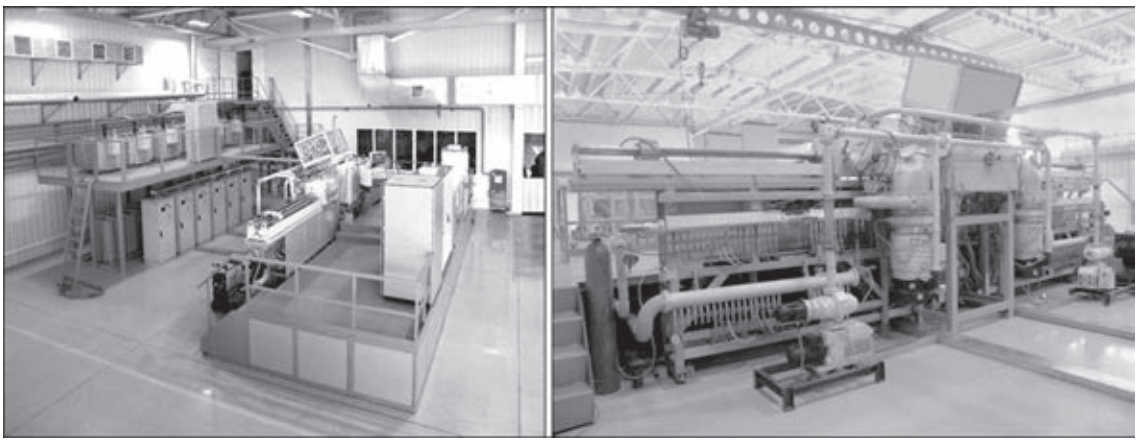


Рис. 3. Внешний вид электронно-лучевой установки L-8

которое подается на оснастку с изделиями в процессе очистки. Таким образом, очистка может осуществляться в двух режимах: предварительная дегазация и очистка изделий тлеющим разрядом в аргоне путем подачи на оснастку с изделиями отрицательного потенциала до 2 кВ относительно корпуса камеры; очистка путем бомбардировки деталей ионами металла с использованием дугового испарителя и подачей напряжения смещения на оснастку.

В качестве катода в испарителе используется сплав CrLaFe. В результате горения дугового разряда в вакууме происходит ионизация и распыление материала катода. При этом регулирование напряжения смещения на изделиях позволяет изменять скорость нанесения подслоя и температуру нагрева деталей в результате бомбардировки.

Механизмы горизонтальной подачи изделий служат для перемещения напыляемых изделий из форкамер в рабочую камеру и обратно, а также для вращения оснастки с изделиями. Для компенсации возможного прогиба штока в крайнем выдвинутом положении передняя опора штока выполнена на цапфах.

Ввод горизонтального штока в камеру выполнен таким образом, что уплотнение поступательного и вращательного движения штока осуществляется разными уплотнительными устройствами. Такая развязка предотвращает быстрый выход из строя манжетного уплотнения поступательного перемещения штока. Штоки снабжены токосъемниками для подачи напряжения смещения через полый вал на оснастку с изделиями. Напряжение смещения до 2 кВ необходимо для осуществления ионной очистки изделий.

Вакуумная система установки построена на комплектующих Oerlicon Leybold Vacuum (Германия) и VAT (Швейцария). Использованы затворы и клапаны с пневмоприводом. При отключении электроэнергии или падении давления сжатого воздуха все клапаны и затворы автоматически закрываются под действием встроенных пружин. Форвакуумные насосы характеризуются низким уровнем шума и комплектуются фильтрами очистки выхлопных газов. Насос Рутса имеет встроенный клапан защиты от чрезмерного перепада давления на входе и выходе и позволяет начинать откачку при атмосферном давлении на входе одновременно с включением форвакуумного насоса. В результате скорость откачки комбинации насосов возрастает. Паромасленные насосы поставляются с пароулавливающей ловушкой и имеют встроенные термостаты защиты от перегрева масла и превышения температуры охлаждающей воды.

Система управления вакуумом обеспечивает автоматическое аварийное закрывание затворов высоковакуумных насосов при падении вакуума в камерах ниже 10^{-1} мм. рт. ст, а также аварийное перекрытие трубопроводов на всасывании механических насосов при внезапном прекращении подачи электроэнергии.

Непосредственное управление вакуумной системой производится в автоматическом или ручном режиме с помощью сенсорной панели оператора, которая имеет для этого отдельное окно управления. На панель оператора выводится информация о состоянии вакуума в магистралях вакуумной системы, насосах, камерах и т. д. Для измерения вакуума в установке используются вакуумметрические датчики с выходным сигналом, пропорциональным давлению. Все измерительные сигналы от вакуумметров обрабатываются с помощью промышленного контроллера и отображаются на панели оператора. Система охлаждения установки обеспечивает подачу холодной воды к узлам и конструкциям, требующим охлаждения. Проток воды через наиболее ответственные узлы (тигли, насосы, пушки) контролируется с помощью датчиков протока. Также контролируется температура охлаждающей воды. При отсутствии протока или превышении установленного значения температуры осуществляется защитное отключение источников ускоряющего напряжения. Информация о наличии или отсутствии протока воды выводится на экран оператора.

Смотровая система, расположенная на передней двери технологической камеры, представляет собой стробоскопическое устройство для наблюдения за поверхностью расплавленных слитков в тиглях и за нагревом изделий.

Четыре электронно-лучевых пушки мощностью 100 кВт установлены для испарения материалов из тиглей таким образом, что каждая электронная пушка, предназначенная для испарения слитка из соответствующего тигля, может также испарять материал из соседнего тигля. Для нагрева изделий служат две электронные пушки мощностью 60 кВт.

В установке использованы газоразрядные электронно-лучевые пушки.

Технические параметры пушек мощностью 100 кВт

Ускоряющее напряжение, кВ, не более	30
Максимальный ток луча, А	3,3
Диаметр пятна в фокусе пучка, мм	около 10
Угол отклонения электронного луча от оси, град	15
Частота развертки электронного луча, Гц, не более	50
Ток фокусирующих линз, А, не более	0,95
Рабочее давление в технологической камере, Па, не более	10^{-1}
Рабочий газ	технический водород, смесь водорода и кислорода и др.
Максимальный расход газа (л·атм /ч), не более	10
Расход охлаждающей воды с температурой 15±5° С при давлении 0,3 МПа, л/мин	15

Использование холодного катода из низколегированного сплава алюминия исключает любые его искривления, что дает возможность получать стабильный электронный пучок. Общий ресурс катода составляет около 1000 ч. Использование системы электромагнитной фокусировки в пушках с холодным катодом позволяет получить качественный луч с минимальным диаметром фокального пятна около 10 мм.

Принцип действия газоразрядной электронной пушки основан на генерировании и формировании электронного пучка в высоковольтном тлеющем разряде. При работе пушки в ее разрядной камере (между катодом и анодом) горит высоковольтный тлеющий разряд с плазмой, локализованной возле анода и отделенной от катода областью катодного падения потенциала. Плазма эмитирует положительные ионы, которые ускоряются полем в области катодного падения и бомбардируют катод, вызывая эмиссию электронов. Поле катодного падения потенциала ускоряет электроны и формирует сходящийся электронный пучок с кроссовером, расположенным на расстоянии от катода, близким к радиусу кривизны его эмиссионной поверхности (вблизи отверстия в аноде).

Магнитное поле, создаваемое первой фокусирующей линзой, формирует электронный пучок по форме, близкий к цилиндрическому, вследствие чего он проходит через лучепровод без энергетических потерь в технологическую камеру. С помощью второй фокусирующей линзы пучок фокусируется на поверхности расплава, а с помощью систем отклонения осуществляется программная развертка пучка.

Управление током разряда обеспечивается регулированием давления рабочего газа в пушке при непрерывной его откачке совместно с технологической камерой установки. Для эффективного управления током разряда и стабилизации режима работы пушки применяется система автоматического напуска газа.

Система управления электронно-лучевыми пушками обеспечивает регулирование и стабилизацию токов лучей, токов электромагнитных линз, управление положением и сканированием пучка, а также позволяет осуществлять нанесение слоистых (микрослойных) покрытий.

В состав установки входят шесть высоковольтных источников питания для питания шести электронно-лучевых пушек постоянным током высокого напряжения. Высоковольтный источник питания обеспечивает преобразование трехфазного переменного напряжения в постоянное напряжение, ограничение токов короткого замыкания, отключение высокого напряжения при пробоях в пушках, а также автоматическое повторное включение.

Один комплект высоковольтного источника питания включает следующие основные составные части: шкаф пускозащитной аппаратуры (ПЗА); токоограничивающий дроссель; высоковольтный преобразователь.

Высоковольтный преобразователь состоит из силового высоковольтного трансформатора, блока выпрямителя и высоковольтных делителей, помещенных в один маслонаполненный корпус.

Система управления электроприводами обеспечивает управление механизмами подачи слитков, механизмами подачи и вращения боковых валов, смотровой системой, тигельными заслонками и заслонками междукамерных затворов.

На двигатели механизмов подачи слитков установлены энкодеры, выходной сигнал которых подается на преобразователи частоты и используется для стабилизации и расширения диапазона регулирования скорости подачи слитков.

Сигналы от энкодеров на механизмах подачи слитков и подачи бокового вала также используются системой на базе ПЛК для позиционирования и замера скоростей подачи указанных механизмов. Установка нулевых значений положения штоков осуществляется автоматически при срабатывании концевых выключателей. Положения механизмов и скорость вращения валов отображаются на экране оператора.

Система управления подачей боковых валов позволяет осуществлять возвратно-поступательное движение оснастки с изделиями в процессе осаждения покрытия в заданных пределах и с заданной скоростью для обеспечения равномерности осаждаемых покрытий по периметру изделий.

Автоматизированная система управления и мониторинга технологических параметров (АСУ) обеспечивает автоматический сбор и визуализацию технологических параметров в реальном времени, документирование информации в базе данных, осуществление функций автоматизированного и ручного управления вакуумной системой установки.

Комплекс состоит из двух основных систем: системы управления, сбора, обработки и визуализации технологической информации на базе промышленного программируемого контроллера и сенсорной панели оператора и информационно-регистрирующей системы на базе промышленного компьютера с операционной системой Windows®.

Программное обеспечение сенсорной панели оператора разработано в виде многооконного интерфейса. В окне «Мнемосхема» в графическом виде представлена мнемосхема всей вакуумной системы с отображением цифровых значений вакуума в семи точках по принимаемым данным

от системы управления. Система управления вакуумной откачкой предоставляет оператору возможность работать в ручном, автоматическом и сервисном режимах.

В ручном режиме оператору предоставляется возможность управлять вакуумным оборудованием по своему усмотрению. В этом режиме система управления вводит в действие программные блокировки, которые не позволяют оператору производить некорректные действия по отношению к вакуумной системе. При этом на мнемосхеме отображаются только те элементы управления, с которыми можно производить действия, и становятся недоступными те, которые заблокированы.

При переходе в автоматический режим на экране появляется блок кнопок, которые используются для осуществления функций автоматической откачки вакуумных камер, напуска воздуха, а также отключения установки после завершения работы и приведения вакуумной системы в исходное состояние. Режим «Сервис» снимает все блокировки и используется только для наладки системы управления инженерными работниками, обслуживающими данную установку. Для активации данного режима необходимо ввести пароль доступа.

В окне «Процесс» отображаются значения ускоряющих напряжений, токи лучей электронных пушек, скорость подачи и остатка слитков, величина вакуума в рабочей и загрузочной камерах, позиция горизонтальных валов, показания весового датчика, температура изделия, наличие протока воды в катодах и анодах электронных пушек и тиглях и т. д.

Окна «Графики вакуума», «График температуры» и «Токи лучей» предоставляют возможность наблюдения за изменением в реальном времени указанных параметров.

Производительность установки — до 60 тыс. покрываемых лопаток в год. Установка успешно прошла производственные испытания и введена в промышленную эксплуатацию в НПО «Сатурн» (г. Рыбинск).

Выводы

1. Разработана конструкция, изготовлена и успешно введена в промышленную эксплуатацию электронно-лучевая установка L-8 для нанесения ТЗП на лопатки газовых турбин.

2. Решена задача предварительного нагрева лопаток в шлюзовых камерах установки, их ионной очистки перед нанесением ТЗП, а также формирования барьерных микрослоев между функциональными слоями ТЗП с целью замедления диффузионных процессов на их межфазных границах.

3. Решена задача контроля толщины в процессе осаждения ТЗП.

1. *Пап П. А.*, *Малашенко И. С.*, *Иванов А. М.* Лабораторная установка для получения защитных покрытий различного назначения электронно-лучевой конденсацией в вакууме // Спец. электрометаллургия. – 1975. – Вып. 27. – С. 98–104.
2. *Промышленная* электронно-лучевая установка УЭ-175М для нанесения защитных покрытий на лопатки газовых турбин / А. И. Чвертко, В. В. Щербицкий, Б. А. Мовчан и др. // Там же. – 1982. – Вып. 50. – С. 53–61.
3. *Мовчан Б. А.*, *Малашенко И. С.* Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. – Киев: Наук. думка, 1983. – 230 с.
4. *Мовчан Б. А.*, *Яковчук К. Ю.*. Электронно-лучевые установки для испарения и осаждения неорганических материалов и покрытий // Спец. электрометаллургия. – 2004. – № 2. – С. 10–15.
5. *Современное* состояние и перспективы создания теплозащитных покрытий (ТЗП) для лопаток газотурбинных установок (ГТУ) и оборудования для их нанесения / Н. И. Гречанюк, П. П. Кучеренко, В. А. Осокин, П. А. Шпак // Новини енергетики. – 2000. – № 9. – С. 32–37.
6. *New* materials, coatings and electron-beam equipment for their production / N. Grechanyuk, P. Kucherenko, V. Osokin et al. // Intern. conf. «Electron Beam Technologies EBT 2003», Varna, Bulgaria, 2013. – P. 258–264,.
7. *Pat. 2451682 Canada*. Installation for coating parts using electron beams / N. Grechanyuk, P. Kucherenko. – Publ. 23.05.2005.
8. *Pat. 6923868 B2 US*. Installation for electron-ray coatication of coatings / N. Grechanyuk, P. Kucherenko. – Publ. 2.08. 2005.
9. *Пат. 2265078 РФ*. Установка для электронно-лучевого нанесения покрытий / Н. И. Гречанюк, П. П. Кучеренко. – Введ. 27.11.2005.
10. *Modern* technologies and equipment for obtaining of new materials and coatings / N. Grechanyuk, P. Kucherenko, I. Grechanyuk, P. Shpak // Electrotechnica & Electronica. – 2006. – № 5-6. – С. 122–128. 8-th Intern. conf. on electron beam technologies, 5–10 June 2006, Varna, Bulgaria. – P. 122–128.
11. *Гречанюк Н. И.*, *Кучеренко П. П.*, *Гречанюк И. Н.* Новое электронно-лучевое оборудование и технологии получения соременных материалов и покрытий // Автомат. сварка. – 2007. – № 5. – С. 36–41.
12. *Grechanyuk N., Medzinski B*., *Grodzinski A. Mo*dern electron beam technologies for fabrication of various materials, powders and metal compositions from a vapour phase // Przeglad Elektrotechniczny. – 2010. – № 5. – P. 1–4.
13. *Modern* electron beam technologies and physical vapor deposition of different materials / N. Grechanyuk, A. Melnik, I. Grechanyuk et al. // Electrotechnica & Electronica – 2014. – № 5, 6. – P.115–121. 11-th Intern. conf. on electron beam technologies, 8–12 June 2014, Varna, Bulgaria.
14. *Boone D. H.*, Lee D., *Shafer J. M.* The electron beam coating of turbine components and ion plating. – In: IPAT 77: Proc. Conf. Ion Plating and Allied Techn. Edinburgh. – 1977, S. I., s. a., P. 141–148.

Поступила в редакцию 01.09.2014

УДК 812.35.01.79.29

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБУЧЕНИИ СВАРЩИКОВ

С. КАЙТЕЛЬ[1], С. АХРЕНС[2], Х. МОЛЛ[2]
[1] SLV Halle GmbH. Köthener Str. 33a, 06118, Halle (S.), Germany. E-mail: keitel@slv-halle.de
[2] GSI mbH. Bismarckstraße 85, 47057, Duisburg, Germany

Идеи улучшения профессиональной подготовки в области сварки тесно связаны с глобальным прогрессом в вычислительной технике. На основе руководящих документов МИС был поставлен вопрос о внедрении новых компьютерных технологий в программы обучения сварщиков разных уровней квалификации. Компьютеризированная подготовка инженеров-сварщиков началась в 2003 г. До настоящего времени было подготовлено приблизительно 1000 специалистов сначала с помощью компьютерного самообразования, а затем — учебных интернет-платформ. При подготовке сварщиков использовали разработанную виртуальную систему сварочной подготовки с применением реальной короткой дуги (аналогично современным методам тренировки спортсменов). Процесс обучения сварщиков был постепенным, шаг за шагом, но с постоянными инструкциями от компьютерного устройства управления для корректировки занятий, чем обеспечивалась постоянная информационная связь между виртуальной системой сварочной подготовки и реальной сваркой в сварочной кабине. Рис. 10.

Ключевые слова: сварочное производство, кадры, профессиональная подготовка, программы обучения, компьютерные технологии, виртуальные системы

Необходимость профессиональной подготовки и продолжения образования. В современном обществе образование и профессиональная подготовка наиболее важны для продвижения по социальной лестнице. В развитых странах, а также в странах с развивающейся экономикой эти требования являются важными условиями развития личности.

Профессиональная подготовка и дальнейшее образование стимулируют производство, поскольку потребность в квалифицированных работниках постоянно растет, так как только с помощью хорошо обученного персонала возможен выпуск более сложных изделий.

Это относится как к квалифицированным рабочим, так и инженерам. Таким образом, дальнейшее развитие разработок в области методологии подготовки с полным раскрытием ее потенциала имеет большое значение.

Одной из значительных движущих сил развитых обществ в течение последних 20 лет является компьютеризация, а также интернет. Сварочная технология и, в частности, программы подготовки будущих квалифицированных сварщиков также должны развивать преимущества, получаемые от применении информационных технологий.

Благодаря новому целевому центру обучения, созданному в 2012 г. Немецким сварочным обществом и Немецкой ассоциацией сварки и родственных процессов, компьютеризированные методы обучения теперь сочетают с традиционными для формирования концепции, охватывающей, кроме сварки, весь сектор металлообработки (рис. 1).

Применение современных информационных технологий для подготовки профессионального сварочного персонала. В отношении практической подготовки сварщиков или подготовки операторов-сварщиков авторы выделяют следующие области сварки, где активные изменения происходят благодаря компьютеризации:

выбор и регулирование параметров сварки в источниках питания;

Рис. 1. Новый учебный центр BZ RR, г. Гельзенкирхен, Шальке (Рейнско-Рурский регион)

© С. Кайтель, С. Ахренс, Х. Молл, 2014

мониторинг сварщика при управлении сварочным процессом;

эргономика проектируемого оборудования;

положение тела сварщика при сварке (техническая оценка);

обучение сварщика (развитие координации движения рук).

При этом основное внимание следует уделять процессам, описанным ниже.

Практическая подготовка сварщиков. *Источники питания.* В настоящее время невозможно представить современную технологию применения источников питания и транспортировки деталей без компьютеров. Современные источники питания способны сохранять в памяти всю технологию сварки в виде завершенных программ и обеспечивать сварщику возможность эффективного управления и выбора оптимальных параметров сварки.

В частности, современные источники питания в зависимости от их механизма регулирования могут анализировать процесс сварки и настраивать его параметры. Благодаря разработке импульсной технологии контролируется перенос капель, что в итоге позволяет сварщику сконцентрироваться на ручной работе.

Таким образом, источник питания выполняет задачи, которые ранее зависели от навыков сварщика. Однако упрощенная работа с источниками питания не должна приводить к тому, что сварщик будет заниматься только ручными работами. Наоборот, необходимо больше внимания уделять теоретическим знаниям. Именно сварщик является тем лицом, которое определяет прерывание процесса сварки и (или) несоответствующий выбор параметров. Однако он может это сделать только при полном понимании процесса сварки. Кроме того, необходимо глубокое знание технологии управления, так как иногда приходится осваивать как автоматические, так и полуавтоматические процессы управления.

Новые методы обучения сварке. Возрастающие инвестиции в создание компьютеризированных учебных рабочих мест меняют организацию обучения технологии сварки. Рассматриваемое ниже оборудование — виртуальная система сварочной подготовки (VWTS) — поддерживает работу инструктора-сварщика тем, что непрерывно контролирует и корректирует движение ученика.

Рис. 2. Виртуальная система VWTS

В настоящее время можно реализовать две методологии: виртуальные и полувиртуальные системы.

На рис. 2, 3 приведены примеры применения системы, формирующей виртуальный шов на мониторе, отслеживая движения сварщика. Эта и сопоставимые с ней системы учат студентов-сварщиков решать реальные проблемы, различные по уровню трудности. В зависимости от типа сварочного оборудования, виртуальные движения отличаются в большей или меньшей степени от реальных. Однако они вполне приемлемы для приобретения профессионалных навыков.

В отличие от виртуальных в полувиртуальных системах используют электрическую дугу малой мощности. При этом реальный шов отсутствует, но можно проследить движения сварщика в виде линии плавления на металлической пластине. Во время занятий записывается последовательность движений сварщика, и он получает визуальные и (или) звуковые инструкции для корректировки действий. После сварки такие параметры, как положение горелки, скорость сварки, расстояние от горелки до изделия и общий оценочный отчет, либо выводятся на монитор либо распечатываются.

Преимущества этих систем заключаются в том, что для занятий может быть использовано стандартное сварочное оборудование, например, сварочная горелка с шлангокабельным пакетом. От электрической дуги подается небольшой ток в соответствии с параметрами реального противобликового щитка в виде шлема сварщика. На рис. 3 в качестве примера показана такая система.

Навыки ручной работы при сварке с применением электрической дуги. Конечный этап обучения сварке — обычный сварочный процесс, так как энергетическое воздействие электрической

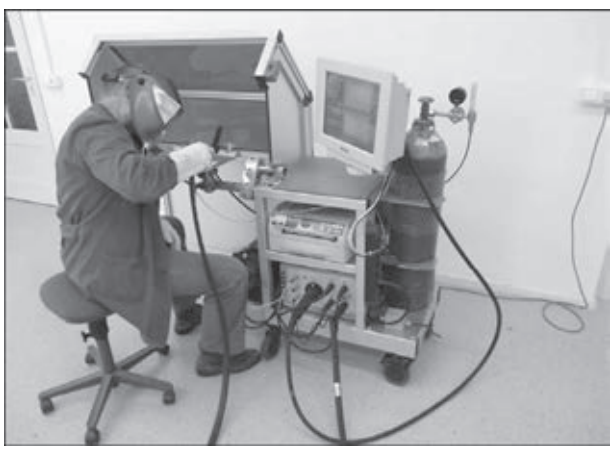


Рис. 3. Полувиртуальная система VWTS с реальной электрической дугой малой мощности

дуги и динамику сварочной ванны трудно моделировать. Это означает, что в настоящее время VWTS составляет только 20…30 % всех обучающих программ.

В будущем, однако, предполагается использовать сочетание описанных методов с постепенным усложнением задач, что повысит эффективность обучения сварщика в зависимости от его индивидуальных способностей.

Для поддержки процесса обучения могут использоваться дифференцированные системы VWTS, например, их можно комбинировать или применять последовательно. Установлена эффективность совмещения чисто виртуальных систем с полувиртуальными.

В конце процесса, однако, приоритетным должно стать использование приобретенных навыков и применение их при различных способах сварки и на металлических пластинах различной толщины. Этот метод обучения выдержал испытание временем, что подтверждено директивами МИС 089-12.

Типовая сварочная кабина для обучения показана на рис. 4.

Применение сварочных кабин и камер. Обычно обучение сварщиков проводят в сварочной кабине, чтобы защитить не участвующих в сварке от излучения и дыма. Кроме того, во время занятий на учителе должен быть одет защитный шлем. В настоящее время обучение технике сварки проходит в «темной комнате», где можно видеть только сварочную ванну, «наведенную» сварщиком (и инструктором).

Системы VWTS впервые дают возможность перевести процесс обучения в специализированные, подобные цеху, комнаты для обучения и сварочные кабины, где можно контролировать учеников-сварщиков и корректировать стабильность их движений при сварке, а также наблюдать за обучающими действиями инструктора или упражнениями, выполняемыми учениками, и оценивать их.

Рис. 4. Сварщик в процессе обучения в типовой сварочной кабине

Роль инструктора-сварщика. Компьютеризированные методы профессиональной подготовки в области сварки с применением VWTS обогащают процесс обучения. Они дополняют, но не заменяют обычного инструктора-сварщика. Именно человеческие качества и опыт ручной работы обеспечивают молодым людям достижение высокой планки при обучении. Инструктор-сварщик демонстрирует только теоретические навыки и основную последовательность движений, необходимую при сварке. Он принимает решения о том, какие методы и в какой последовательности необходимо использовать, чтобы легче было приобретать знания.

Способности инструктора позволяют развить у молодых людей творческое отношение к процессу сварки. Именно поэтому занятия с инструктором-сварщиком так важны. Они действуют как усиливающий «множитель» в процессе обучения и определяют конечный успех. Это реально как для непрерывного образования на фирме для начальной подготовки в учебном центре, так и в случае Германии при обучении по двойной системе (рис. 5).

Комплексные занятия в области металлообработки. Если требуется основательное развитие навыков молодых людей при фундаментальной подготовке, можно использовать комплексные занятия в области металлообработки, где основное внимание уделяется сварке, что доказало свою эффективность в течение многих лет. Хороший пример — цеха центров обучения GSI в Рейнско-Рурском регионе, которые занимаются обучением сварке с применением новых методов VWTS в сочетании с металлообработкой.

Системный механик, обученный таким образом, после подготовки по двойной системе получает национальный сертификат квалифицированного рабочего.

На рис. 6 показаны учебные цеха различных центров.

Обучение может проводиться не только в стационарном, но и в мобильном цехе. На рис. 7 показана такая мобильная учебная станция. Этот современный метод подготовки сварщиков широко

Рис. 5. Экспертная оценка результатов сварки

Рис. 6. Учебные центры BZ RR (*а*), GSI и DVS (*б*)

Рис. 7. Мобильная учебная станция

распространен. Инструктор-сварщик должен быть гибким, соответствовать рабочим требованиям, часто преодолевая и языковой барьер.

Обучение инженеров-сварщиков. Инженеры-сварщики считаются центральными фигурами при решении всех вопросов, связанных с контролем качества в процессе сварки. Таким образом, технологическая квалификация инженеров важна при определении качества сварных конструкций и изделий. Именно поэтому при подготовке контролеров-сварщиков квалификация инженеров-сварщиков имеет такое большое значение.

В последние годы в Германии ежегодно обучается приблизительно 1000 инженеров-сварщиков МИС. Подготовка квалифицированных конструкторов-сварщиков является весьма позитивным явлением, так как закладывает фундамент для производства новых конструкций, а также применения современных сварочных процессов при создании новой техники. Успешное повышение квалификации можно объяснить, в частности, применением новых методов обучения, поскольку

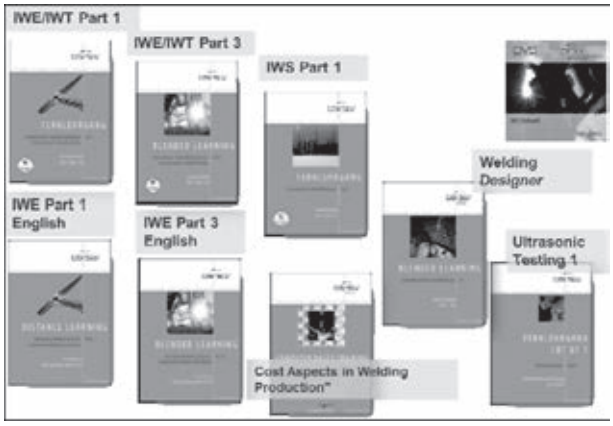


Рис. 8. Программы обучения с использованием компьютера (Немецкое сварочное общество)

GSI в год готовит приблизительно 350 человек через компьютеризированное или «смешанное обучение». На рис. 8 приведены предлагаемые сегодня пособия для дистанционного обучения.

Курсы дистанционного обучения требуют от участников высокого уровня самомотивации. Независимое усвоение учебного материала облегчено благодаря использованию визуальных средств, как показано на рис. 9.

Вариант курсов «Смешанное обучение», который был специально внедрен для подготовки инженеров-сварщиков, включает по 50 % самостоятельной работы и посещения класса. В последнем случае участники могут ставить все возникающие вопросы непосредственно инструкторам и руководителям, при этом последние имеют возможность интегрировать актуальную информацию (например, технические стандарты) в курс обучения.

Повышение значения дистанционного обучения можно объяснить возможностью получения квалификации с применением экстрапрофессиональных программ, что соответствует современной тенденции повышения уровня образования в течение всей жизни.

В этом контексте необходимо учитывать влияние интернета, поскольку вопросы учеников на-

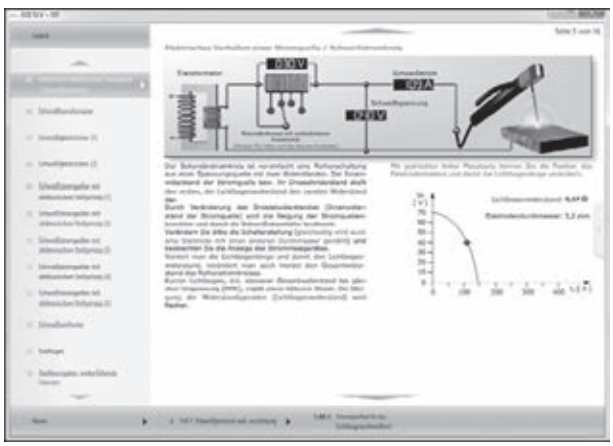


Рис. 9. Экран с анимацией (пример из курса дистанционного обучения)

Рис. 10. Современный планшетный ПК, используемый как терминальное устройство для процесса непрерывного обучения

правляются непосредственно руководителям и инструкторам. Этому способствует также применение современных терминальных устройств и широкополосных соединителей (рис. 10).

Таким образом, на примерах практической подготовки сварщиков и процессах непрерывного обучения инженеров-сварщиков показано, как совершенствуются методологии передачи знаний в области сварочных технологий, а также влияние новых технологий с применением компьютеров и интернета. С помощью новых технологий необходимо добиваться дополнительных эффектов, таких как более гибкое обучение, индивидуализация подготовки, структурированное обучение.

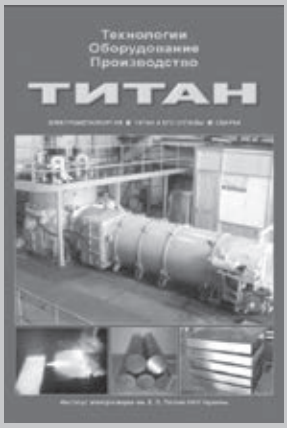
В то же время это также важно с точки зрения сохранения ресурсов, например, уменьшения времени на поездки, снижения потребления энергии и расхода бумаги и т. д.

Компьютеризация обучения может оказать долгосрочное воздействие на весь процесс подготовки, что следует учитывать при планировании и инвестировании в новые учебные центры. Кроме того, компьютеризированные методологии подготовки формируют основу для надежной интернационализации сварочных технологий.

От редакции. *К сведению читателей журнала, в Украине и России за последние 25-30 лет проведены многочисленные работы по разработке теоретических, дидактических и практических основ применения информационных технологий в обучении и повышении квалификации сварочного персонала. Приоритет в этой области принадлежит ученым и специалистам ИЭС им. Е. О. Патона и Института проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины. Этими коллективами создана гамма компьютеризированных технических средств обучения сварочного персонала, в частности сварочные тренажеры типа МДТС и ТСДС, получившие признание в России, Китае, Казахстане и других странах. Только в Россию за период с 2003 до 2013 гг. были поставлены и внедрены в учебный процесс более 1000 сварочных тренажеров различных модификаций, разработанных в ГП «НИЦ СКАЭ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины»*.

Поступила в редакцию 15.01.2014

ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО. — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2014. — 270 с. Мягкий переплет, 200×290 мм.



Сборник включает 54 статьи, опубликованные в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за период 2011–2013 гг., по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. Тематика статей посвящена созданию новых технологических процессов и оборудования для производства и сварки титана. Представлены обзоры по дисперсионному упрочнению титановых сплавов и по сварке сплавов алюминида титана, а также обзор мирового и региональных рынков титана.

Сборник предназначен для инженеров, технологов, конструкторов, занятых в машиностроении, энергетике, строительстве, судостроении, металлургии и других отраслях промышленного производства, связанных с обработкой и потреблением титана; полезен также преподавателям и студентам высших учебных заведений.

ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

А. А. Бабинец (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины) защитил 1 октября 2014 г. кандидатскую диссертацию на тему «Технологии и материалы для наплавки деталей с высоким сопротивлением термомеханической усталости».

Работа посвящена разработке технологий и усовершенствованию материалов для многослойной наплавки деталей, эксплуатирующихся в условиях изнашивания и совместного действия циклических и термомеханических нагрузок, на основании расчетно-экспериментальных методов оценки усталостной долговечности и общего ресурса таких деталей.

Впервые предложена научная база для разработки технологии многократного восстановления деталей многослойной наплавкой, а также выбора материалов для наплавки и определения количества допустимых ремонтов методами наплавки, на основании разработанной методики оценки усталостной долговечности. Методика создана в рамках единой математической модели на основе теории растущих тел, современной модели вязкопластического неизотермического течения, термокинетических диаграмм распада аустенита наплавленного и основного металлов, с учетом остаточного напряженно-деформированного и структурного состояния, при многослойной наплавке деталей слоями различного химического состава, структуры и толщины. Установлено, что практически во всем рассчитанном диапазоне циклических температур (20...860 °С) и удельных нагрузок (0...1000 МПа) наплавка подслоя проволокой Св-08А увеличивает на 20...25 % усталостную долговечность рабочего наплавленного слоя 25Х5ФМС.

Разработаны методики и конструкции многослойных наплавленных образцов для экспериментальной оценки влияния химического состава и толщин наплавленных слоев на усталостную долговечность при циклических термических и механических нагрузках, которые полностью подтвердили достоверность разработанных математических моделей. Установлено, что применение пластичного подслоя обеспечивает более плавный переход от основного к износостойкому металлу, равномерное распределение легирующих элементов и релаксацию остаточных напряжений, что приводит к увеличению усталостной долговечности детали в 1,2...1,3 раза.

Произведен расчет количества допустимых ремонтов с помощью наплавки и разработана двухстадийная технология многослойной наплавки инструментов и оснастки для горячей обработки металлов давлением. На первой стадии производится удаление только рабочего слоя и повторная его наплавка проволокой ПП-Нп-25Х5ФМС. Количество допустимых ремонтов этого вида при значениях термомеханической нагрузки, близких к реальным условиям эксплуатации, ограничивается пятью. На второй стадии, по мере накопления усталостных повреждений в подслое, производится удаление подслоя и рабочего слоя, и последующая их наплавка проволоками Св-08А и ПП-Нп-25Х5ФМС, соответственно.

Опытно-промышленная проверка результатов, полученных в данной работе, проведена при наплавке партии роликов для транспортировки горячего металла и штампов горячей штамповки.

Результаты исследований также использовались при разработке технологии наплавки отдельных изношенных деталей ротора дымососа, эксплуатирующегося в линии высокотемпературного обжига доменных окатышей. Экономический эффект от восстановления указанных деталей превысил 300 тыс. грн.

И. В. КРИВЦУНУ — 60

В октябре исполнилось 60 лет доктору технических наук, профессору, академику НАН Украины, лауреату Государственной премии Украины, известному ученому в области физики газового разряда и теории сварочных процессов Игорю Витальевичу Кривцуну.

И. В. Кривцун окончил физический факультет Киевского государственного университета им. Т. Г. Шевченко по специальности «Общая физика». С 1976 г. работает в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, с 2004 г. возглавляет отдел физики газового разряда и техники плазмы, с 2008 г. является заместителем директора Института по научной работе. В 2009 г. стал профессором кафедры лазерной техники и физико-технических технологий НТУУ «Киевский политехнический институт», а с 2010 г. является заведующим этой кафедры.

Главное направление научной деятельности И. В. Кривцуна — теоретические исследования и математическое моделирование физических явлений, протекающих в низкотемпературной технологической плазме (сварочные дуги, плазменные струи, оптический и другие виды газового разряда), а также процессов взаимодействия электродуговой плазмы и лазерного излучения с материалами в условиях дуговой, плазменной, лазерной и гибридной сварки, наплавки и нанесения покрытий.

В работах И. В. Кривцуна получила дальнейшее развитие теория электромагнитных свойств пространственно-неоднородных, плазменных и плазменноподобных систем различной геометрии. Предложен оригинальный подход и разработана методика расчета спектров спонтанного излучения дуговой плазмы, энергетических коэффициентов поглощения и отражения лазерного излучения для системы «приповерхностная плазма – металл» при лазерной сварке и обработке поверхности. Развиты методы расчета состава, теплофизических свойств, транспортных коэффициентов и оптических характеристик термической плазмы сварочных дуг с учетом ее многокомпонентности, обусловленной использованием защитных газовых смесей, испарением материала электродов и т. п.

Широкое признание получили труды И. В. Кривцуна, посвященные гибридным лазерно-дуговым и лазерно-плазменным процессам сварки и обработки металлов. В них научно обосновано, что комбинированный лазерно-дуговой разряд как источник тепла, который имеет принципиально новые возможности управления концентрацией тепловой и электромагнитной энергии, может быть положен в основу создания нового класса плазменных устройств — интегрированных лазерно-дуговых горелок и плазмотронов, предназначенных для реализации гибридных процессов. Им разработаны базовые принципы построения и методы расчета лазерно-дуговых устройств различного технологического назначения, развита теория взаимодействия сфокусированного лазерного излучения и дуговой плазмы с конденсированными средами. Впервые выявлены особенности лазерного и комбинированного лазерно-плазменного нагрева частиц мелкодисперсных металлических и керамических материалов. Разработаны такие новейшие гибридные процессы, как лазерно-микроплазменная сварка металлов малых толщин, лазерно-плазменная порошковая наплавка и напыление керамических материалов, лазерно-плазменное нанесение алмазных и алмазоподобных покрытий. Для практической реализации указанных технологических процессов создан ряд интегрированных лазерно-дуговых плазмотронов, которые не имеют аналогов в мировой практике.

И. В. Кривцун ведет активную научно-организационную работу. Он является членом специализированных ученых советов по защите кандидатских и докторских диссертаций при ИЭС им. Е. О. Патона и НТУУ «Киевский политехнический институт», членом Американского сварочного общества (AWS), членом Международного информационного общества по материалам (ASM International), членом редколлегии журналов «Автоматическая сварка» и «Вестник НТУУ «КПИ». Плодотворно сотрудничает с различными научно-техническими организациями Германии, Китая и ряда других стран, регулярно выступает с научными докладами на престижных национальных и международных конференциях и семинарах, участвует в реализации международных научных проектов.

И. В. Кривцун является автором и соавтором более 220 научных работ, в том числе трех монографий и семи патентов на изобретения. Им подготовлены один доктор и три кандидата наук. Награжден знаком отличия НАН Украины «За научные достижения».

Редколлегия журнала «Автоматическая сварка»

Седьмая международная конференция «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И РОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ»

С 15 по 19 сентября 2014 г. в Одессе на базе отеля «Курортный» была проведена Седьмая международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (MMITWRP-2014), посвященная памяти академика НАН Украины В. И. Махненко. Организаторами конференции выступили НАН Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ и Международная ассоциация «Сварка».

В работе конференции, которая была организована в виде сессий пленарнных и стендовых докладов, приняло участие 35 ученых и специалистов из Украины. Конференцию открыли академик НАНУ И. В. Кривцун и проф. В. Ф. Демченко, которые в своих выступлениях отметили вклад В. И. Махненко в мировую сварочную науку. Сын В. И. Махненко, О. В. Махненко, выступил с докладом «Задачи математического моделирования физико-химических процессов при сварке и других родственных технологиях».

Во время проведения круглого стола «Современное состояние и перспективы развития математических методов в сварке и родственных процессах» известные ученые и молодые специалисты обсуждали различные вопросы математического моделирования процессов, протекающих при сварке, а также методологические аспекты проведения вычислительного эксперимента, — от инженерной постановки до физической и математических моделей.

Тезисы докладов вместе с программой работы конференции были опубликованы к началу проведения конференции. Сборник трудов конференции будет издан до конца 2014 г. Данный сборник, а также сборники предыдущих шести международных конференций MMITWRP можно заказать в редакции журнала «Автоматическая сварка» или получить в электронном виде на сайте Издательского Дома «Патон» http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings/mmw.

Владимир Иванович Махненко много сил и времени уделял вопросам подготовки кадров и проведению конференций. Под его руководством в разные годы были проведены следующие семинары и конференции в области математического моделирования в сварке и специальной электрометаллургии:

• семинар «Применение математических методов для исследования процессов сварки и спецэлектрометаллургии», 25–27 мая 1976 г., Киев;

Участники конференции

• IV Международня школа «Математические методы в сварке», 20–26 апреля 1981 г., пос. Кацивели, Крым;

• конференция «Применение математических методов в сварке», 10–12 декабря 1985 г., Киев;

• V Международня школа «Математические методы в сварке», 18–20 сентября 1988 г., Феофания, Киев;

• конференция «Математические методы и САПР в сварочном производстве», 30 января – 3 февраля 1990 г., Свердловск;

• семинар «Моделирование физико-химических процессов, создание банков данных, расчетно-информационных и экспертных систем в области сварки и родственных технологий», 20–25 апреля 1993 г., Алушта, Крым;

• семинар «Компьютерное материаловедение и информатизация создания новых веществ и материалов», 22–27 мая 1995 г., Алушта, Крым;

• Международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (MMITWRP), 16–20 сентября 2002 г., Кацивели, Крым;

• II Международная конференция MMITWRP, 13–17 сентября 2002 г., Кацивели, Крым;

• объединенная XVI Международная конференция «Компьютерные технологии в сварке и производстве» & III Международная конференция MMITWRP, 6–8 июня 2006 г., Киев;

• IV Международная конференция MMITWRP, 27–30 мая 2008 г., Кацивели, Крым;

• V Международная конференция MMITWRP, 25–28 мая 2010 г., Кацивели, Крым;

• VI Международная конференция MMITWRP, 28 мая–1 июня 2012 г., Кацивели, Крым.

Следующая, Восьмая международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», будет проведена в Одессе на базе отеля «Курортный» в сентябре 2016 г.

А. Т. Зельниченко, И. Ю. Романова

НАУКОВО ТЕХНІЧНІ КОНФЕРЕНЦІЇ
Національний університет кораблебудування

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ КОНФЕРЕНЦИИ В НИКОЛАЕВЕ

9–13 сентября 2014 г. в Коблево на базе «Корабел» были проведены Всеукраинская научно-техническая конференция «Проблемы сварки, родственных процессов и технологий» и III Всеукраинская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Сварка и родственные процессы и технологии», посвященные 55-летию кафедры сварочного производства Национального университета кораблестроения им. Адмирала Макарова.

В конференциях приняли участие ученые и специалисты сварочного производства Украины, которые представляли более 20 организаций и предприятий, в том числе ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, НТУУ «Киевский политехнический институт», Национальный университет кораблестроения им. Адмирала Макарова, Тернопольский государственный технический университет им. И. Пулюя, Приазовский государственный технический университет, а также предприятия ТМ.ВЕЛТЕК, НПФ «АМИТИ», АО «МОТОР СИЧ», ОАО «Одесский припортовый завод», Судостроительный учебный центр сварочной техники (г. Николаев).

Наибольшее количество докладов представлено учеными ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Тематика докладов в основном была посвящена разработкам новых сварочных материалов и технологий.

Наилучшие доклады опубликованы в сборнике научных трудов НУК (2014, № 4). Юбилею кафедры был также посвящен специальный выпуск журнала «Автоматическая сварка» (2014 г., № 8), где представлена подборка научных статей ученых, специалистов и преподавателей Национального университета кораблестроения имени Адмирала Макарова, в которых отражены достижения, полученные в последние годы.

Участники конференции отмечали высокий научный уровень и практическую значимость представленных докладов.

Пост-релиз

ПАМЯТИ О. К. НАЗАРЕНКО

На 78-м году ушел из жизни член-корреспондент НАН Украины, доктор технических наук, заведующий отделом исследования физических процессов, технологий и оборудования для электронно-лучевой и лазерной сварки ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, профессор, лауреат Государственной премии Украины (2006) в области науки и техники, заслуженный деятель науки и техники Украины Олег Кузьмич Назаренко.

После окончания Киевского государственного университета им. Т. Г. Шевченко О. К. Назаренко работал на кафедре электроники радиофизического факультета. В 1959 г. Б. Е. Патон предложил ему перейти на работу в Институт электросварки и заниматься непосредственно сваркой в вакууме с помощью мощных электронных лучей.

Основные направления научных исследований О. К. Назаренко охватывают: физико-техническое обоснование возможности избежания дефектов в сварных соединениях, возникающих при нарушении вакуумной изоляции в электронной пушке, путем кратковременного снятия ускоряющего напряжения (на этой основе созданы совершенные источники питания); разработку принципов автоматического направления электронного луча вдоль стыка сварки и создание системы РАСТР, которая использует вторично-электронную эмиссию с зоны сварки как источник информации; совершенствование на основе применения системы РАСТР метода визуального программирования траектории и пространственно-энергетических параметров электронного луча вдоль стыка сварки. Результатом работ с его участием является широкое применение электронно-лучевой сварки на таких предприятиях Украины, как «Машпроект-Заря», «Мотор Сич», Южный машиностроительный завод, «Турбоатом».

В жизни О. К. Назаренко руководствовался принципом «Критерий истины — эксперимент». Такой подход к делу позволил ему и возглавляемому им отделу создать конкурентоспособные на мировом уровне технологии и оборудование для электронно-лучевой сварки.

Разработки в области электронно-лучевой сварки достойно представляют Украину на мировом рынке. Подтверждением того является промышленное использование свыше 30 комплектных установок и энергетических блоков в США, России, Японии, Южной Кореи, Нидерландах, Индии и Китае. О. К. Назаренко был признанным специалистом этой отрасли и преданным избранному делу.

О. К. Назаренко опубликовано более 300 работ, в том числе монографий и патентов.

За добросовестный труд он был награжден орденом Трудового Красного Знамени (1972) и Почетной грамотой Президиума Верховного Совета УССР (1984).

Светлая память об О. К. Назаренко навсегда останется у коллег и друзей.

Институт электросварки им. Е. О. Патона
Редколлегия журнала

ПОДПИСКА 2015 — на журнал «Автоматическая сварка»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
480 грн.	960 грн.	3600 руб.	7200 руб.	90 дол. США	180 дол. США
В стоимость подписки включена стоимость доставки заказной бандеролью.					

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Прессцентр», «Информ-наука», «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 2012 гг. в формате *.pdf.

Журнал «Автоматическая сварка» реферируется и индексируется в базах данных «Джерело» (Украина), ВИНИТИ РЖ «Сварка» (Россия), INSPEC, «Welding Abstracts», ProQuest (Великобритания), EBSCO Research Database, CSA Materials Research Database with METADEX (США), Questel Orbit Inc. Weldasearch Select (Франция); представлен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), «Google Scholar» (США); реферируется в журналах «Biuletyn Instytutu Spawalnistwa w Gliwicach» (Польша) и «Rivista Italiana della Saldatura» (Италия); освещается в обзорах японских журналов «Journal of Light Metal Welding», «Journal of the Japan Welding Society», «Quarterly Journal of the Japan Welding Society», «Journal of Japan Institute of Metals», «Welding Technology».

РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

• Первая страница обложки (190×190 мм) 700$
• Вторая (550$), третья (500$) и четвертая (600$) страницы обложки (200×290 мм)
• Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм) 400$
• Вклейка А4 (200×290 мм) 340$
• Разворот А3 (400×290 мм) 500$
• 0,5 А4 (185×130 мм) 170$

Технические требования к рекламным материалам

• Размер журнала после обрези 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
• 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
• Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
• 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

Контакты:
тел./факс: (38044) 200-82-77; 200-54-84
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Подписано к печати 25.09.2014. Формат 60×84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 17,05. Усл.-отт. 18,2. Уч.-изд. л. 20,00 + 4 цв. вклейки. Печать ООО «Фирма «Эссе».
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

© Автоматическая сварка, 2014