



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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

Ю. С. Борисов, Н. М. Воропай,
В. Ф. Грабин, В. Н. Замков,
А. Т. Зельниченко, А. Я. Ищенко,
С. И. Кучук-Яценко, Ю. Н. Ланкин,
В. К. Лебедев (зам. гл. ред.),
В. Н. Липодиев (зам. гл. ред.),
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,
В. И. Махненко, Л. И. Миходуй,
Л. П. Мойсов, В. Ф. Мошков,
О. К. Назаренко, В. В. Пешков,
И. К. Походня, И. А. Рябцев,
Ю. А. Стеренбоген,
Б. В. Хитровская (отв. секр.),
В. Ф. Хорунов, В. К. Шелег, К. А. Ющенко

МЕЖДУНАРОДНЫЙ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

И. Апата (Япония), Н. П. Алешин (Россия),
И. Гринвик (Словакия),
У. Дилтей (Германия),
Е. А. Дорошкевич (Беларусь),
П. Зайфарт (Германия),
А. С. Зубченко (Россия),
К. Иноуэ (Япония), К. Мацулучи (США),
Н. И. Никифоров (Россия),
Б. Е. Патон (Украина),
Я. Пилиярчик (Польша)

Адрес редакции:

03680, Украина, г. Киев-150,
ул. Баженко, 11

Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
Тел.: (044) 227 63 02, 269 26 23

Факс: (044) 268 04 86

E-mail:journal@paton.kiev.ua

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

Редакторы:

Е. Н. Казарова, В. И. Котляр,
Т. В. Юшина, Л. В. Герасименко

Электронная верстка:

И. С. Баташева, И. Р. Наумова,
И. В. Петушкив, Т. Ю. Снегирева

Свидетельство о государственной
регистрации КВ 4788 от 09.01.2001

Журнал входит в перечень утвержденных
ВАК Украины изданий для публикации
трудов соискателей ученых степеней

Перепечатка материалов из журнала
«Автоматическая сварка» возможна при
обязательном письменном согласовании
с редакцией журнала

При перепечатке материалов ссылка на
журнал «Автоматическая сварка» обязательна

За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности не
несет

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Акопьянц К.С., Нестеренков В.М., Назаренко О.К. Электронно-лучевая сварка сталей толщиной до 60 мм с продольными колебаниями луча	3
Борисов Ю.С., Войнарович С.Г., Ульянчич Н.В., Йенсен Дж., Вольке Г. Исследование биокерамических покрытий, полученных методом микроплазменного напыления	6
Коринец И.Ф., Цзи Чжен Чун. Математическая модель технологической адаптации робота по зазору при дуговой сварке	9
Маркашова Л.И., Арсенюк В.В., Григоренко Г.М., Бердникова Е.Н. Особенности фазообразования при сварке давлением разнородных металлов в условиях высокоскоростного деформирования	12
Лазебнов П.П., Пулина Н.Н. Шлам водоподготовительных установок теплоэнергетики как сырье для электродных покрытий	18
Гулаков С.В., Носовский Б.И. К вопросу построения модели сварочной ванны при дуговой сварке плавящимся электродом	24

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Ющенко К.А., Монько Г.Г., Старущенко Т.М., Белорусец Б.О., Наумов А.С. Сварка крупногабаритных сферических изотермических резервуаров на монтаже для хранения криогенных продуктов	30
Байич Д.Р., Савицкий М.М., Мельничук Г.М., Лупан А.Ф. Сварка ATIG конструкционных сталей, применяемых в энергетическом оборудовании	35
Белоус В.Ю. Дуговая сварка в узкий зазор титановых сплавов (Обзор)	39
Письменный А.С., Шинлов М.Е., Юхименко Р.В. Высокочастотные силовые трансформаторы для индукционных установок	44

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Сидоренко С.М., Размышляев А.Д., Раевский В.Р. Распределение индукции управляющего продольного магнитного поля при сварке тавровых соединений	48
Харченко Г.К., Фальченко Ю.В., Арсенюк В.В., Половецкий Е.В. Ударная сварка в вакууме алюминия с медью	50
Диссертации на соискание ученой степени	51
Патенты в области сварочного производства	52
По зарубежным журналам	53
Предложение редакции	54

ХРОНИКА

Открытие памятника Евгению Оскаровичу Патону	56
55-я Ежегодная ассамблея Международного института сварки	57
Наши поздравления	58

РЕКЛАМА

Главные спонсоры журнала:

Каховский завод электросварочного оборудования



ОАО «Фирма СЭЛМА»

Ново-Краматорский машиностроительный завод



ПИИ Бинцель Украина ГмбХ

Monthly Scientific-Technical and Production Journal

Avtomicheskaya SVARKA

№ 9 (594)
September 2002

Published since March, 1948

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

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B.E.PATON

Yu.S.Borisov, N.M.Voropai,
V.F.Grabin, V.N.Zamkov,
A.T.Zelnichenko, A.Ya.Ishchenko,
S.I.Kuchuk-Yatsenko, Yu.N.Lankin,
V.K.Lebedev (vice-chief ed.),
V.N.Lipodaev (vice-chief ed.),
L.M.Lobanov, A.A.Mazur,
V.I.Makhnenko, L.I.Mikhoduj,
L.P.Mojsov,
V.F.Moshkin, O.K.Nazarenko,
V.V.Peshkov, I.K.Pokhodnya,
I.A.Ryabtsev, Yu.A.Sternenbogen,
B.V.Khitrovskaya (exec. secr.),
V.F.Khorunov,
V.K.Sheleg, K.A.Yushchenko

THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

I.Arata (Japan),
N.P.Alyoshin (Russia),
I.Hrivenak (Slovakia),
U.Diltey (Germany),
E.A.Doroshkevich (Belarus),
P.Seyffarth (Germany),
A.S.Zubchenko (Russia),
K.Inoue (Japan),
K.Masubuchi (USA),
N.I.Nikiforov (Russia),
B.E.Paton (Ukraine),
Ya.Pilyarchik (Poland)

Address:

The E. O. Paton Electric
Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (38044) 227 63 02, 269 26 23
Fax: (38044) 268 04 86
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:

E.N.Kazarova, V.I.Kotlyar,
L.V.Gerasimenko, T.V.Yushtina

Electron gallery:
I.S.Batasheva, I.R.Naumova,
I.V.Petushkov, T.Yu.Snegireva

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Akopyants K.S., Nesterenkov V.M., Nazarenko O.K. Electron beam welding of steels of up to 60 mm thickness using longitudinal beam oscillations	3
Borisov Yu.S., Voinarovich S.G., Ulyanchich N.V., Enssen G., Wolke G. Investigation of bioceramic coatings produced by the method of a microplasma spraying	6
Korinets I.F., Gi Gian Chun. Mathematical model of technological adaptation of robot to the gap in arc welding	9
Markashova L.I., Arsenyuk V.V., Grigorenko G.M., Berdnikova E.N. Peculiarities of phase formation in pressure welding of dissimilar metals in the conditions of high-rate deformation	12
Lazebnov P.P., Pulina N.N. Slime of water-treatment heat power plants as a raw material for electrode coatings	18
Gulakov S.V., Nosovsky B.I. About the problem of construction of weld pool model in consumable electrode arc welding	24

INDUSTRIAL

Yushchenko K.A., Monko G.G., Starushchenko T.M., Belorusets B.O., Naumov A.S. Site welding of large-sized spherical tanks for storage of cryogenic products	30
Bajich D.R., Savitsky M.M., Melnichuk G.M., Lupan A.F. ATIG welding of structural steels used in power machine-building	35
Belous V.Yu. Narrow-gap arc welding of titanium alloys (Review)	39
Pismennyi A.S., Shinlov M.E., Yukhimenko R.V. High-frequency power transformers for induction units	44

BRIEF INFORMATION

Sidorenko S.M., Razmyshlyaev A.D., Raeovsky V.R. Distribution of induction of controlling magnetic field in welding T-joints	48
Kharchenko G.K., Falchenko Yu.V., Arsenyuk V.V., Polovetsky E.V. Percussion vacuum welding of aluminium with copper	50
Theses for scientific degrees	51
Patents in the field of welding	52
Review of foreign journals	53
Offers of Editorial Board	54

News

Opening of monument of Paton Evgeny Oskarovich	56
55th Annual Congress of IIW	57
Our congratulation	58

ADVERTISING

59

Journal «Avtomicheskaya Svarka» is published in English under the title

«The Paton Welding Journals».

Concerning publication of articles, subscription and advertising, please,
contact the editorial board



УДК 621.791.72.01

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА СТАЛЕЙ ТОЛЩИНОЙ ДО 60 мм С ПРОДОЛЬНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ЛУЧА

К. С. АКОПЬЯНЦ, В. М. НЕСТЕРЕНКОв, кандидаты техн. наук, чл.-кор. НАН Украины О. К. НАЗАРЕНКО,
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Оценена частота собственных колебаний жидкого металла сварочной ванны (десетки – сотни герц). Экспериментально достигнуто импульсное воздействие на ванну, обеспечивающее колебание луча от хвостовой части ванны к передней. Получены узкие сквозные швы с глубиной проплавления до 60 мм, шириной около 1 мм и коэффициентом формы шва 40.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, импульсное воздействие, развертка с пилообразными колебаниями, узкие швы

Отличительной особенностью электронно-лучевой сварки (ЭЛС) является получение узких швов «кинжалной» формы (глубина проплавления более чем в 10 раз превышает ширину шва). Чтобы еще больше увеличить проплавляющую способность луча, применяют различные технические приемы, в том числе основанные на импульсном динамическом воздействии на сварочную ванну. Производят импульсную модуляцию тока луча, подбирают частоту и форму развертки луча в сварочной ванне [1–3]. В работе [3] сообщается, что за счет импульсной модуляции тока на частоте 100 Гц и продольных колебаний луча получают швы более узкие и глубокие, чем обычно (хотя сварку производили в нижнем положении, по форме швы напоминают выполненные горизонтальным лучом). Однако в этой публикации не указывается, какую продольную развертку луча применяли, и не обсуждается, почему швы получаются более узкими.

Целью данной работы было исследование влияния импульсного воздействия на сварочную ванну при ЭЛС стали с продольными пилообразными колебаниями электронного луча. Приведем некоторые оценки, чтобы определить, с какой частотой следует воздействовать на сварочную ванну. Очевидно, наибольший эффект будет достигнут, если частота импульсного воздействия луча соответствует собственной частоте колебаний расплавленного металла в ванне. Для проведения оценок рассмотрим представленный на рис. 1 типичный вид «кинжалного» проплавления при однопроходной ЭЛС стационарным электронным пучком без какого-либо импульсного воздействия на ванну. В проплавлении можно выделить две области: верхнюю расширенную часть ванны и нижнюю протяженную, в которой, как известно, в процессе сварки формируется парогазовый канал.

Сначала оценим частоту колебаний верхней части ванны без учета наличия в нижней части парогазового канала. Для упрощения считаем, что

© К. С. Акопьянц, В. М. Нестеренков, О. К. Назаренко, 2002

верхняя часть сварочной ванны имеет цилиндрическую форму: глубина H , радиус $R = B/2$ (B – ширина ванны). В работе [4] показано, что первая (основная) частота колебаний жидкости в цилиндрическом сосуде (под действием силы поверхностного натяжения) определяется выражением

$$\omega^2 = \frac{\sigma}{\rho R^3} k^3 \text{th}(kh),$$

где ω – циклическая частота, равная $2\pi f$; f – частота колебаний ванны; σ – поверхностное натяжение; ρ – плотность; k – собственное число краевой задачи о колебаниях поверхности ($k = 1,841$); h – безразмерная глубина ванны ($h = H/R$). При ЭЛС обычно глубина намного пре-

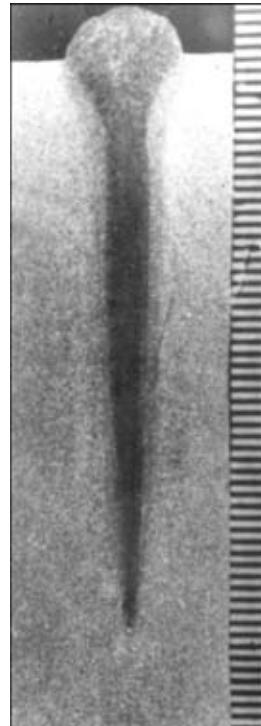


Рис. 1. Поперечный макрошлиф типичного проплавления стали 10X18H9T при однопроходной ЭЛС стационарным электронным пучком (без импульсного воздействия на ванну); $U_{yek} = 60$ кВ, $I_b = 170$ мА, $v_{cb} = 10$ м/ч; $h/B_{cp} = 16$

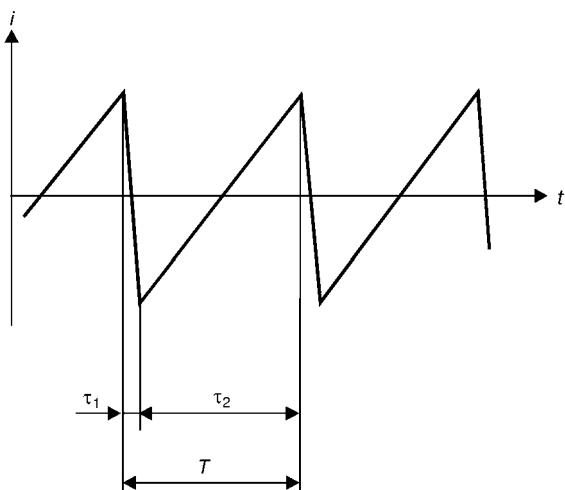


Рис. 2. Пилообразная форма тока $i(t)$ в отклоняющей катушке; T — период развертки; τ_1 — время перебрасывания пучка в хвостовую часть ванны; τ_2 — время движения пучка в направлении от хвостовой части ванны в переднюю часть; t — текущее время

вышает ширину, т. е. $h \gg 1$; соответственно гиперболический тангенс $\text{th}(kh) \approx 1$.

В результате получаем выражение для частоты колебаний верхней части сварочной ванны f_1 в зависимости от ее ширины B :

$$f_1 \approx 1,1 \left(\frac{\sigma}{\rho B^3} \right)^{0,5}$$

Например, для стали ($\rho = 7800 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\sigma = 1,5 \text{ Н}/\text{м}$) при ширине ванны $B = 5 \dots 10 \text{ мм}$ получаем частоту колебаний ванны $f_1 = 44 \dots 16 \text{ Гц}$.

Колебания верхней части сварочной ванны проявляются в образовании «чешуек» на поверхности шва. Проведенная оценка частоты находится в хорошем соответствии с измеренными значениями [1].

Теперь учтем, что в сварочной ванне по всей ее глубине формируется парогазовый канал. Как

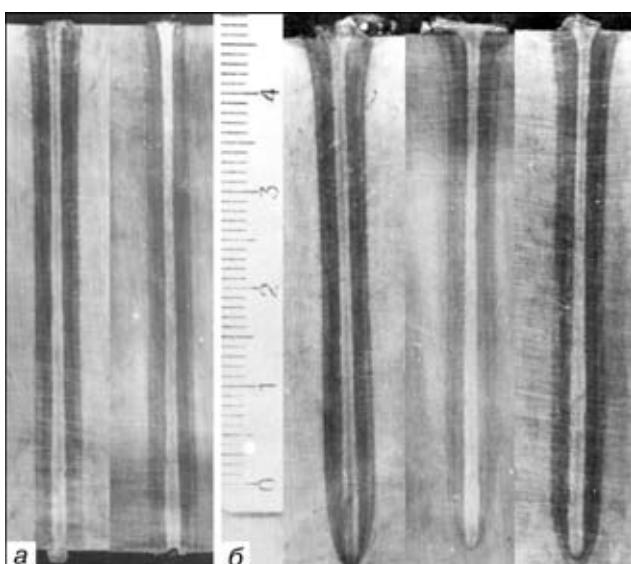


Рис. 3. Сквозное проплавление стали 12Х2Н4МД (а) ($\delta = 57 \text{ мм}$, $U_{\text{уск}} = 60 \text{ кВ}$, $I_b = 235 \text{ мА}$, $v_{\text{св}} = 18 \text{ м}/\text{ч}$; продольные колебания пучка специальной формы; $f = 130 \text{ Гц}$, размер развертки 3 мм, $h/B_{\text{сп}} \approx 42$); несквозное проплавление (б) ($I_b = 215 \text{ мА}$, $h/B_{\text{сп}} = 38$, остальные параметры, как на рис. 3, а)

было показано в статье [5], колебания поверхности канала относительно равновесного положения происходят на частоте

$$f_2 \approx 2,3 \left(\frac{\sigma}{\rho d_k^3} \right)^{0,5},$$

где d_k — диаметр канала. Например, при $d_k = 1,5 \dots 2,5 \text{ мм}$ частота колебаний поверхности канала составляет $f_2 = 550 \dots 250 \text{ Гц}$.

Произведенные оценки позволяют установить, что диапазон частот колебаний жидкого металла в сварочной ванне при ЭЛС находится в пределах от десятков до сотен герц. Этому же диапазону должно соответствовать импульсное воздействие пучка на ванну.

Эксперименты производили с использованием для ЭЛС аппаратуры типа ЭЛА-60/60 (ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}} = 60 \text{ кВ}$, ток пучка $I_b = 1 \text{ А}$) в вакуумной камере УЛ-209 ($2,5 \times 2,5 \times 3,8 \text{ м}$, рабочий вакуум не хуже $5 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$) с перемещаемой внутри камеры пушкой (оснащена дифференциальной откачкой, обеспечивающей вакуум в пушке не хуже $1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$). Была выбрана высокопрочная среднелегированная сталь толщиной $\delta = 57 \text{ мм}$. Сварку осуществляли при $v_{\text{св}} = 5 \text{ мм}/\text{с}$ ($18 \text{ м}/\text{ч}$), токе пучка — до 250 мА.

Импульсное динамическое воздействие на сварочную ванну производили посредством развертки луча.

С учетом данных работы [3] и выполненных оценок частоты собственных колебаний металла в ванне (десятки — сотни герц) частоту развертки луча выбрали равной 130 Гц, что соответствует примерно середине частотного диапазона собственных колебаний; при этом также обеспечивалось отсутствие биений с частотой электросети.

Развертка луча имела форму продольных колебаний вдоль направления сварки. Питание отклоняющей катушки осуществлялось от специального генератора током пилообразной формы (рис. 2). При развертке с продольными колебаниями получаются узкие швы [1] в отличие, например, от сварки с поперечными колебаниями или с круговой разверткой.

Размер развертки (двойная амплитуда) составлял 3 мм, что примерно в 2 раза превышает диаметр парогазового канала, существующего при сварке статическим лучом. Влияние развертки пучка в этом случае должно быть заметным.

Существенной особенностью сварки был выбор направления движения луча при развертке: по направлению сварки или против.

В случае, когда пучок импульсно перебрасывается в направлении хвостовой части сварочной ванны, а потом в течение почти всего периода развертки движется в переднюю часть, швы получаются наиболее узкими и глубокими. Схема движения пучка в этом случае представлена на рис. 2, а образующиеся проплавления — на рис. 3.

Наряду с получением узких сквозных швов (ширина расплавленной зоны примерно 1 мм (рис. 3, а) следует также отметить образование закругления



в корне на несквозных швах (рис. 3, б), что способствует предотвращению корневых дефектов.

Форму выполненных швов численно можно оценить следующим образом. Делим изображение проплавления (например на рис. 3, а) на десять участков по глубине и производим замеры ширины шва на разной глубине: $B_1(0,1h)$, $B_2(0,2h)$, ..., $B_9(0,9h)$.

Определяем среднее значение ширины шва

$$B_{\text{ср}} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^g B_i$$

среднеквадратичное отклонение ширины шва

$$\Delta B_{\text{ср}} = \frac{1}{9} \sqrt{\sum_{i=1}^g (B_i - B_{\text{ср}})^2},$$

разность между значениями B_{max} и B_{min}

$$\Delta B_{\text{max}} = B_{\text{max}} - B_{\text{min}},$$

коэффициент формы шва $k = h/B_{\text{ср}}$.

Для сквозного проплавления (рис. 3, а, слева) получаем среднюю ширину шва (проплавления) $B_{\text{ср}} = 1,35$ мм, среднеквадратичное отклонение ширины шва $\Delta B_{\text{ср}} = 0,16$ мм, разность между максимальным и минимальным значениями ширины $\Delta B_{\text{max}} = 0,4$ мм, коэффициент формы шва $k = 42$. Для несквозного проплавления (рис. 3, б, слева) $B_{\text{ср}} = 1,42$ мм, $\Delta B_{\text{ср}} = 0,13$ мм, $\Delta B_{\text{max}} = 0,35$ мм, $h = 54$ мм, $k = 38$.

В качестве сравнения приведем значения этих же показателей для проплавления, представле-

ного на рис. 1: $B_{\text{ср}} = 3,1$ мм, $\Delta B_{\text{ср}} = 0,8$ мм, $\Delta B_{\text{max}} = 2,2$ мм, $h = 49$ мм, $k = 16$.

Как видно из оценок, проплавления, представленные на рис. 3, по сравнению с таковыми, полученными при ЭЛС статическим лучом (см. рис. 1), получаются более узкими, равномерными по глубине и со сравнительно большим коэффициентом формы. Получение таких узких швов объясняется импульсным динамическим воздействием на жидкий металл в хвостовой части сварочной ванны, в результате чего он вытесняется. Тем самым открывается доступ электронному лучу ко дну сварочной ванны и происходит ее проплавление на большую глубину. В результате увеличивается глубина парогазового канала, по которому проходит луч. Соответственно возрастает глубина сварочной ванны и уменьшается ее ширина, но объем металла ванны остается тот же.

Таким образом, благодаря применению описанного технологического приема можно получать более узкие и глубокие швы.

1. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
2. Ohmine M., Hiramoto S., Jamane J. Fundamental study on the pulsed electron beam welding. — S. I., [1983]. — 13 p. (Intern. Inst. of Welding; Doc. IV-348-83).
3. Schulze K.-R., Fritz D., Reindl G. Je dicker, je lieber — Elektronenstrahlschweißen im Vacuum // Praktiker. — 1996. — № 6. — S. 250–254.
4. Гидромеханика невесомости. — М.: Наука, 1976. — 504 с.
5. Акопьянц К. С., Емченко-Рыбко А. В. Контроль глубины проплавления и фокусировки электронного пучка при частоте пульсаций ионного тока при сварке // Автомат. сварка. — 1981. — № 9. — С. 28–32.

Frequency of natural oscillations of molten metal of the weld pool (10...100 Hz) has been estimated. The pulsed effect on the pool, ensuring oscillation of the beam from the tailing part of the pool to its leading part, has been achieved. Narrow through-penetration welds have been made with a penetration depth of up to 60 mm, width of about 1 mm and weld shape factor of 40.

Поступила в редакцию 04.11.2001



ИССЛЕДОВАНИЕ БИОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Ю. С. БОРИСОВ, д-р техн. наук, **С. Г. ВОЙНАРОВИЧ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Н. В. УЛЬЯНЧИЧ, инж. (ЗАО НПП «КЕРГАП», г. Киев),
Дж. ЙЕНСЕН, Г. ВОЛЬКЕ (Ниймегенский ун-т, Нидерланды)

Изучена прочность сцепления и биосовместимость биокерамических покрытий, полученных микроплазменным напылением. Установлено, что при использовании подслоя прочность сцепления покрытий из гидроксиапатита возрастает по сравнению с таковой у покрытий, нанесенных без подслоя. Показано, что увеличение толщины покрытия до 130...160 мкм приводит к снижению его прочности сцепления до 4,59 МПа (без подслоя). Подтверждена высокая биосовместимость микроплазменных покрытий.

Ключевые слова: микроплазменное напыление, гидроксиапатит, трикальций фосфат, параметры режима, прочность сцепления, биологическая совместимость, исследования

В настоящее время наиболее широкое распространение в качестве материала для изготовления имплантатов получили металлы и сплавы. Однако с их применением возникает ряд проблем, в том числе коррозионной стойкости, совместимости с тканями организма. При этом недостаточная коррозионная стойкость приводит не только к разрушению и ослаблению самого имплантата, но и оказывает отрицательное влияние как на окружающие ткани, так и на организм в целом. Поэтому все большее применение получают металлические имплантаты с покрытием из биокерамических материалов, где механическая прочность металлической основы сочетается с биологическими особенностями покрытия. Такие биокерамические покрытия обладают тройным положительным эффектом: повышением скорости формирования костной ткани, возможностью образования связи с костью (остеointеграция) и снижением образования продуктов коррозии металла.

В последние годы выполнен целый ряд исследовательских работ по нанесению биокерамических покрытий различными способами газотермического напыления: плазменным (традиционным в атмосфере [1–9] и в динамическом вакууме [9, 10]), высокочастотным [11]; высокоскоростным газопламенным [6, 9, 12]; микроплазменным [13]. Задачей данного исследования являлось изучение биосовместимости и прочности сцепления с основой биокерамических покрытий, полученных микроплазменным напылением.

Установка микроплазменного напыления МПН-004. Данная установка включает источник питания с панелью управления, плазмотрон и специальное устройство для подачи порошка [14, 15]. Конструкция и параметры работы плазмотрона обеспечивают формирование ламинарной плазменной струи (критерий Рейнольдса составляет

0,10...0,55). Этот фактор обуславливает ряд особенностей процесса микроплазменного напыления, которые позволяют сократить потери напыляемого материала при напылении изделий малого размера (стоматологические имплантаты) и избежать перегрева подложки [13, 16].

Установка имеет следующие характеристики:

газ	
рабочий	аргон
транспортирующий	аргон; воздух
защитный	аргон
мощность, кВт	до 3,0
сила тока, А	10...50
напряжение, В	до 60
расход газа, л/мин	
рабочего	0,1...1,5
защитного	1,0...4,0
производительность, кг/ч	0,25...2,50
коэффициент использования	
материала	0,6...0,8
габариты, мм	540×255×470
масса, кг	15

Материал для напыления. Порошки гидроксиапатита (ГАП) и трикальций фосфата (ТКФ) с размером частиц менее 63 мкм, использованные для микроплазменного напыления, были предоставлены ЗАО НПП «КЕРГАП», которое является разработчиком технологии синтеза этих порошков

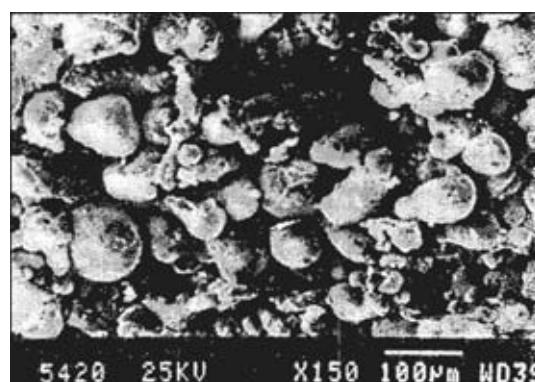


Рис. 1. Внешний вид частиц порошка ГАП производства ЗАО НПП «КЕРГАП»

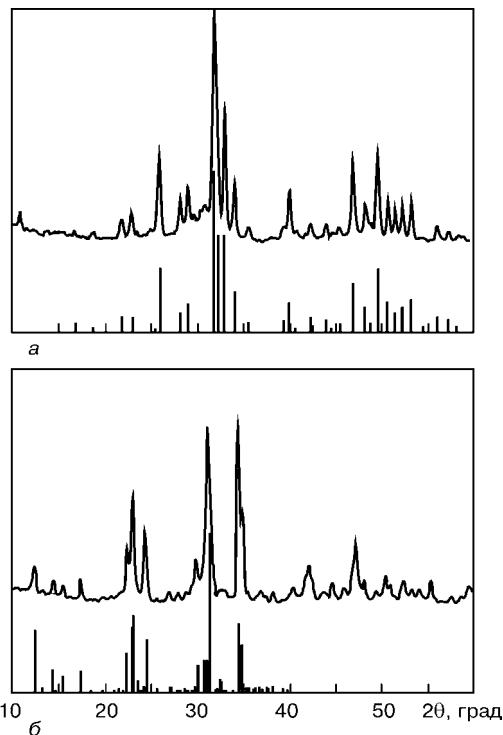


Рис. 2. Дифрактограммы микроплазменных покрытий из ГАП (а) и ТКФ (б)

и их изготовителем [13]. Внешний вид частиц порошка ГАП приведен на рис. 1.

Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины в содружестве с ЗАО НПП «КЕРГАП» и Ниймегенским университетом (Нидерланды) выполнен комплекс исследований биоактивности микроплазменных покрытий из ГАП и ТКФ. Для исследований фазового состава покрытий и поведения на их поверхности клеточных культур использовали методы рентгенофазового анализа и растровой электронной микроскопии. Исследования прочности сцепления покрытий с основой проводили согласно стандарту ASTM C 633-79 по kleевой методике с использованием пленочного клея ВК-47.

Результаты исследований. Для исследования прочности сцепления биокерамических покрытий с основой методом микроплазменного напыления наносили покрытия ГАП на торцевую поверхность цилиндрических образцов из титанового сплава диаметром 25 мм. При этом использовали следующий режим напыления: расход плазмообразующего газа 0,7 л/мин, защитного — 4,3 л/мин; сила тока 40 А; напряжение 30 В; дистанция напыления 100 мм.

Было исследовано влияние на прочность сцепления таких факторов, как толщина покрытия, наличие и материал подслоя. В качестве последнего использовали порошки Ti и TiO_2 . Установлено, что прочность сцепления покрытий из ГАП возрастает по сравнению с прочностью сцепления покрытий, нанесенных без подслоя, что согласуется с выводами других исследователей [17]. Так, при напылении покрытия из ГАП толщиной 80...100 мкм на подслой из титана прочность сцепления достигала 8,29, а из TiO_2 — 11,32 МПа, тогда

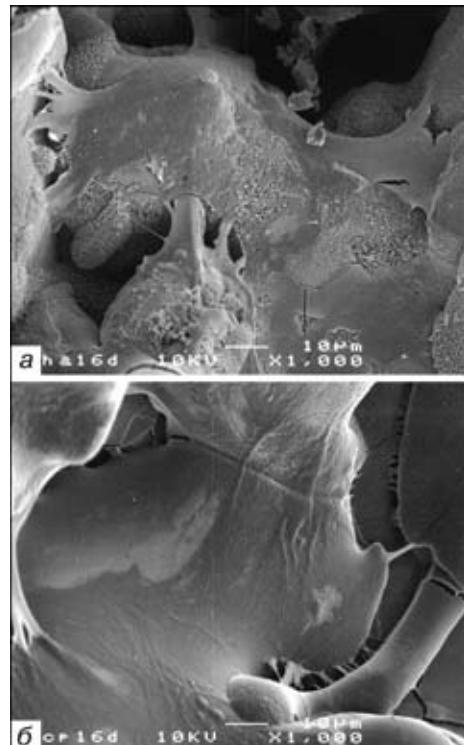


Рис. 3. Внешний вид биокерамических покрытий ГАП (а) и ТКФ (б) с клеточными культурами

как без применения подслоя она составляла 7,39 МПа. Использование подслоя дает такие преимущества: образование благоприятного микрорельефа поверхности для нанесения покрытия; снижение напряжений на границе раздела «покрытие—основа», возникающих в результате различия между их коэффициентами термического расширения. Кроме того, пониженная теплопроводность подслоя (особенно в случае использования в качестве подслоя TiO_2) снижает скорость охлаждения частиц напыляемого материала, а следовательно, и вероятность образования аморфной фазы.

На прочность сцепления покрытия с основой значительное влияние оказывает также толщина покрытия. Так, увеличение последней до 130...160 мкм привело к снижению прочности сцепления до 4,59 МПа (при напылении без подслоя).

Результаты рентгенофазового анализа покрытий из ГАП и ТКФ приведены на рис. 2. Основные пики дифрактограммы покрытия из ГАП (рис. 2, а), согласно картотеке ASTM (№ 9-432) соответствуют ГАП с небольшой примесью ТКФ, которая образовалась при напылении. Все линии дифрактограммы покрытия из ТКФ (рис. 2, б) согласно картотеке ASTM (№ 9-359) соответствуют ТКФ. Малая ширина пиков свидетельствует о высокой степени кристалличности покрытия и отсутствии аморфной фазы.

С целью исследований биосовместимости покрытий на образцы из титанового сплава ВТ6 методом микроплазменного напыления наносили покрытия из ГАП и ТКФ толщиной 200 мкм. Костномозговые клетки были выделены из бедренной кости молодой крысы и выращены при температуре 37 °C в атмосфере воздуха с добавкой 5 % углекислого газа. Затем клетки высевали на поверх-



ность покрытий. На рис. 3 показана поверхность покрытий соответственно из ГАП и ТКФ с клеточными культурами. Обнаружен активный рост клеток на покрытиях с образованием сплошной пленки, особенно в случае покрытия из ТКФ, что свидетельствует о высокой биологической совместимости полученных покрытий и перспективности их применения на поверхности эндопротезов.

Выводы

1. Микроплазменные биокерамические покрытия из ГАП и ТКФ имеют высокую степень кристалличности при практическом отсутствии аморфной фазы.

2. Применение подслоя из Ti и TiO₂ позволяет повысить прочность сцепления покрытия с основой и снизить возможность образования аморфной фазы при напылении покрытий.

3. Активный рост клеток на покрытиях с образованием сплошной пленки свидетельствует о высокой биологической совместимости полученных покрытий и перспективности их применения в качестве покрытий эндопротезов.

1. *Plasma sprayed coatings of hydroxyapatite* / K. de Groot, R. T. G. Geesink, C. P. A. T. Klein, P. Serakian // J. Biomed. Mater. Res. — 1987. — **21**. — P. 1375–1381.
2. *Kay J. F.* Plasma sprayed hydroxyapatite coatings for enhanced biocompatibility // Mater. Technology. — 1993. — **8**, № 1/2. — P. 26–29.
3. *Cheang P., Khor K. A.* Bioceramic powder and coatings by thermal spray techniques // Proc. of Intern. Spray conf., Kobe, Japan. — 1995. — P. 181–186.
4. *The influences of plasma spraying parameters on the characteristics of hydroxyapatite coatings: a quantitative study* / C. Y. Yang, B. C. Wang, E. Chang, J. D. Wu // J. Mater. Sci. Mater. in Medicine. — 1995. — **6**. — P. 249–257.

Adhesion strength and biocompatibility of bioceramic coatings produced by microplasma spraying have been studied. It has been established that with the use of a sub-layer the adhesion strength of the hydroxyapatite coatings increases, compared with that of the coatings deposited without sub-layer. It is shown that increase in thickness of the coating to 130...160 μm leads to decrease in its adhesion strength down to 4.59 MPa (without sub-layer). High biocompatibility of the microplasma coatings has been proved.

5. *McPherson R., Gane N., Bastow T. J.* Structural characterisation of plasma-sprayed hydroxyapatite coatings // Ibid. — P. 327–334.
6. *Khor K. A., Cheang P., Wang Y.* The thermal spray processing of HA powders and coatings // JOM. — 1997. — Febr. — P. 51–57.
7. *Khor K. A., Cheang P., Wang Y.* Plasma spraying of combustion flame spheroidized hydroxyapatite (HA) powders // J. of Thermal Spray Technology. — 1998. — **7**, № 2. — P. 254–260.
8. *Wang Y., Khor K. A., Cheang P.* Thermal spraying of functionally graded calcium phosphate coatings for biomedical implants // Ibid. — № 1. — P. 50–57.
9. *Brown S. R., Turner I. G.* Acoustic emission analysis of thermal sprayed hydroxyapatite coatings examined under four point bend loading // Surface Eng. — 1998. — **14**, № 4. — P. 309–313.
10. *Heimann R. B., Vu T. A.* Low-pressure plasma-sprayed (LPPS) bioceramic coatings with improved adhesion strength and resorption resistance // J. of Thermal Spray Technology. — 1997. — **6**, № 2. — P. 145–149.
11. *Bouyer E., Gitzhofer F., Boulos M. I.* The suspension plasma spraying of bioceramics by induction plasma // JOM. — 1997. — Febr. — P. 58–62.
12. *The characterization of hydroxyapatite coatings sprayed with VPS, APS and DY systems* / J. G. Wolke, K. de Groot, T. G. Kraak et al. // Proc. of the Intern. thermal spray conf., Pittsburgh, 1991.
13. *Микроплазменное напыление биокерамических покрытий* / Ю. С. Борисов, С. Г. Войнарович, В. Г. Бобрик и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 12. С. 63–67.
14. *Microplasma spraying* / K. Yushchenko, Yu. Borisov, Y. Pereverzhev et al. // Proc. of the 15th Intern. thermal spray conf., Nice, France. — 1998. — P. 1461–1467.
15. *Microplasma spraying* / K. Yushchenko, Yu. Borisov, Y. Pereverzhev et al. // Proc. of the 14th Intern. thermal spray conf., Kobe, Japan. — 1995. — P. 273–274.
16. *Нанесение узкополосных покрытий методом микроплазменного напыления* / Ю. С. Борисов, Ю. Н. Переображенев, С. Г. Войнарович, В. Г. Бобрик // Автомат. сварка. — 1999. — № 6. — С. 53–55.
17. *Калита В. И.* Физика и химия формирования биоинертных и биоактивных поверхностей на имплантатах // Физ. и химия обраб. материалов. — 2000. — № 5. — С. 28–44.

Поступила в редакцию 09.07.2001



УДК 621.791.75.03-52:621.865.8

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ РОБОТА ПО ЗАЗОРУ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

И. Ф. КОРИНЕЦ, канд. техн. наук, **ЦЗИ ЧЖЕНЬ ЧУН**, магистр
(НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Разработана детерминированно-статистическая модель адаптации робота по зазору при дуговой сварке в смеси Ar + 25 % CO₂ плавящимся электродом. Ее можно применить для разработки математического и программного обеспечения адаптивных систем управления роботов для дуговой сварки в инертных газах плавящимся и неплавящимся электродами, а также под флюсом.

Ключевые слова: дуговая сварка, плавящийся электрод, защитная смесь, робот, система управления, математическая модель

Развитие робототехники становится основным направлением автоматизации сварочного производства [1]. Например, в Германии почти половина всех промышленных роботов используется в сварке [2]. Первоначально их применяли для точечной контактной сварки, роботизация которой была технически проще по сравнению с дуговой [3, 4]. С развитием средств робототехники стали применять роботы для дуговой сварки (более 90% из них выполняют дуговую сварку в активных газах плавящимся электродом и около 5% в инертных газах).

Широкое применение роботизированной дуговой сварки сдерживается наличием случайных отклонений линии соединения заготовок, а также величины зазора между ними и формы подготовки кромок. Необходимость решения этой проблемы обусловило разработку адаптивных систем управ-

ления роботов, обладающих способностью автоматически приспосабливаться к изменениям внешней среды [5]. Задача пространственной адаптации робота, т. е. автоматического ведения дуги по сложному контуру сварного соединения, является практически решенной [6]. Более сложной является задача технологической адаптации робота, т. е. автоматической корректировки параметров режима в процессе сварки (например, при нестабильном зазоре в сварном соединении, обусловленном недостаточной точностью сборки и деформацией кромок в процессе сварки).

Перспективным средством технологической адаптации являются видеосенсорные системы [1–5, 7]. Однако видеосенсоры, расположенные на горелке в непосредственной близости от зоны сварки, испытывают воздействие теплового и светового излучений, электромагнитных помех, брызг расплавленного металла и аэрозоля, что снижает их надежность [7]. В настоящее время, благодаря миниатюризации аппаратуры, защиты ее от воздей-

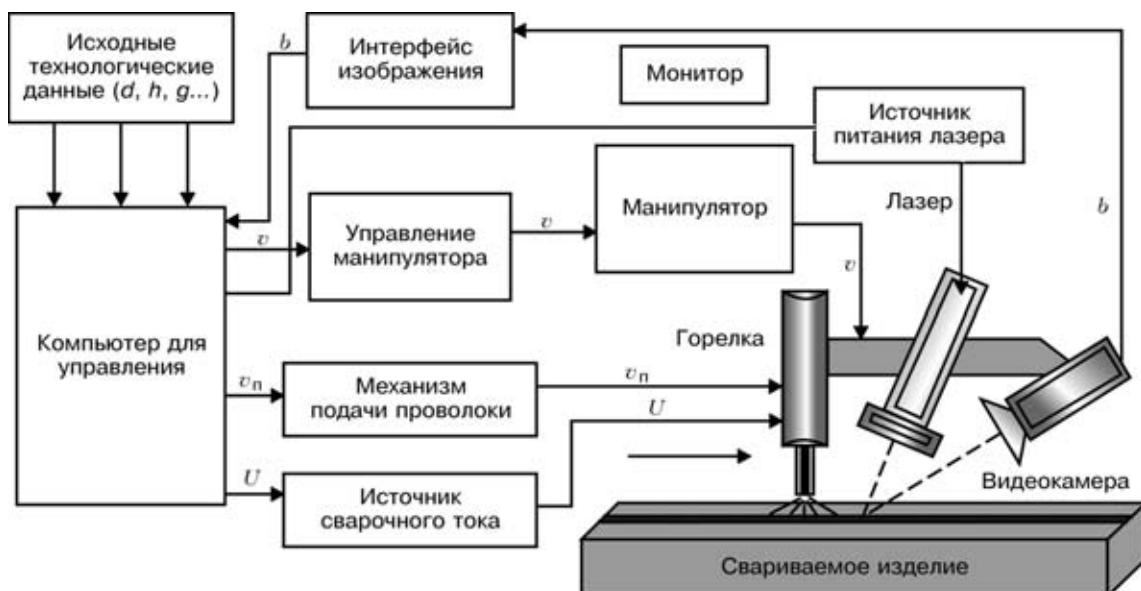


Рис. 1. Структурная схема технологической адаптации по зазору роботизированной дуговой сварки в защитном газе плавящимся электродом



$$h = 3,0 \text{ мм}; g = 1,5 \text{ мм}; b = 0 \dots 2,0 \text{ мм}$$

Математическая модель адаптации режима сварки по зазору

$$I = 104,954 \cdot 0,592 \frac{b^{1,180}}{g^{0,626}} \quad (1)$$

$$v = 17,865 \cdot 0,454 \frac{b^{0,712}}{g^{1,659}} \quad (2)$$

a



b

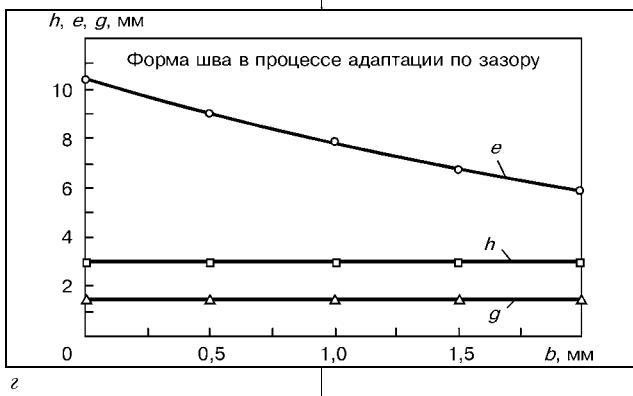
Контроль формы стыкового шва с зазором

$$h = 0,020 \cdot 1,284 \frac{b^{1,094}}{v^{0,409}} \quad (3)$$

$$e = 0,069 \frac{b^{1,051}}{v^{0,324}} \quad (4)$$

$$g = 1,062 \cdot 0,692 \frac{b^{0,469}}{v^{0,778}} \quad (5)$$

c



d

Критерии качества формы шва

$$h_{\phi} = h \pm 0,1h; \quad g_{\phi} = g \pm 0,5 \text{ мм};$$

$$e_{\min} \geq b_{\max} + 4 \text{ мм}$$

появляющая от видеосенсора информация (рис. 1) должна обрабатываться в реальном масштабе времени и обеспечивать корректировку параметров режима в процессе сварки. Это обуславливает повышенные требования к быстродействию адаптивной системы управления роботом и особые требования к разработке ее математического и программного обеспечения.

Известно, что зазор встыке оказывает существенное влияние на глубину проплавления и качество формирования шва. Поэтому при дуговой сварке первостепенной задачей является технологическая адаптация робота по зазору. Эта адаптация должна выполняться в реальном масштабе времени.

В связи с этим целью работы является разработка математической модели технологической адаптации робота по величине зазора встыковом соединении при дуговой сварке плавящимся электродом, которая отличалась бы простотой и, следовательно, требовала минимального времени для расчета и корректировки режима сварки.

Используя метод детерминированно-статистического моделирования формы шва при дуговой сварке [8], была разработана математическая модель формы шва при дуговой сварке стыковых бесккосных соединений с переменным зазором [9]. Для решения задачи адаптации режима дуговой сварки по зазору прежде всего была разработана математическая модель формы шва (прямая задача) с учетом влияния зазора (выражения (3)...(5)). Экспериментальная оценка влияния зазора и параметров режима сварки на форму шва на примере дуговой сварки в смеси $\text{Ar} + 25\% \text{CO}_2$ плавящимся электродом показала, что математическая модель формы шва может иметь достаточный уровень адекватности при учете только двух основных параметров: сварочного тока I и скорости сварки v . Решение системы уравнений (3) и (4) относительно тока и скорости сварки (обратная задача) позволило получить простую математическую модель адаптации режима дуговой сварки по зазору (рис. 2, a, выражения (1) и (2)).

Использование модели показано на рис. 1 и 2. Часть входной информации (d — диаметр электродной проволоки; h — глубина проплавления; g — высота выпуклости шва и др.) задается оператором при программировании робота. В процессе сварки видеосенсорная система выдает величину зазора, которая поступает в компьютер, где (по выражениям (1) и (2)) рассчитываются текущие параметры режима сварки: ток и скорость сварки. Остальные параметры режима сварки (напряжение сварки U и скорость подачи электродной проволоки v_u) являются производными от ранее определенных параметров и также рассчитываются в компьютере. Так, скорость подачи электродной проволоки можно определить по разработанной в работе [10] формуле:

$$v_u = 0,53 \frac{I}{d^2} + 0,7 \cdot 10^{-3} \frac{I^2}{d^3}. \quad (6)$$

Рис. 2. Математическая модель технологической адаптации по зазору роботизированной дуговой сварки в смеси $\text{Ar} + 25\% \text{CO}_2$ плавящимся электродом

твия сварочной дуги и снижения стоимости технических средств, ведущие фирмы по производству роботов перешли от лабораторных испытаний видеосенсоров к практическому их применению. В случае технологической адаптации робота посту-



Оптимальное напряжение сварки можно рассчитать в зависимости от величины сварочного тока по формуле

$$U = 14 + 0,05I. \quad (7)$$

Рассчитанные текущие параметры сварки v , v_n и U поступают на исполнительные органы робота для корректировки режима сварки.

Анализ процесса технологической адаптации робота по зазору показывает, что с увеличением зазора все параметры режима сварки I , U и v снижаются (рис. 2, б). Расчет размеров шва по исходной модели формы шва (выражения (3)...(5)) показывает, что в процессе адаптации при условии обеспечения постоянства глубины проплавления и высоты выпуклости шва с увеличением зазора ширина шва не остается постоянной, а снижается (рис. 2, г).

В условиях дуговой сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей, у которых термический цикл сварки не вызывает существенного изменения свойств в металле ЗТВ, критерием качества технологической адаптации может быть соответствие фактически полученных размеров и формы шва требованиям стандарта (рис. 2, д).

Выводы

1. Разработана детерминированно-статистическая математическая модель технологической адаптации по зазору при роботизированной дуговой сварке плавящимся электродом, отличающаяся простотой (учитываются два основных параметра режима сварки), применение которой позволяет повысить быстродействие адаптивной системы управления роботом.

A deterministic-statistical model was developed of robot adaptation to the gap in consumable-electrode arc welding in a mixture of Ar + 25 % CO₂. It may be applied in development of the software of adaptive control systems of robots for MIG and MAG, and well as submerged-arc welding.

2. В процессе адаптации по зазору при условии постоянства заданной глубины проплавления и высоты выпуклости шва с увеличением зазора в стыке уменьшаются сварочный ток и скорость сварки и соответственно ширина шва.

3. Метод моделирования технологической адаптации по зазору можно применить при разработке математического и программного обеспечения адаптивной системы управления роботами при других способах дуговой сварки сталей и цветных металлов и сплавов: под флюсом, в инертных газах плавящимся и неплавящимся электродом.

1. Тимченко В. А., Бернадский В. Н. Современное состояние и тенденции развития роботизации сварочного производства // Автомат. сварка. — 1997. — № 3. — С. 23–27.
2. Клоос К.-Е., Дилтей У. Применение роботизированных технологических комплексов для дуговой сварки // Там же. — 1991. — № 7. — С. 55–59.
3. Тимченко В. А., Сухомлин А. А. Роботизация сварочного производства. — Киев: Техніка, 1988. — 175 с.
4. Сварочные роботы / Под ред. Г. Гердена: Пер. с нем. — М.: Машиностроение, 1988. — 288 с.
5. Морозов Б. И., Станкевич Л. А., Юрьевич Е. И. Системы управления роботами. — Л.: ЛПИ, 1987. — 88 с.
6. Тимченко В. А., Нечев Г. Состояние и тенденции развития роботов для сварки // Автомат. сварка. — 1982. — № 7. — С. 45–57.
7. Бортняков Ю. Л., Устинов Н. Г. Разработка тракта адаптации системы управления робота дуговой сварки // Свароч. пр-во. — 1990. — № 10. — С. 34–36.
8. Коринец И. Ф., Цзи Чжень Чун. Детерминированно-статистическая модель формы шва при дуговой сварке // Автомат. сварка. — 2001. — № 10. — С. 44–51.
9. Коринец И. Ф., Цзи Чжень Чун. Влияние зазора на размерыстыкового шва при дуговой сварке в смеси Ar + CO₂ плавящимся электродом // Там же. — 2002. — № 8. — С. 16–20.
10. Коринец И. Ф. Математическая модель плавления электродной проволоки при дуговой сварке // Там же. — 1995. — № 10. — С. 39–43.

Поступила в редакцию 04.10.2001



ОСОБЕННОСТИ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СВАРКЕ ДАВЛЕНИЕМ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Л. И. МАРКАШОВА, д-р техн. наук, В. В. АРСЕНЮК, канд. техн. наук, чл.-кор. НАН Украины Г. М. ГРИГОРЕНКО,
Е. Н. БЕРДНИКОВА, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены результаты исследований особенностей процессов массопереноса и фазообразования в соединениях разнородных металлов, отличающихся ограниченной взаимной растворимостью ($\text{Cu}+\text{Al}$, Ti +нержавеющая сталь, $\text{Ст}3+\text{Al}$ и др.), которые выполнены сваркой давлением при использовании высокоскоростных способов сварочного деформирования.

Ключевые слова: сварка давлением, сварка взрывом, разнородные соединения, скорость деформирования, дислокации, сегрегации, фазовые образования, стехиометрический состав, структурные параметры, предел текучести, упрочнение, механические свойства

С формированием хрупких фаз, а также легкоплавких эвтектик обычно связывают снижение механических свойств соединений разнородных материалов, выполненных сваркой давлением [1–8], особенно соединений металлов, имеющих ограниченную взаимную растворимость. С учетом достаточно негативного влияния указанных фаз на свойства сварных соединений широко используют различные способы, с помощью которых блокируется образование и рост таких фазовых образований. Одним из наиболее распространенных способов такого блокирования является применение промежуточных прослоек из металлов, образующих неограниченные твердые растворы со свариваемыми металлами. Благодаря этому в значительной степени снижается тенденция образования интерметаллидных слоев в переходной зоне.

Изыскиваются и другие технологические решения для предотвращения образования и роста хрупких фаз. Например, технологические режимы выбираются таким образом, чтобы температура, при которой осуществляется сварка, не превышала $T_{\text{пл}}/2$ наиболее легкоплавкого материала, а время сварки — продолжительность инкубационного периода их образования [2, 4]. Авторы приведенных выше работ отмечают, что образование твердых хрупких прослоек может, кроме того, спровоцировать появление легкоплавких фаз. Последнее связано с тем, что при образовании карбидов происходит блокирование гетеродиффузии, что приводит к локальному повышению температуры и появлению жидких фаз [2].

В некоторых случаях отмечается снижение интенсивности образования хрупких фаз при увеличении скоростей сварочного деформирования [8–10]. Это стимулирует изыскание новых технологий

сварки, использующих высокоскоростные способы деформирования.

Сложность и многообразие физико-химических процессов, развивающихся под действием сварочных термодеформационных нагрузений, диктуют необходимость получения более полной информации об особенностях формирования структуры переходной зоны разнородных соединений и процессов, связанных с образованием неблагоприятных для качества соединения фаз. Необходимо также более четкое понимание взаимосвязи между характером фазообразования и механическими свойствами соединений. Некоторые из результатов исследований в этом направлении представлены в настоящей работе.

В качестве соединяемых материалов были выбраны титан ВТ1-0, сталь Ст3, коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т, алюминиевый сплав АД1, медь М-0 и М-1. Соединение разнородных металлов осуществляли сваркой взрывом и трением. Исследования выполняли с использованием комплекса методов, включающих оптическую, аналитическую растровую и просвечивающую электронную микроскопию на установках СЕМ-515 (фирмы «Филипс», Голландия) и JEM-200 CX (фирмы «Джеол», Япония). Специально разработанные методы утонения при подготовке тонких фольг из разнородных соединений позволили выполнить также прямые исследования процессов, протекающих непосредственно вдоль зоны взаимодействия свариваемых материалов [11].

Результаты эксперимента. На рис. 1, *a*, *b* показаны особенности фазообразования непосредственно в зоне контакта соединения титана со сталью 12Х18Н10Т, выполненного сваркой взрывом. Общий характер распределения титана и железа в переходной зоне, а также локальные изменения их концентраций в области формирования фаз и завихрений волн, которые проявляются при исследовании методом растровой электронной микроскопии в характеристическом излучении, представлены на рис. 1, *c*. Как видно из рисунка, распределение элементов и структур-

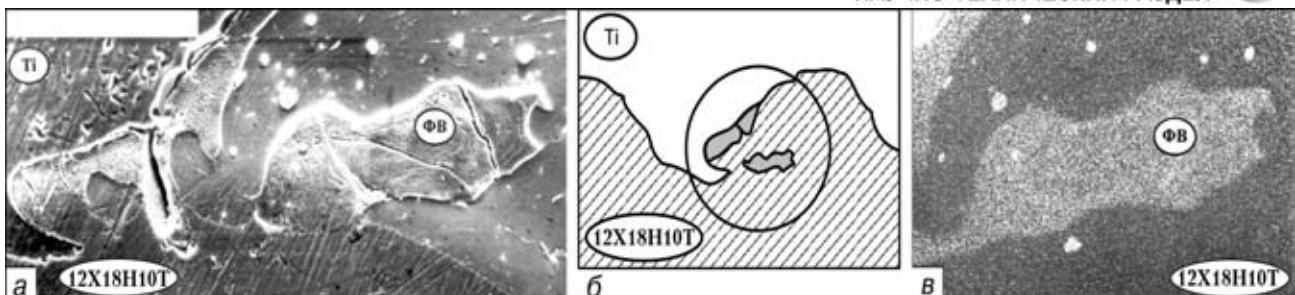


Рис. 1. Структура в зоне соединения сталь 12Х18Н10Т+ВТ1-0, выполненного сваркой взрывом: *а* — детали структуры, $\times 163$; *б* — схема зоны волнобразования, $\times 655$; *в* — характер распределения титана (характеристическое излучение), $\times 655$; ФВ — фазовые выделения

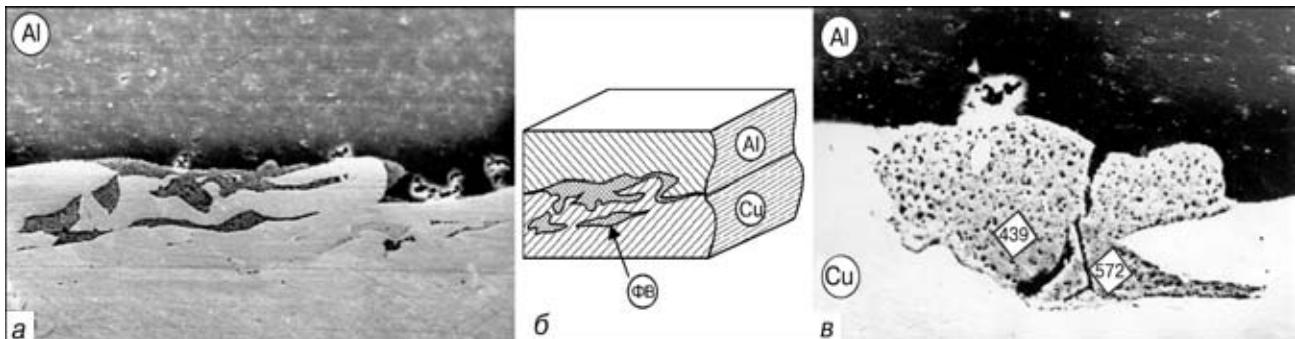


Рис. 2. Зона соединения меди с алюминиевым сплавом, выполненного сваркой взрывом: *а*, *б* — соответственно вид ($\times 356$) и схема зоны контакта; *в* — фрагмент зоны контакта с формирующейся фазой типа CuAl_2 , $\times 680$

но-фазовое состояние металла в области сварки неоднородно. Так, в некоторых зонах от впадины до гребня волны наблюдается довольно равномерное изменение концентраций химических элементов по мере перехода от титана к стали. Вблизи зоны завихрений проявляется слоистый характер распределения титана и железа (рис. 1, *в*). Это является результатом направленного перемещения в поле действующих напряжений потоков масс одного из соединяемых металлов (титана) во внутренние объемы другого металла (стали 12Х18Н10Т). Количественный анализ распределения химических элементов показал равномерное изменение их концентрации, а также наличие зон с постоянным уровнем содержания этих элементов, что свидетельствует о формировании в этой области фазовых образований определенного стехиометрического состава.

Что касается структур, формирующихся в зонах оплавления, которые локализуются, как правило, в участках завихрений волн, то при оптических исследованиях эти области проявляются как массивы мелкозернистых образований (рис. 1, *а*, *б*). Результаты более детальных исследований на просвет показали, что указанные мелкозернистые структуры представляют собой образования эвтектического типа, которые имеют вид дисперсных зерен $\gamma\text{-Fe}$ глобулярной формы, окаймленных прослойками твердого раствора титана и железа.

Для структуры области эвтектики характерно наличие хаотически разориентированных зерен с признаками протекания рекристаллизационных и полигонизационных процессов, имеющих минимальную плотность дислокаций. По мере перехода к основному металлу (сталь 12Х18Н10Т) в зоне сопряжения со сталью наблюдается формирование сложной напряженно-деформированной структу-

ры. Последняя характеризуется наличием плотных дислокационных скоплений, элементов двойникования, а также микрообъемов стали с явными признаками поворотов и вращений.

Таким образом установлено, что на границах зон сопряжения легкоплавких эвтектик с основным металлом (в данном случае со сталью) реализуется жесткое напряженное состояние металла, проявляющееся в виде локального повышения плотности дислокаций, двойникования и поворотов объемов металла. Как правило, в указанных областях наблюдается формирование трещин, что достаточно ясно показано на рис. 1, *а*.

В соединениях меди с алюминиевым сплавом, выполненных сваркой взрывом, в зоне контактного взаимодействия на расстоянии приблизительно 100...150 мкм от поверхности раздела (рис. 2, *а*, *б*) также, как и в соединении сталь 12Х18Н10Т+титан, обнаруживаются области твердых растворов переменной концентрации (рис. 3, *а*) и формирующиеся фазовые образования различной морфологии и степени дисперсности (рис. 2, *а*—*в*). Эти фазовые образования существенно отличаются по микротвердости (HV 572 до 205) и стехиометрическому составу (рис. 4). В ФВ с наибольшей твердостью достаточно четко просматриваются трещины (рис. 2, *в*, 3, *б*, 4). Как правило, по мере удаления от поверхности контакта уменьшаются размеры области формирующихся фаз, их микротвердость и склонность к хрупкому разрушению.

Аналогичная картина процессов формирования фаз наблюдается и в соединениях Ст3 + Al, выполненных сваркой взрывом. Непосредственно в зоне контакта происходит также образование сложных зон, состоящих из областей переменной концентрации и фазовых образований различного типа.

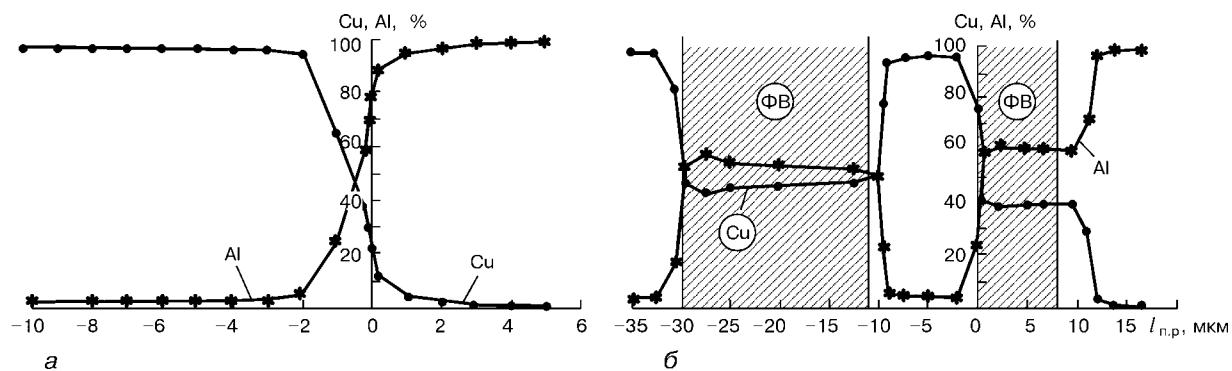


Рис. 3. Изменение содержания основных элементов в зоне соединения меди с алюминием, выполненного сваркой взрывом (а) и в локальных участках формирующихся фаз (б); $l_{\text{н.р.}}$ — расстояние от поверхности раздела

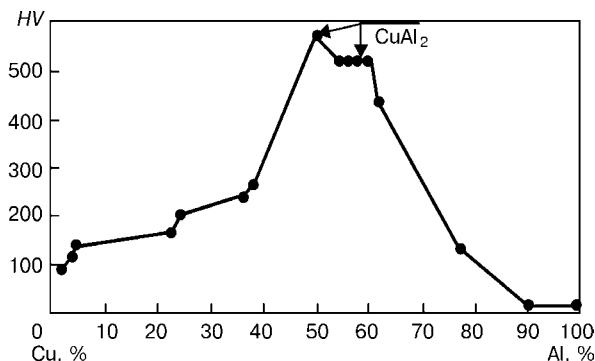


Рис. 4. Зависимость микротвердости HV фазовых образований от содержания в них меди и алюминия

С помощью детальных исследований переходной зоны сварки на просвет выявлены особенности формирования фазовых образований по ее глубине. В некоторых областях во внутренних объемах зерен алюминия обнаруживаются плотно расположенные в пределах отдельных зерен ультрадисперсные фазы размером около 0,03...0,10 мкм, скопления сегрегаций, а также плотные интерметаллидные образования протяженной формы (рис. 5). Причем в

зоне сегрегационных скоплений и ультрадисперсных фаз резких градиентов дислокационной плотности не наблюдается, в то время как формирование достаточно крупных неравноосных фаз протяженной формы сопровождается появлением локальных, достаточно плотных нагромождений дислокаций.

При сварке трением благодаря локальному и кратковременному нагреву и способу внешнего нагружения удается избежать формирования интерметаллидных слоев, ориентированных вдоль плоскости контакта соединяемых поверхностей. Однако при разных режимах сварки (режимы конвенционной и инерционной сварки) обнаруживаются существенные различия в формировании интерметаллидных фаз в переходной зоне (рис. 6). Следует отметить, что если режимы конвенционной сварки (судя по резкому уменьшению плотности дислокаций и укрупнению структуры) соответствуют условиям горячей деформации, то режимы инерционной сварки, при которой пиковые температуры в стыке действуют достаточно кратковременно, более соответствуют режимам теплой деформации. Соответственно при горячей деформации непосредственно

в зоне контакта характерным является рекристаллизация структуры. Особенно важно, что при зарождении роста фазовых образований преимущественно проходит по суб- и межзеренным границам. Это приводит к формированию протяженных фаз строчечного типа, их расположение вдоль межзеренных границ имеет иногда сдвоенный характер (рис. 6, а).

При режимах сварки, соответствующих условиям теплой деформации (инерционная сварка), характер структуро- и фазообразования в области контакта существенно изменяется. В структуре явно превалируют процессы полигонизации в объемах деформируемых зерен, что сопро-

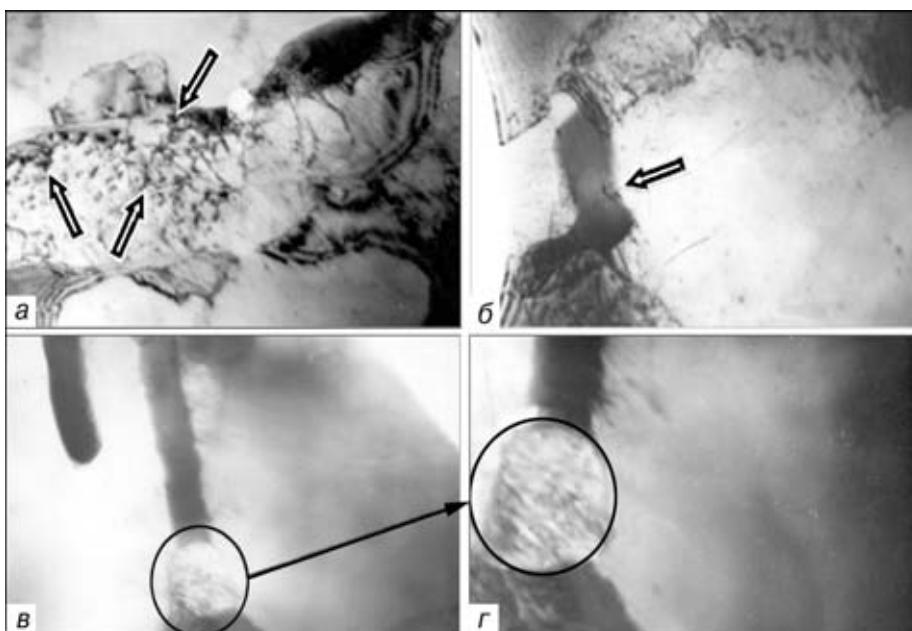


Рис. 5. Формирование сегрегационных скоплений и дисперсных фаз (а, $\times 30000$), а также неравноосных протяженных фазовых образований (б, $\times 37000$; в, $\times 20000$; г, $\times 30000$) в зоне контакта соединения Ст3 + Аl, полученного сваркой взрывом



вождается измельчением структурных элементов при сохранении повышенной плотности дислокаций. Однако принципиальной особенностью указанного режима сварки является изменение в характере фазообразования и в распределении распространящих новых фаз. В зернах алюминия (более мягким из двух свариваемых металлов) происходит образование ультрадисперсных частиц новых фаз размером $d_q \approx 0,1$ мкм и меньше при плотном и равномерном их распределении во внутренних объемах зерен (рис. 6, б). Этот свидетельствует о том, что алюминий непосредственно в зоне контакта представляет собой практически новую структуру — квазикомпозита. Для данного типа соединений, по-видимому, наличие такой структуры в зоне контакта со стороны более пластичного из соединяемой пары металла должно способствовать нивелированию резкого градиента механических свойств, обычно наблюдаемого вдоль области сварки.

Анализируя выявленные особенности формирования различных структур, которые являются неблагоприятными для качества сварных разнородных соединений, можно подчеркнуть следующее. Образование эвтектик, связанных с формированием зон оплавления в области завихрения волн, проявляется при параметрах волн выше оптимальных значений. В узкой локальной зоне перехода от области оплавления к основному металлу размером приблизительно 10,0...15,0 мкм наблю-

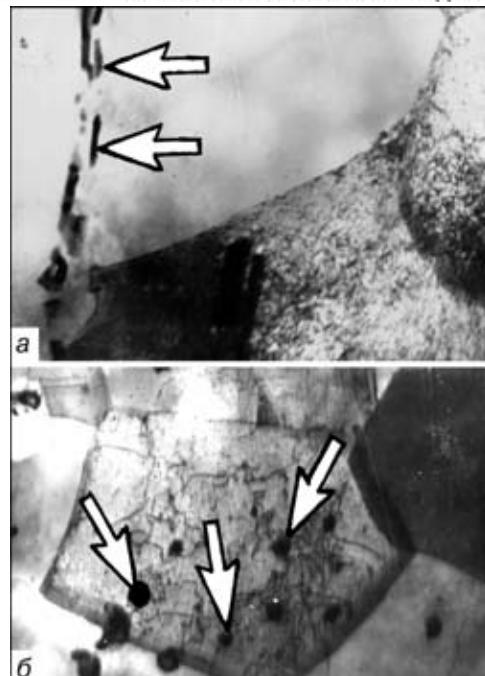


Рис. 6. Изменение характера фазообразования ($\times 20000$) в соединениях Ст3+Al в зависимости от режимов сварки трением: *а* — зерногранничное распределение фаз при условиях горячей деформации в случае конвентионной сварки; *б* — внутриобъемное распределение фаз при теплой деформации в случае инерционной сварки (стрелками показаны формирующиеся интерметаллидные фазы)

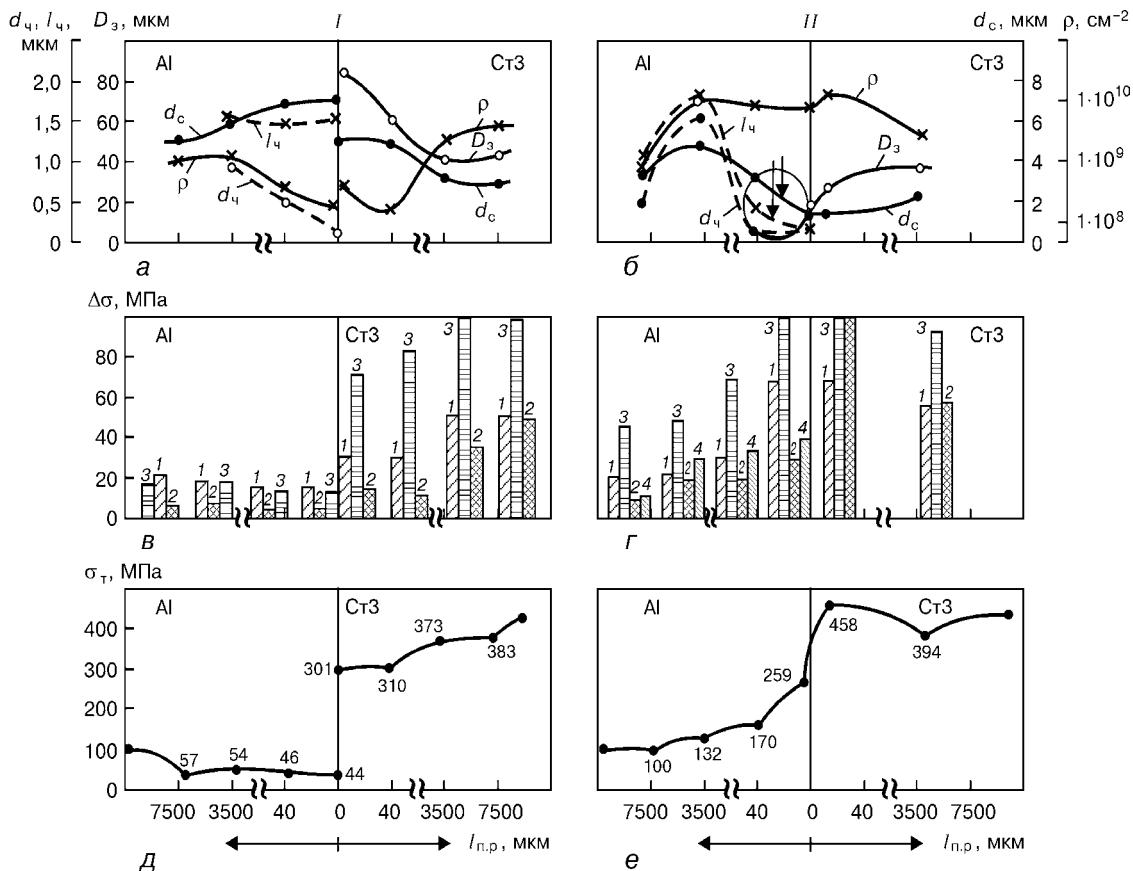


Рис. 7. Структура и свойства соединений Ст3 + Al, выполненных сваркой трением в условиях горячей (*I* — конвентионная сварка) и теплой деформации (*II* — инерционная сварка): *а*, *б* — изменение основных структурных параметров вдоль зоны сварки; *в*, *г* — вклад отдельных структурных параметров в упрочнение различных зон соединения; *д*, *е* — суммарное упрочнение, обусловленное структурой металла сварного соединения: 1—4 — см. обозначения в тексте



дается смена релаксационных процессов и наличие резких градиентов внутренних напряжений. Поскольку в условиях высоких температур преобладают дислокационные механизмы релаксации, реализуемые путем рекристаллизации, полигонизации, то по мере перехода к основному металлу наблюдаются преимущественно ротационные механизмы релаксации – двойникование (как частный случай ротационного механизма), а также материальные повороты более значительных по размеру микрообъемов основного металла. И наконец, в основном металле, где структурные элементы не столь подвержены влиянию повышенных температур, реализуется наиболее жесткий механизм сброса внутренних напряжений, при котором релаксация внутренних напряжений проходит путем трещинообразования [12].

По-видимому, в целях предотвращения возникновения неблагоприятных, с точки зрения свойств структур, необходим контроль верхнего энергетического уровня внешнего воздействия при выборе режимов сварки, исключающих резкое изменение температур и соответственно механизмов релаксации внутренних напряжений.

Что касается неблагоприятных структур другого типа, к которым относятся хрупкие фазы, то формирование интерметаллидных фаз при высокоскоростных способах сварки происходит не только в области контакта свариваемых поверхностей, но и в достаточно широкой переходной зоне. Ее протяженность составляет около 100...150 мкм. При этом отдельные фазовые образования отличаются стехиометрическим составом, твердостью, размерами, характером их распределения. Как видно, условия высокоскоростных способов сварочного деформирования способствуют дроблению и рассредоточению формирующихся интерметаллидных фаз по достаточно широкой переходной зоне сварки. Причем фазы, расположенные ближе к поверхности раздела, отличаются большей твердостью и хрупкостью.

Определено также, что указанные фазы в зависимости от их распределения и морфологических характеристик могут существенно влиять на свойства металла в зоне сварки.

Конкретные количественные оценки изменения предела текучести в зависимости от всех структурных и фазовых параметров (химического состава, размеров зерна и субзерна, плотности дислокаций, размера, морфологии и распределения фазовых образований, и т. п.) подтверждают это предположение [13–22]. На рис. 7 представлены изменения структуры и свойств в соединениях Ст3 + Al, выполненных сваркой трением для условий конвенционной и инерционной сварки.

На рис. 7, *a*, *b* показаны изменения структурных параметров – размеров зерна D_z , субзерна d_c , плотности дислокаций ρ , размеров частиц d_q и расстояния между ними l_q . Рис. 7, *c*, *g* отражает вклад указанных выше структурных и фазовых параметров в упрочнение различных зон соединения непосредственно у поверхности контакта (здесь $\Delta\sigma_c$, $\Delta\sigma_z$, $\Delta\sigma_d$, $\Delta\sigma_q$ – упрочнение соответственно субзеренное, зернограничное, дислокаци-

ционное, дисперсионное за счет частиц ФВ). Суммарное (интегральное) упрочнение, обусловленное структурой металла сварного соединения, показано на рис. 7, *d*, *e*. Более подробные расчеты содержатся в работе [23].

Отметим, что со стороны стали в соединениях, выполненных при условиях теплой деформации (инерционной сварки), снижение прочности не наблюдается. Упрочнение зоны сварки обеспечивается за счет повышения плотности дислокаций $\rho \geq 21\%$, измельчения структуры и субструктур (их суммарный вклад составляет около 35 %) и перлитной составляющей.

При этом со стороны алюминия непосредственно в зоне контакта наблюдается значительное повышение предела текучести σ_t . Основной вклад в упрочнение (относительно уровня прочности основного металла) вносят соответственно измельчение зеренной и субзеренной структур – 105 (95,5 %) и 70 МПа (63,6 %), формирование дисперсных фаз – 40 МПа (36,4 %), а также повышение плотности дислокаций – 30 МПа (27,3 %). Суммарное упрочнение в этой, как правило, ослабленной зоне соединения равно $\sigma_t \geq 260$ МПа, что составляет 227...236 % прочности алюминия в исходном состоянии.

Таким образом, как видно из сопоставления результатов структурных исследований и количественных оценок при режимах сварки, обеспечивающих формирование дисперсных новых фаз, равномерно распределенных по переходной зоне, наблюдается плавное изменение механических свойств в разнородных соединениях по мере перехода от более прочного к менее прочному металлу, что достигается за счет существенного упрочнения соединения со стороны алюминия. Этот эффект обусловлен тем, что алюминий по мере завершения цикла сварки по структурно-фазовому состоянию представляет собой уже практически новый материал, в значительной степени отличающийся от исходного. Структура этого нового материала (алюминия, насыщенного дисперсными частицами фазовых выделений) аналогична структуре композита, что подтверждается его более высокими прочностными характеристиками.

Выводы

1. Использование высокоскоростных способов сварки давлением разнородных металлов приводит к значительному (приблизительно 100...150 мкм) расширению области фазообразования по переходной зоне сварки. Образующиеся новые фазы интерметаллидного, карбидного типа отличаются степенью дисперсности, стехиометрическим составом и твердостью.

2. Характер фазообразования существенно зависит от температурного поля сварочной деформации. Режимы горячей деформации инициируют преимущественно зернограничный характер фазообразования в области сварки со стороны менее прочного металла и способствуют существенному укрупнению фаз, растущих вдоль суб- и межзеренных границ. В случае теплой деформации фор-



мируются новые хрупкие фазы, более дисперсные по размерам, при сравнительно равномерном их распределении во внутренних объемах зерен. Это способствует образованию у более мягких из свариваемых материалов в зоне соединения структуры типа квазикомпозитов и позволяет нивелировать обычно проявляющийся резкий градиент свойств в зоне сварки разнородных металлов.

1. Основы теории сварки давлением / С. Б. Айнбinder, Р. К. Глуде, А. Я. Логинова и др. // Автомат. сварка. — 1964. — № 5. — С. 21–27.
2. Гельман А. С. Основы сварки давлением. — М.: Машиностроение, 1970. — 310 с.
3. Кочергин А. К., Шестаков А. И. Некоторые особенности образования сварного соединения и расчет параметров при сварке давлением // Сварка. — 1968. — Вып. 2. — С. 111–117.
4. Шпрон Р. З., Зелезин В. Н. Термическая обработка и свойства сварных соединений. — Л.: Машиностроение, 1978. — 367 с.
5. Бакши О. А. Теория и практика сварочного производства. — Свердловск: Б. и., 1977. — 110 с.
6. Parameters of explosion welding and strength of joint in cladding stainless steel with different aluminium alloys using an intermediate stainless steel plate / K. Hokamoto, T. Izuma, T. Andoh, M. Fujita // J. Jap. Weld. Soc. — 1993. — № 11. — P. 16–21.
7. Characteristics of behaviour of diffusion in the transition zone of a copper-aluminium joint during friction welding / Y. Itoh, T. Shindoh, M. Saitoh, M. Tezuka // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. A. — 1998. — № 64. — P. 494–499.
8. Abe A. Numerical study of the mechanism of wavy interface generation in explosive welding // JSME Int. J. B. — 1997. — № 40, № 3. — P. 395–401.
9. Структура и свойства титаностального композита, полученного при сварке взрывом / Ю. П. Трыков, В. Н. Арикова, С. А. Волобуев, А. Ф. Трудов // Свароч. пр-во. — 1997. — № 8. — С. 8–11.
10. Структурно-фазовые преобразования в зоне контакта при сварке давлением титана с медью / Л. И. Маркашова, В. К. Сабокарь, В. Н. Замков и др. // Автомат. сварка. — 1995. — № 12. — С. 8–13.
11. Метод препарирования для электронно-микроскопических исследований / Ю. Ф. Даровский, Л. И. Маркашова, Н. П. Абрамов, Т. Г. Таранова // Там же. — 1985. — № 12. — С. 60.
12. Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В. Структурные уровни деформации твердых тел. — Новосибирск: Наука, 1985. — 229 с.
13. Сузуки Х. О пределе текучести поликристаллических металлов и сплавов // Структура и механические свойства металлов. — М.: Металлургия, 1967. — С. 255–260.
14. Эшби И. Ф. О напряжении Орованна // Физика прочности и пластичности. — М.: Металлургия, 1972. — С. 88–107.
15. Гольдштейн М. И., Литвинов В. С., Бронфин Б. М. Металлофизика высокопрочных сплавов. — М.: Металлургия, 1986. — 307 с.
16. Конрад Г. Модель деформационного упрочнения для объяснения влияния величины зерна на напряжение течения металлов // Сверхмелкое зерно в металлах. — М.: Металлургия, 1973. — С. 206–219.
17. Армстронг Р. В. Прочностные свойства металлов со сверхмелким зерном // Там же. — М.: Металлургия, 1973. — С. 11–40.
18. Petch N. J. The cleavage strength of polycrystalline // Iron and Steel Inst. — 1953. — № 173. — P. 25–28.
19. Orowan E. Dislocation in metals. — New York: AIME, 1954. — 103 p.
20. Ashby M. F. Mechanisms of deformation and fracture // Adv. Appl. Mech. — 1983. — № 23. — P. 118–177.
21. Келли А., Николсон Р. Дисперсное твердение. — М.: Металлургия, 1966. — 187 с.
22. Ebelling R., Ashby M. F. Yielding and flow of two phase copper alloys // Phil. Mag. — 1966. — № 13. — P. 805–809.
23. О взаимосвязи структуры и свойств сталялюминиевых соединений, выполненных сваркой трением / Л. И. Маркашова, Г. М. Григоренко, В. В. Арсенюк и др. // Автомат. сварка. — 1998. — № 8. — С. 7–14.

Given are the results of investigation into peculiarities of the processes of mass transfer and phase formation in joints of dissimilar metals, characterised by a limited mutual solubility (Cu+Al, Ti+stainless steel, St.3+Al, etc.), made by pressure joining under the high rates of process loading (friction, percussion and explosion welding)

Поступила в редакцию 26.10.2001



ШЛАМ ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ КАК СЫРЬЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ

П. П. ЛАЗЕБНОВ, канд. техн. наук, Н. Н. ПУЛИНА, инж. (Запорож. нац. техн. ун-т, г. Запорожье)

Показаны преимущества шлама теплоэнергетики перед мрамором, традиционно применяемом в качестве газошлакообразующего компонента сварочных материалов. Установлено путем электрохимических исследований и гравиметрических коррозионных испытаний высокое качество хромоникелевого наплавленного металла и возможность использования шлама в производстве электродов.

Ключевые слова: шлам теплоэнергетики, наплавленный металл, металлографические и электрохимические исследования, петрографический анализ, неметаллические включения, сварочные шлаки, коррозия, механические свойства

Около века в мировой практике мрамор используется в сварочных материалах (электроды, флюсы, порошковые проволоки и др.) в качестве основного газошлакообразующего компонента. В шихте покрытий электродов различных типов его доля достигает 50...57 %. Во флюсы для сварки никеля, меди и их сплавов также вводят до 28 % CaCO_3 . Для нужд промышленности в Украину ежегодно импортируется десятки тысяч тонн данного минерала. В связи с этим весьма актуальным является изучение шламов теплоэнергетики с целью использования их в сварочных материалах.

В настоящей статье изложены результаты проведенных впервые исследований как доказательство правомочности использования шлама водоподготовительных установок (ВПУ) теплоэнергетики в качестве газошлакообразующего компонента в металлургии сварки.

В теплоэнергетике на ТЭС и АЭС для технологических целей применяют воду, глубоко очищенную методом химического обессоливания в ВПУ. Первоначальная обработка — предочистка исходной воды от взвешенных веществ, органических загрязнений, бикарбонатов и кремниевой кислоты — осуществляется коагулированием с последующим отстаиванием и фильтрованием на осветительных фильтрах марок ВТИ-630И, ВТИ-1000И и др. При этом чрезвычайно острой остается проблема утилизации твердых отходов, в частности шламов ВПУ. В отвалы каждой ТЭС (система «Днепроэнерго») ежегодно сбрасывается до 6,5 тыс. т ценного вторичного сырья. Обустройство шламонакопителей связано с дополнительными затратами средств. В народном хозяйстве осваивается промышленное использование шлама для производства строительных материалов, очистки сточных вод электростанций, регенерации извести [1-3]. Однако большая часть данного продукта по-прежнему не находит применения.

Исследован шлам Приднепровской ГРЭС со следующей массовой долей компонентов, %: CaO

43...45; SiO_2 10,4...11,0; MgO 2,6...2,8; FeO 2,5...2,7; Al_2O_3 1,6...1,7; K_2O 0,66...0,73; $\text{Na}_2\text{O} \leq 0,12$; CaCO_3 — остальное. По сравнению с мрамором (ГОСТ 4416-73), используемым в сварочном производстве ($\text{CaCO}_3 \geq 97\%$; $\text{SiO}_2 \leq 0,7\%$; $\text{MgO} \leq 1,0\%$), преимущества шлама очевидны. Анализируемый шлам представляет собой многокомпонентную систему типа $\text{CaCO}_3-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3$, состоящую из основных (CaO , MgO , FeO), кислотных (SiO_2) и амфотерных (Al_2O_3) оксидов, позитивно влияющих на термодинамику и металлургию сварки. Наличие оксидов щелочных элементов (калия, натрия) способствует стабильному горению сварочной дуги, увеличению коэффициентов расплавления и наплавки присадочных материалов, а также благоприятствует десульфурации и рафинированию сварных швов [4-6].

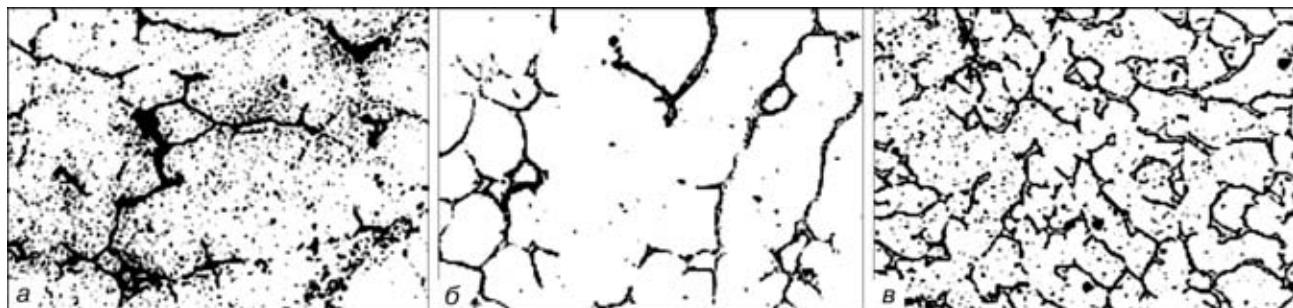
Петрографическое изучение мрамора и шлама позволило получить следующие сведения. Измельченный мрамор, предназначенный для сварочных электродов, представляет собой порошок сероватого цвета, содержащий пылевидные частицы размером ≤ 1 мкм и более крупные (10...95 мкм) преимущественно осколочной формы. Большинство частиц имеет показатели преломления $n_g = 1,658$; $n_p = 1,486$, отвечающие составу чистого кальцита (CaCO_3). У некоторых из них зернистая или полосчатая микроструктура, характерная для мрамора. Таким образом, измельченная порода состоит из различных по размеру и форме частиц кальцита и мрамора.

Уже в исходном состоянии шлам представляет собой порошкообразный компонент с бурой окраской и размером частиц ≤ 60 мкм с постоянным минералогическим составом. Основой его является доломит $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O}\cdot\text{CO}_2$; примеси представлены гидрооксидом железа $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ буровато-красного цвета в результате чего шлам приобретает аналогичную окраску, силикатами натрия $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2$ и калия $\text{K}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2$, а также сложными (неизометрическими) силикатами и кальцитом CaCO_3 . Шлам является в первом приближении аналогом мрамора, но отличается от него стабильным гранулометрическим, минералогическим и химическим составами.



Таблица 1. Химический состав наплавленного металла

№ серии образца	Массовое соотношение мрамора и шлама в электродном покрытии, %	Массовая доля элементов, %								
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	S	P	[O ₂]
1	54:0	0,09	0,69	1,20	18,20	9,60	0,54	0,025	0,029	0,035
2	40:14	0,09	0,72	1,26	18,30	9,58	0,52	0,018	0,028	0,033
3	30:24	0,08	0,67	1,25	18,33	9,62	0,47	0,017	0,026	0,032
4	20:34	0,10	0,70	1,30	18,30	9,60	0,49	0,016	0,026	0,030
5	10:44	0,09	0,75	1,29	18,60	9,55	0,53	0,015	0,019	0,028
6	0:54	0,08	0,76	1,35	18,58	9,62	0,52	0,016	0,020	0,024

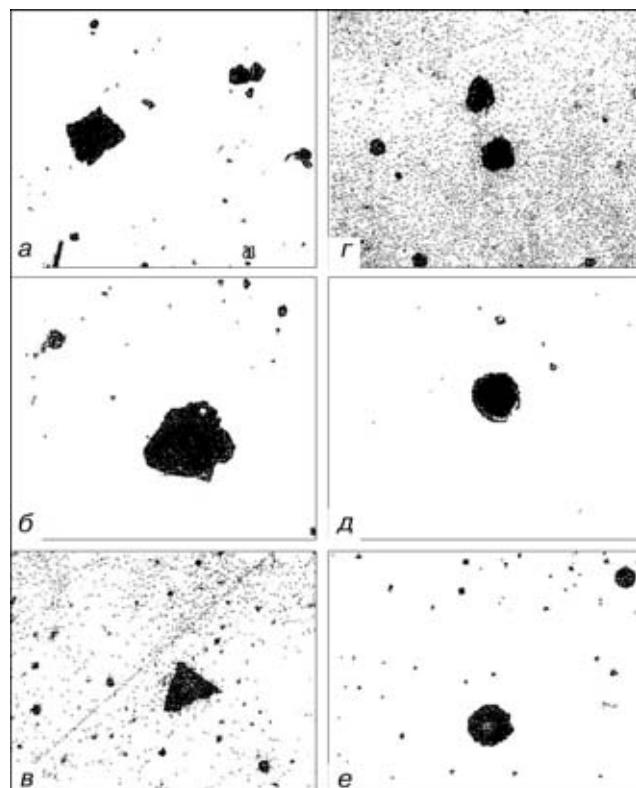
Рис. 1. Микроструктура металла типа 08Х18Н10Б, наплавленного электродами с различным соотношением мрамора и шлама в покрытиях, $\times 500$: а – 54:0; б – 20:34; в – 0:54

Экспериментальный раздел работы включал изготовление электродов фтористо-кальциевого типа, которыми и выполняли сварку пластин 600×100×10 мм из стали 12Х18Н10Т и многослойную наплавку в кристаллизатор. При этом содержание мрамора и шлама в шихте покрытий варьировали в соотношениях 54:0; 40:14; 30:24; 20:34; 10:44; 0:54. Сварочно-технологические свойства экспериментальных электродов такие же, как и у стандартных. Из полученных сварных соединений и наплавленного металла изготавливали образцы для металлографических, металлофизических и электрохимических исследований, коррозионных и механических испытаний.

Металлографические исследования шлифов показали высокое качество сварных швов, благоприятную ориентацию кристаллитов и отсутствие дефектов (поры, трещины и т. д.). У образцов всех серий (табл. 1) наплавленный металл практически одинаков по химическому составу. Однако следует отметить, что по сравнению с образцами серии № 1 в наплавленном металле типа 08Х19Н10Б серии № 6 коэффициенты десульфурации и рафинирования для серы, фосфора и кислорода составляют соответственно 36 и по 31,4 % (относительно образцов серии № 1, наплавленных стандартными электродами). Одновременно несколько увеличился переход в сварочную ванну кремния, марганца и хрома. Эти показатели свидетельствуют о рафинирующем эффекте шлама, поскольку концентрация вредных примесей снизилась на треть по сравнению с та-ковой у эталона.

У образцов серии № 1 (табл. 1) металл имеет характерную аустенитно-ферритную структуру (рис. 1, а). При варьировании соотношения мрамор – шлам в покрытиях (рис. 1, б) и при полном замещении CaCO₃ существенных изменений в структуре не отмечено, хотя в металле швов из

серии № 6 снизились размеры кристаллитов и количество δ-феррита (рис. 1, в). Напротив, при изучении природы неметаллических включений (НВ) выявлены отличия в морфологии, фазовом составе и степени загрязненности сварных швов из серий № 1, 6. В металле образцов, наплавленных электродами с 54 % CaCO₃ в покрытии, включения характеризуются преимущественно угловатой, ре-

Рис. 2. Микроструктура неметаллических включений в наплавленном металле типа 08Х18Н10Б, $\times 1000$: а–д – 54 % CaCO₃; е–ж – 54 % шлама в покрытии электродов



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Таблица 2. Содержание неметаллических включений в металле швов

№ серии образца	Содержание неметаллических включений (индекс J)	Средний размер оксидных включений*, мкм	Количество включений в единице объема $n \cdot 10^6 \text{ мм}^{-3}$
1	0,0219	1,496 / 10,7	4,178
2	0,0189	1,671 / 11,0	3,588
3	0,0174	1,488 / 11,0	3,799
4	0,0179	1,433 / 6,5	3,799
5	0,0180	1,579 / 7,0	2,488
6	0,0172	1,475 / 4,0	3,515

* В числителе приведен средний, в знаменателе — максимальный размер включений, встречающихся при подсчете.

же — остроугольной формой (рис. 2, а–в). Размер НВ составляет 3...5, отдельных — 10...13 мкм. Первые, как правило, однофазные, аморфные отличаются переменными показателями преломления, указывающими на непостоянство химического состава. Более крупные образования имеют зернистую структуру, присущую мрамору. Их оптические свойства, как и у мелких, не всегда отвечают стехиометрическому составу CaCO_3 . На поверхности крупных НВ наблюдаются поры — следы выхода газообразной фазы (CO_2) — либо новообразования — фазы, возникшие в результате вза-

имодействия частиц мрамора с легирующими элементами швов (рис. 2, б, г).

Микрорентгеноспектральным анализом установлено наличие в составе включений кальция и кремния, а в некоторых — хрома, марганца, что указывает на взаимодействие мрамора с металлом. Этот фактор отмечен и при изучении на электронном микроскопе УЭМБ-100К локально выделенных частиц, экстрагированных на углеродную реплику. Установлено, что мелкие частицы CaCO_3 претерпевают полное, а более крупные — частичное превращение, образуя при этом соответственно пленочную и округлую (глобулярную) формы. Пленочные новообразования рассредоточены по границам зерен металла, они аморфные (стекловидные) и не соответствуют стехиометрическому составу. Данные избыточные фазы ухудшают качество металла и способствуют развитию коррозии.

Довольно часто в составе пленочных и глобуллярных НВ встречаются сульфиды, которые иногда выделяются на поверхности частиц мрамора с образованием окиссульфидов. Таким образом, наплавленный металл электрода-эталона в значительной степени загрязнен мелкими и дисперсными включениями, имеющими неблагоприятную пленочную и остроугольную формы. Минералогические фазы в сварных швах электродов с массовой долей шлама 54 % в покрытии (рис. 2, г–е) имеют преимущественно окружную форму и заметно меньшие размеры (1,0...1,5, отдельные — 3...5 мкм). По мере замещения мрамора шламом наблюдается уменьшение общего количества НВ. Кроме того, заметно снижается содержание пленочных включений, а в металле образцов серий № 4, 5 они не обнаружены. Не установлено какого-либо взаимодействия частиц шлама с металлом, что подтверждают данные микрорентгеноспектрального анализа; практически отсутствуют сульфиды. Следует подчеркнуть, что в результате интенсивного взаимодействия частиц шлама и мрамора образуются новые силикаты $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ и алюмосиликаты $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{SiO}_2$, а также фазы нестехиометрического состава изометрической, а не пленочной формы, как в случае с мрамором. В металле образцов серии № 5 к натриевым силикатам и алюмосиликатам добавляются тугоплавкие магнийсодержащие силикаты $\text{CaO}\cdot\text{O}\cdot 2\text{SiO}_2$ и $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$, которые в данном случае преобладают [7]. Количественный анализ включений по ГОСТ 1778-70 (табл. 2) показал, что индекс загрязненности металла образцов серии № 6 снизился на 22 % по сравнению с таковым для образцов серии № 1. Одновременно уменьшились размер и количество неметаллических фаз (до 16 %), что благоприятствует улучшению физико-химических показателей сварных швов [7, 8].

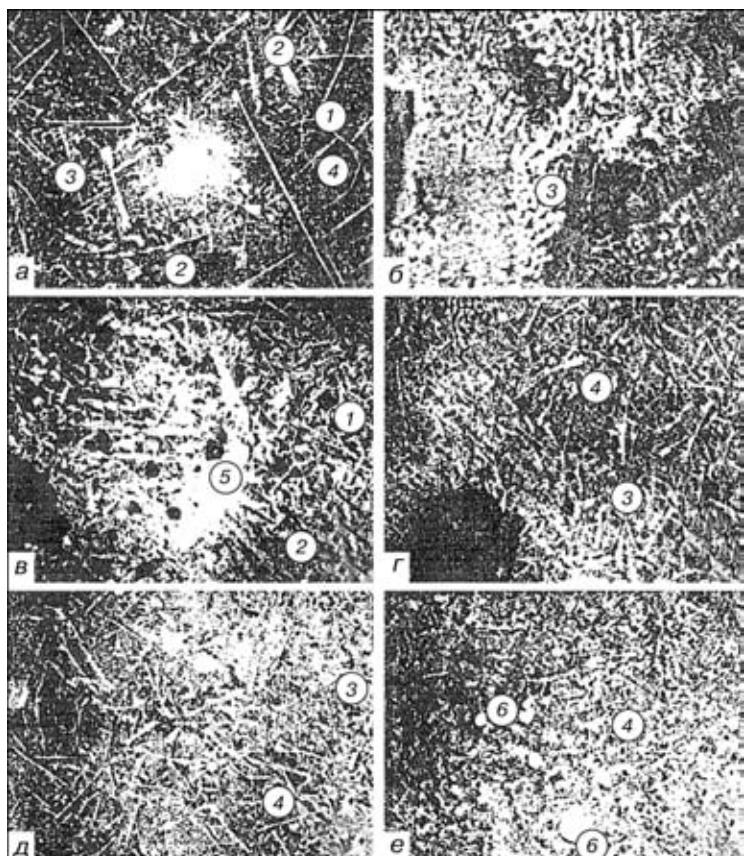


Рис. 3. Микроструктура сварочного шлака электродов фтористо-кальциевого типа, $\times 210$: а — середина шлаковой корки; б — граница раздела шлак—металл; в–д — сложные оксифториды; е — корольки металла на границе металл—шлак; 1 — мелкие темные зерна CaF_2 ; 2 — серые призмы оксифторидов; между 1 и 2 — эвтектическая смесь; 3 — белые иголки и X-образные соединения $\text{CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ с призмами $5\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ на концах; 4 — эвтектика $\text{CaF}_2\cdot p[2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2]\text{CaF}_2$; 5 — Al; 6 — корольки металла (Fe, Cr)



Петрографические методы позволяют определить состав, микроструктуру, образование фаз, установить механизмы их превращений на границе раздела шлак – металл. Сварочный шлак электродоэталона (54 % CaCO_3 в покрытии) представляет собой корочку серого цвета. Прилегающая к шву поверхность эмалевидная, гладкая, местами пористая, а наружная – шероховатая, черного цвета. Высокая скорость кристаллизации при сварке обуславливает получение мелкокристаллического шлака с химической и структурной неоднородностью. Он обладает комплексным составом, не имеет реликтов CaF_2 и CaCO_3 , насыщен металлической фазой и минеральными новообразованиями, что обусловлено физико-химическими процессами обмена, комплексообразованием и т. д. Фазовый состав и микроструктура шлака (рис. 3) представляют собой преимущественно двойную эвтектику из дисперсного CaF_2 и длиннопризматических кристаллитов оксифторидного соединения. Его кристаллы бесцветны, анизотропны, имеют показатели преломления $n_g = 1,60$ и $n_p = 1,59$ – предположительно, это соединение типа $p[2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2]\text{CaF}_2$. Практически весь мрамор покрытия входит в состав оксифторидной фазы в виде CaO , и лишь незначительная часть оксида находится в алюминате кальция. Флюорит присутствует в свободном состоянии и соединениях. В связи с градиентом температур кристаллизации шлака в одних зонах это крупные зерна, дендриты, в других – дисперсная смесь с оксифторидом кальция и корольками металла. Гетерогенность структуры подчеркивает наличие и характер распределения игольчатых и X-образных кристаллов $\text{CaO}\cdot6\text{Al}_2\text{O}_3$ (рис. 3, a, b, г, д). Имеют место и соединения кубической формы $5\text{CaO}\cdot3\text{Al}_2\text{O}_3$, которые образуют сростки с $\text{CaO}\cdot6\text{Al}_2\text{O}_3$ (рис. 3, a, г) и самостоятельные скопления октаэдрических кристаллов (рис. 3, б). По всему объему шлака рассеяны дисперсные корольки металла (рис. 3, е), содержащие следы железа, хрома и никеля.

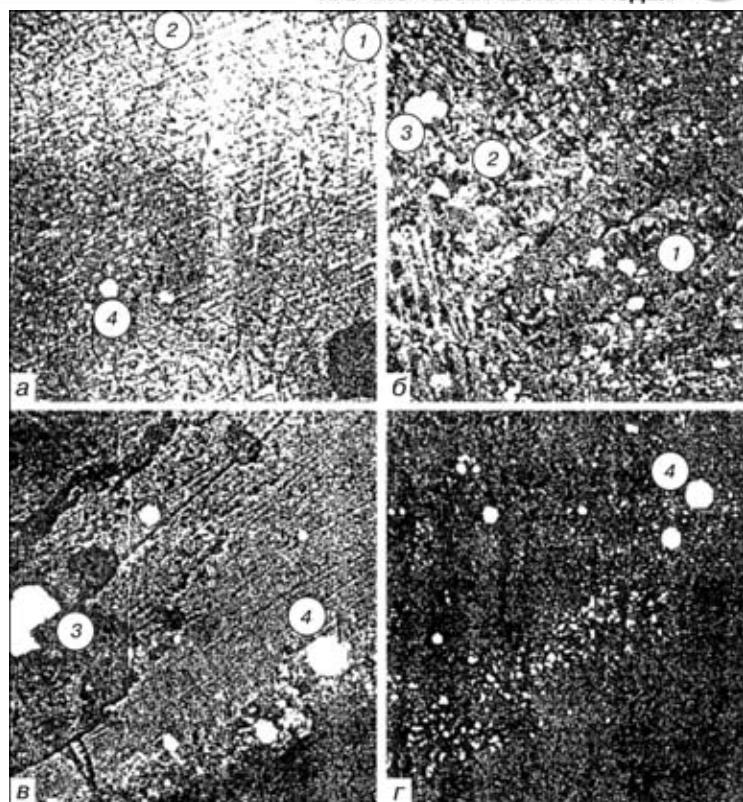


Рис. 4. Микроструктура сварочного шлака электродов со шламом (a, в – 44%; б, г – 54% шлама), $\times 210$: 1 – основное серое поле – двойная эвтектика оксифторида кальция с CaF_2 ; 2 – более темные вкрапления и X-образные дендриты – CaF_2 ; 3 – более светлые (белые) образования прямоугольной формы – шпинель; 4 – круглые – корольки металла; в, г – зона раздела металл – шлак; правый нижний угол – сварной шов

На основании полученных результатов и предшествующих исследований оксифторидных сплавов систем $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaF}_2\text{-Al}$, $\text{CaF}_2\text{-SiO}_2$ [9, 10] механизм химических и фазовых превращений в шлаке можно представить следующим образом:

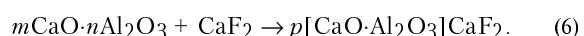
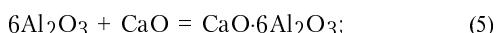
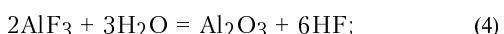


Таблица 3. Коррозионно-электрохимические характеристики наплавленного металла и сварных соединений

№ серии образца	Потенциалы коррозии (30 % NaOH , 140 °C)			Стойкость против МКК		Потери при испытании в растворе, $\text{г}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$		
	$E_{\text{кор}}$, В	$E_{\text{ПО}}$, мВ	$E_{\text{РП}}$, мВ	$E_{\text{кор}}^{\text{ст}}$, В	Метод АМ (ГОСТ 6032-89)	65 % HNO_3 ($t_{\text{кип}}$)	40 % NaOH (150 °C)	5 % HCl ($t_{\text{кип}}$)
1	-1,03	-26	+294	-0,23	Стойкие	0,4507	0,9192	43,09
2	-0,93	-46	+214	-0,22	Нестойкие	0,4912	0,9884	44,13
3	-0,96	-223	+247	-0,24	»	0,5008	0,9750	46,28
4	-0,80	-174	+36	-0,27	»	0,5425	1,1597	46,60
5	-0,80	-10	+160	-0,34	Стойкие	0,4229	0,8759	45,37
6	-0,92	-64	+284	-0,36	»	0,4275	0,9037	42,85

Примечания. 1. Количество образцов в каждой серии равно 5 шт. 2. Величины $E_{\text{кор}}$, $E_{\text{ПО}}$, $E_{\text{РП}}$, $E_{\text{кор}}^{\text{ст}}$ – соответственно потенциалы коррозии установившейся, образования и репассивации пятингов, зарождения МКК. 3. Длительность испытаний составила 144 ч (циклами по 24 ч) в 40 % NaOH и 65 % HNO_3 ; 48 ч (циклами по 24 ч) в 5 % HCl ; 48 ч (циклами по 8 ч) по методу АМ.

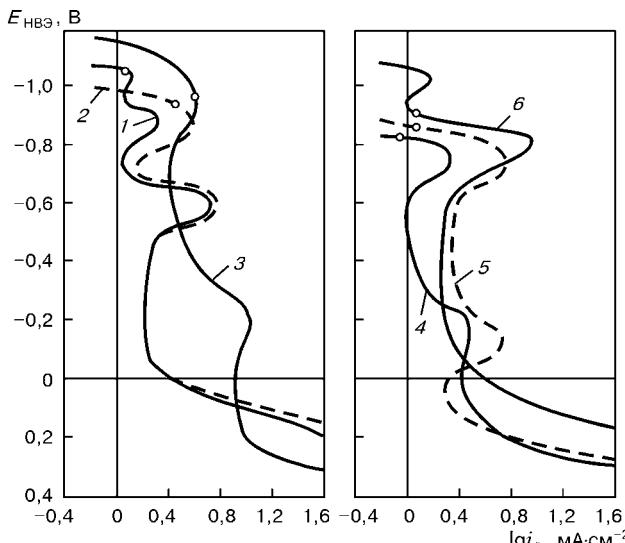
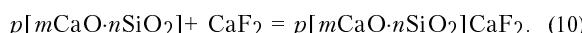
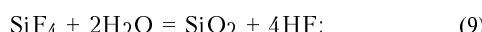


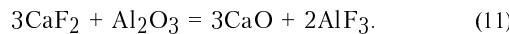
Рис. 5. Анодные потенциодинамические поляризационные кривые наплавленного металла ($30\% \text{NaOH}$, 140°C , $dE/dt = 1 \text{мВ}\cdot\text{s}^{-1}$); номера кривых соответствуют номеру серии образцов (см. табл. 1)

Реакция по уравнению (5) протекает до полного связывания оксидов алюминия и кальция в устойчивые соединения $\text{CaO}\cdot6\text{Al}_2\text{O}_3$ и $5\text{CaO}\cdot3\text{Al}_2\text{O}_3$. Поведение кремния аналогично алюминию — в этом случае имеет место окисление до субоксидов и образование тетрафторидов:



Тройные оксифторидные соединения взаимодействуют между собой с образованием четверного комплекса $p[\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2]\text{CaF}_2$. Данные, полученные на микрорентгеноспектральной установке MS-46, подтверждают наличие в последнем кальция, алюминия и кремния (коэффициенты при оксидах не определены).

Изучение серий образцов шлаков, образующихся при использовании электродов со шламосодержащими покрытиями, показало, что в процессе сварки шлам усвоился полностью (реликты не наблюдаются). Фазовый состав и характер микроструктуры шлака в основном такие же, как у исходного шлака, полученного после сварки электродом-эталоном (рис. 4). Обращает внимание тот факт, что в случаях применения вторичного сырья с высоким содержанием оксида алюминия во всех вариантах (от 14 до 54 % шлама) в составе шлаков отсутствует гексаалюминат кальция. По всей вероятности, оксид алюминия интенсивнее, чем непосредственно алюминий, взаимодействует с фторидом кальция, образуя газообразное соединение:



Различные примеси в шламе и оксиды магния, алюминия, марганца и железа образуют в нем шпинели сложного состава $(\text{Mg}, \text{Al}, \dots)\text{O}\cdot(\text{Al}, \text{Mn}, \text{FeO})_2\text{O}_3$, количество и размер которых возрастают

по мере увеличения добавок исследуемого компонента (рис. 4, *a*, *b*). При использовании покрытий электродов с массовой долей шлама 14, 24 и 34 % образуются шлаки, сходные по составу и микроструктуре. В этих случаях корольки металла (5 мкм) рассредоточены по объему шлаковой корочки. Дальнейшее увеличение добавок шлама до 44 и 54 % вызывает неполное усвоение металлических составляющих электродных покрытий; дисперсные (3...5 мкм) и отдельные крупные (≤ 80 мкм) корольки располагаются у зоны раздела шлак — металл (рис. 4, *в*, *г*).

С целью определения физико-химических свойств, сопоставления роли мрамора и шлама проведен комплекс испытаний наплавленного металла. Результаты электрохимических исследований и оценки физико-механических свойств представлены на рис. 5 и в табл. 3. Анодные потенциодинамические кривые 1 и 2 металлов, наплавленных эталонным электродом и с добавкой 14 % шлама в покрытии, практически идентичны. Они отражают анодный процесс растворения сталей типа 18–10 в растворах гидрооксида натрия и указывают на образование пассивных оксидных пленок на основе железа и легирующих элементов. По мере роста количества шлама (30; 40 %) вид анодных кривых существенно изменяется (образцы серий № 3...5). При этом расширяется область пассивации, исчезают двойные пики активного растворения. На образцах при потенциалах $-(0,15\dots 0,20)$ В возрастает плотность анодного тока, что обусловлено проявлением склонности металла к МКК. Вид кривой для образцов серии № 6 (54 % шлама в покрытии электрода) такой же, как у образцов серии № 1. Отмечен рост плотности тока в области потенциала Фляде и пассивного состояния по сравнению с наплавленным металлом образцов серии № 1. Общим для исследованных сталей является их коррозионное разрушение в области потенциалов активного растворения $-(0,80\dots 1,03)$ В. Данные гравиметрических коррозионных испытаний коррелируют с результатами электрохимических исследований (табл. 3). Коррозионно-электрохимические свойства образцов серий № 1, 6, наплавленных электродами с мрамором и шламом, обусловлены повышением качества металла, отсутствием пленочных включений, морфологией, характером распределения избыточных фаз и улучшением термодинамической стабильности границ зерен.

Образцы всех серий испытывали на склонность к МКК потенциостатическим методом в растворе $10\% \text{H}_2\text{SO}_4 + 0,025 \text{г}/\text{л KCNS}$. Установлено, что межкристаллитная коррозия наплавленных металлов вероятна при потенциале около $-0,75$ В, а стали имеют характерную обширную область пассивного состояния $-0,6\dots 0,2$ В, где браковочные петель анодного тока не обнаружено. Наряду с этим при определении стойкости против МКК по методу АМ (ГОСТ 6032–89) также получены аналогичные данные: все образцы, за исключением серий № 2...4, имеют удовлетворительную стойкость.

Результаты механических испытаний иллюстрируют, что при частичном либо полном замещении

**Таблица 4. Физико-химические свойства наплавленного металла**

№ серии образ- ца	Массовое соотношение мрамора и шлама в электродном покрытии, %	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	$KSCU$, кДж/м ²
1	54:0	542/610	342	26	980/970
2	40:14	540/613	338	27	1050/990
3	30:24	543/610	348	26	1080/995
4	20:34	545/609	345	26	980/980
5	10:44	549/615	342	26	985/976
6	0:54	552/615	343	27	985/990

Примечание. В числителе приведены результаты испытаний наплавленного металла, в знаменателе — металла на линии сплавления.

мрамора в электродных покрытиях показатели прочности металла швов находятся на одном уровне, а пластические свойства несколько возрастают (табл. 4). Выполненные исследования и результаты экспериментов позволяют сделать заключение о конкурентоспособности шлама теплоэнергетики мрамору, являющемуся традиционным газошлакообразующим ингредиентом сварочных материалов.

The paper demonstrates the advantages of thermal power plant slime over marble, which is traditionally applied as a gas-slag forming component of welding consumables. Electrochemical investigations and gravimetric corrosion testing demonstrated the high quality of deposited chromium-nickel metal and the possibility of applying slime in electrode manufacture.

Поступила в редакцию 22.08.2001

Приглашаем принять участие во Всероссийской с международным участием конференции

**«Сварка на рубеже веков»,
посвященной 100-летию со дня рождения Г. А. Николаева
20–21 января 2003 г., Москва**

Организаторы конференции:

*Министерство образования РФ, Министерство промышленности, науки технологий РФ,
Российская академия наук, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ИЭС им. Е. О. Патона*

Тематика конференции:

- сварные конструкции
- оборудование и технология сварки
- диагностика и контроль качества сварных изделий
- подготовка и аттестация персонала

Оргкомитет конференции: ё

президент — Б. Е. Патон, академик, президент НАН Украины;

председатель — И. Б. Федоров, ректор МГТУ им. Н. Э. Баумана;

ответственный секретарь — А. В. Коновалов

Адрес: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, МГТУ им. Н. Э. Баумана.
Тел./факс: (095) 261 4257, тел.: (095) 263 6802, (095) 263 6742
E-mail: avk@bmstu.ru



Наши представления о распределении тепловых источников, теплообмене и о гидродинамических явлениях в сварочной ванне пока еще очень слабо развиты. В этом отношении опубликованная ранее в нашем журнале статья Г. И. Лескова и С. В. Пустовойта «К вопросу построения динамической модели сварочной ванны при электродуговой сварке» («Автоматическая сварка», 2001 г., № 1, с. 11–15) представляет собой шаг вперед. Некоторые положения, принятые в статье, оспариваются С. В. Гулаковым и Б. И. Носовским, авторами ниже публикуемой статьи.

Учитывая сложность проблемы и важность правильного понимания физических явлений, происходящих в ванне, редакция решила публикацию статьи С. В. Гулакова и Б. И. Носовского сопроводить ответом на нее Г. И. Лескова и С. В. Пустовойта. Редакция не намерена далее продолжать на страницах журнала дискуссию между упомянутыми авторами до получения и изучения новых сведений, необходимых для построения физической модели сварочной ванны.

Одновременно надеемся, что опубликованные статьи привлекут внимание исследователей к этой сложной и важной проблеме.

От редакции

УДК 621.791.75

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

С. В. ГУЛАКОВ, д-р техн. наук, Б. И. НОСОВСКИЙ, канд. техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Проведен анализ статической и динамической моделей сварочной ванны, выявивший их противоречия и недостатки. Приведены расчетные и экспериментальные данные, позволившие оценить условия формирования сварочной ванны при дуговой сварке плавящимся электродом.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварочная ванна, жидкая прослойка, потоки жидкого металла

Построение моделей формирования сварочной ванны в настоящее время является весьма актуальной проблемой. Использование таких моделей в исследовательской и практической деятельности позволяет детально изучать процессы образования качественных сварных соединений, прогнозировать их параметры и управлять ими. Однако для получения достоверных результатов необходимо тщательно проверять корректность этих моделей.

В этой связи, исходя из результатов работы [1], считаем необходимым высказать свое мнение по поводу рассматриваемого вопроса.

В первую очередь проанализируем известную квазистатическую осесимметричную модель сварочной ванны. В основу ее построения положены предположения о том, что тепло от источника энергии передается в глубь металла благодаря его теплопроводности, граница раздела поверхности плавления и затвердевания — прямая линия, которая совпадает с плоскостью, проходящей через ось электрода и максимумы глубины и ширины сварочной ванны [2].

Вызывает сомнение достоверность предположения о пространственной устойчивости жидкого металла ванны, схема которой приведена на рис. 1, а условие устойчивости описано равенством (2) в работе [1]. Последнее может быть верным при наличии в передней части сварочной ванны трех стенок,держивающих жидкий металл растекания. В реальных условиях без этого жидкый металл не поднимется на высоту $h + h_B$, вычисленную

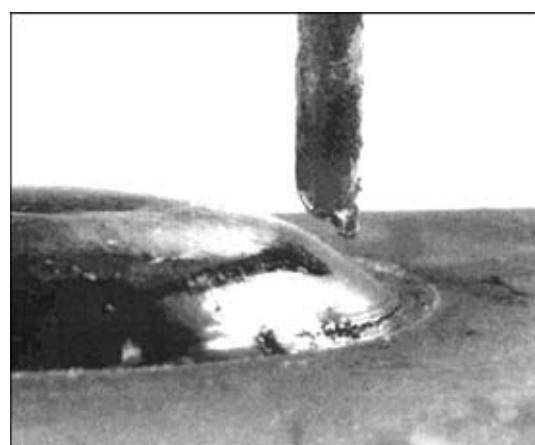


Рис. 1. Расположение торца электрода относительно сварочной ванны



из указанного равенства, а будет растекаться за дугой. Такую стенку, подпирающую жидкий металл, может создать плазменный поток дуги, отраженный от дна ванны. Но в этом случае в упомянутое выражение следует внести корректизы, поскольку энергия плазменного потока будет затрачиваться не только на то, чтобы вытеснить и поднять жидкий металл в хвостовую часть кратера, но и чтобы его удержать вблизи задней стенки затвердевающего металла. Кроме того, как отмечено в работе [1], этот поток должен направить жидкий металл не только в хвостовую часть кратера сварочной ванны, но и в другие стороны, в том числе вперед дуги.

При сварке плавящимся электродом в сварочную ванну, кроме плазменного потока, поступает поток жидкого электродного металла. В рассматриваемой схеме не учтена работа этого потока в формировании кратера ванны в зоне горения дуги (плотность потока по данным, приведенным в обсуждаемой работе, на пять порядков выше, чем в плазме дуги).

Возникают также проблемы, связанные с расплавлением передней стенки кратера излучением столба дуги. По данным работы [3], энергия, выделяемая в столбе дуги, составляет при сварке под слоем плавленого флюса всего 15...20 % общего количества энергии, выделяемой в дуге. Эффективность светового излучения в нагреве окружающей среды невелика. Поэтому обеспечить интенсивный разогрев передней стенки кратера и ее расплавление со скоростью сварки маловероятно. Подтверждением этому являются данные работы [4], свидетельствующие о том, что в непосредственной близости от столба дуги под действием ее излучения не плавится даже флюс.

Относительно свойств слоя жидкого металла под дугой, являющегося якобы теплоизолятором, можно отметить следующее: жидкий металл подвижен и способен при перемещении транспортировать тепло из одной области в другую со скоростью, во много раз превосходящей скорость передачи тепла благодаря теплопроводности. Для оценки эффективности тепломассопереноса в сварочной ванне с помощью теплопроводности и потоков жидкого металла следует сравнить размеры и форму реальной сварочной ванны [5, 6] с ванной, параметры которой рассчитаны по теории теплопроводности.

Изложенные факты не позволяют считать квазистатическую модель сварочной ванны корректной и применимой для анализа процессов формирования сварных швов.

Автор работы [1], приняв за основу результаты исследований, проведенных другими авторами, сделали попытку на базе объема информации с помощью теории теплопроводности построить динамическую модель сварочной ванны. Причем последующая проверка этой модели с помощью практических экспериментов проведена не была (во всяком случае, информация об этом в статье отсутствует).

Что касается сути проблемы, то, вероятно, следует остановиться на вопросах, которые являются

основными для построения динамической модели сварочной ванны: процессы плавления передней стенки кратера и силы, вызывающие движение жидкого металла по ней; наличие жидкой прослойки в сварочной ванне под дугой, ее форма и размеры; расположение оси электрода относительно формирующейся сварочной ванны; геометрическая форма сварочной ванны при дуговой сварке плавящимся электродом; характер оплавления торца электрода при дуговой сварке; размеры и положение столба дуги, горящей под слоем флюса.

В работе [7] приведены данные, произведены расчеты, показывающие, что ось электрода не располагается над максимумом глубины проплавления сварочной ванны, а находится в непосредственной близости от ее передней кромки (рис. 1). Указанный эффект можно наблюдать и на рис. 3 из работы [1]. Существенным фактором является то, что в большинстве случаев максимумы ширины сварочной ванны и ее глубины не совпадают (не находятся в одной плоскости) [5], а форма границы, отделяющей зону плавления от области затвердевания, отличается от прямой линии и в основном бывает либо выпуклой, либо вогнутой [8, 9]. А если учесть, что глубина ванны часто не бывает равна половине ее ширины (см., например, рис. 1 из [5]), то утверждение авторов работы [1], о том, что «...сечение последней плоскостью симметрии, формируемой осью движущегося электрода, представляет собой кривую с примерно одинаковым радиусом кривизны R_c с центром на торце проволочного электрода ...», является неверным.

Авторы работ [10 и др.], определявшие экспериментально толщину жидкой прослойки, допускали, что высокотемпературная tantalовая вставка плавится только дугой, а не жидким металлом. В действительности при дуговой сварке под слоем флюса tantalовая и даже вольфрамовая вставки растворяются в жидком металле сварочной ванны. Вследствие этого измеренная указанным в работе [10] способом толщина жидкой прослойки оказалась значительно меньше реальной [7]. В работе [7] также рассчитаны размеры длины столба дуги с использованием данных [3] о распределении энергии в сварочной дуге. В соответствии с ними длина дуги, горящей под слоем плавленого флюса при параметрах режима, приведенных в статье, составляет около 2 мм. Как следует из работы

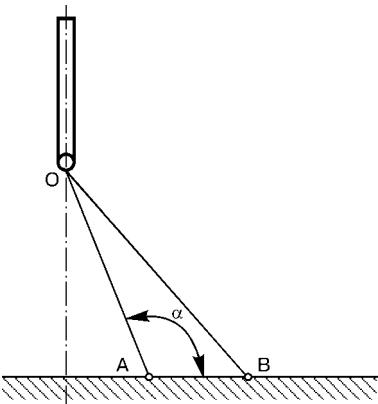


Рис. 2. Схема расчета положения дуги (объяснения см. в тексте)



[1], расстояние R_c (см. рис. 2) должно быть на порядок больше. В противном случае приведенная схема некорректна.

Для оценки формы и размеров каверны (газовой полости, образованной силовым действием дуги) в жидким металле ванны под дугой был проведен следующий эксперимент. В процессе наплавки валика на пластину на режимах, указанных в работе [7], осуществляли выплеск металла ванны по методике, описанной в [11], и определяли объем выплеснутого металла путем взвешивания материалов, участвовавших в наплавке, до эксперимента и после выплеска. Затем, взяв пластилин в объеме, равном объему выплеснутого металла, поместили его в полость сварочной ванны, образовавшуюся после выплеска жидкого металла. Однако объем пластилина был на столько большим, что получить каверну формы и размера, указанных в работах [1, 10], обеспечив при этом образование тонкой прослойки в области максимальной глубины проплавления, не удалось. В этой связи предложена модель заполнения сварочной ванны жидким металлом, приведенная на рис. 1 в работе [7].

Поскольку электрод в процессе дуговой сварки находится практически у передней кромки сварочной ванны, то распределение тока будет соответствовать данным работы [12]. Как утверждают авторы работы [1], пространственное положение дуги, горящей под слоем флюса с вертикального или расположенного под углом электрода, вряд ли можно определить с помощью рентгеновской съемки. По контрастности или плотности изображения плазма дуги и газ околодугового пространства не отличаются и на рентгеновском снимке не различимы.

Характер оплавления торца электрода со скосом его передней части, который принят для построения динамической модели, также вызывает сомнение. Примером тому являются рентгеновские снимки, приведенные в работе [13], где скос торца электрода имеет противоположное направление.

Авторами работы [1] предложена методика расчета распределения мощности в дуге в кратере по форме его передней стенки и на рис. 4 приведена расчетная схема. Из этого рисунка и выражения (4) совсем не следует, что дуга не может гореть вертикально. В соответствии с указанным рисунком угол наклона дуги к свариваемой поверхности α будет минимальным при горизонтальном положении дуги (дуга горит на переднюю кромку), а не при ее вертикальном, как утверждают авторы [1]. Это полностью перечеркивает все дальнейшие

рассуждения об адекватности предлагаемой модели. По рис. 2 возникают вопросы: что за линия r , исходящая из точки A , изображена на нем? Почему именно относительно нее измеряется угол α ? В какой области электрода располагается ее окончание и почему?

Для определения пространственного положения дуги нами предложена следующая методика. В соответствии с ней осуществляется дискретное смещение электрода на регламентированное расстояние c , измеряется амплитуда приращения напряжения на дуге ΔU_d в момент смещения и напряжение на дуге U_d перед смещением и последующей математической обработке результатов измерения. Суть методики иллюстрирует рис. 2, где отрезками $0A$ и $0B$ условно показаны соответственно оси симметрии столба дуги до смещения электрода относительно изделия и в первый момент после смещения. Зная длину дуги до и после смещения (на схеме показано смещение изделия относительно электрода на расстояние $AB = c$), а также это смещение c , можно по трем сторонам треугольника $A0B$ определить угол наклона дуги к свариваемой поверхности α .

Длину дуги до и после смещения можно найти из следующих выражений:

$$L_d(0A) = \frac{U_d - (U_a + U_k)}{E_d}, \quad (1)$$

$$L_d(0B) = \frac{U_d + \Delta U_d - (U_a + U_k)}{E_d}, \quad (2)$$

где U_d — напряжение на дуге, В; U_a , U_k — приэлектродные падения на дуге соответственно на аноде и катоде, В; ΔU_d — приращение напряжения на дуге при смещении электрода или изделия на расстоянии c ; E_d — градиент падения напряжения в столбе дуги (приведен в литературных источниках, например [3], В/мм).

Тогда

$$\alpha = \arccos \frac{[U_d - (U_a + U_k)]^2 + E_d^2 c^2 - [U_d + \Delta U_d - (U_a + U_k)]}{2cE_d[U_d - (U_a + U_k)]}. \quad (3)$$

Учитывая, что $U_d - (U_a + U_k) = U_c$ (здесь U_c — падение напряжения на столбе дуги), уравнение (3) можно упростить

$$\alpha = \arccos \frac{U_c^2 - (U_c - \Delta U_d)^2 + E_d^2 c^2}{2cU_c E_d}. \quad (4)$$

Приращение напряжения на дуге в момент дискретного смещения электрода относительно изделия определяли с помощью электронно-лучевого осциллографа: на его входе включали дифференцирующее звено, выделяющее только переменную составляющую напряжения на дуге — амплитуду приращения этого напряжения.

Измерения показали, что в исследованном диапазоне значений параметров режима сварки ($U_d = 27 \dots 40$ В; $I_d = 400 \dots 800$ А; $v_{cb} = 0,3 \dots 1,5$ см/с) и при угле наклона электрода к наплавляемой поверхности от 30 до 90° дуга практически не отклонялась от нормали к этой поверхности. Под-



Рис. 3. Характер оплавления торца электрода



тверждением этому является характер оплавления торца электрода (рис. 3), которое происходило параллельно этой поверхности при изменении угла наклона оси электрода.

Из результатов проведенных авторами исследований и указанных выше материалов следует, что природа формирования передней стенки кратера сварочной ванны отличается от описанных ранее как статической, так и представленной в статье [1] динамической модели.

Если форму сварочной ванны, распределение в ней жидкого металла и ориентацию электрода относительно нее представить в виде схемы, приведенной на рис. 4, то процесс формирования ванны может происходить следующим образом.

Элементарный объем металла dV за время dt , получая запас кинетической энергии, а также энергии в виде переданного объему металла тепла, начинает двигаться в потоке жидкого металла со скоростью v вдоль передней стенки кратера, совершая работу по ее расплавлению и преодолению сопротивления среды. При этом перемещение передней стенки ванны в направлении вектора скорости сварки (переход ее из твердого состояния в жидкое) происходит не только за счет ее плавления, но и за счет растворения [7] и размытия. По мере расхода запаса энергии интенсивность расплавления передней стенки уменьшается, и в нижней точке ванны (по ее оси) начинается процесс затвердевания металла ванны и формирование шва.

Таким образом, введенная в головную часть сварочной ванны энергия будет транспортироваться в ту сторону, куда направлены потоки жидкого металла, формируемые внешними силами. Энергию, выделяемую в дуге и передаваемую основному металлу, можно считать сконцентрированной в активном пятне дуги (катоде при обратной полярности), расположенным в головной части сварочной ванны на ее поверхности вблизи передней кромки. Затем эта энергия (в основном потенциальная, тепловая и кинетическая — в виде скоростного потока среды) транспортируется в различные точки объема ванны преимущественно потоками жидкого металла. В формировании последних активное участие, кроме электромагнитных и других сил, действующих непосредственно на жидкий металл ванны, принимают потоки плазменный дуги и жидкого электродного металла (в виде капель при капельном переносе или струи — при струйном). Направление потоков и их характер в процессе формирования сварочной ванны в процессе дуговой сварки описаны в работе [6]. Эти данные свидетельствуют об участии в возникновении и интенсификации потоков в сварочной ванне металла плавящегося электрода, который движется под действием сил тяжести кинетической энергии перемещающегося электрода, электромагнитных и других сил.

В поле гравитации струя или капля металла, оторвавшаяся от электрода, будет двигаться с ускорением в дуговом промежутке и к моменту входа в ванну приобретет определенную скорость:

$$v = v_0 + \sqrt{2gh} + \frac{1}{m} \int F(t) dt, \quad (5)$$

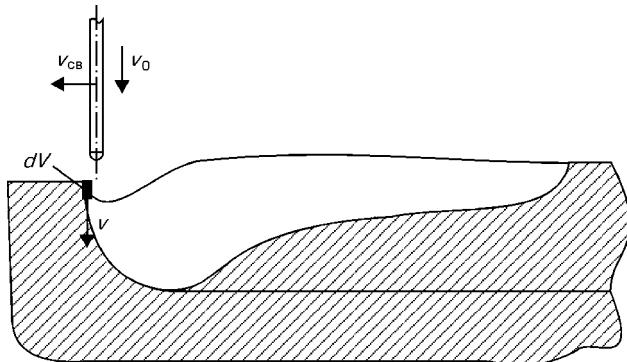


Рис. 4. Форма сварочной ванны в продольном сечении (см. объяснения в тексте)

где v_0 — скорость подачи электрода; g — ускорение в поле гравитации; h — длина дуги; m — масса капли; $F(t)$ — закон распределения электромагнитных, газодинамических и других сил вдоль дуги, действующих на каплю или струю электродного металла; t — текущее время полета капли в дуговом промежутке.

Необходимо отметить, что при равных сварочных токах скорость подачи электрода возрастает с уменьшением его диаметра. Следовательно, будет увеличиваться и начальная скорость капли или струи электродного металла в сварочной ванне.

В то же время известно, что уменьшение диаметра электрода при постоянном значении тока вызывает увеличение глубины проплавления [7].

Диаметр электрода в свою очередь оказывает существенное влияние на характер переноса электродного металла в ванну, определяющего условия его взаимодействия с поверхностью ванны, а следовательно, и его роль в формировании потоков в ней.

При крупнокапельном переносе капля, имеющая большую площадь соприкосновения с поверхностью ванны, должна преодолеть силы поверхностного натяжения. При этом происходит потеря ее кинетической энергии на образование поверхностных колебаний. В случае струйного переноса электродного металла поверхность контакта струи с ванной незначительна. При этом плавящийся металл электрода свободно проникает (вливается) в глубь ванны, создавая в ней поток, который движется с большой скоростью, обеспечивая интенсивный перенос тепла ко дну ванны и увеличивая ее глубину.

Плазменный поток дуги, воздействуя на поверхность сварочной ванны, не может проникнуть (в большинстве случаев при качественном формировании сварного шва) в ее глубину из-за малой плотности плазмы по отношению к плотности жидкого металла. Он растекается по поверхности ванны, деформируя ее и создавая в ней поверхностные потоки. Соотношение интенсивностей этих потоков (осевого глубинного и поверхностного) определяет условия тепло- и массопереноса в сварочной ванне, и соответственно влияет на основные геометрические параметры и качество формирования сварного соединения.

1. Лесков Г. И., Пустовойт С. В. К вопросу построения динамической модели сварочной ванны при электродуговой сварке // Автомат. сварка. — 2001. — № 1. — С. 11–15.



2. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением. — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.
3. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга. — М.: Машгиз, 1970. — 335 с.
4. Исследование процесса плавления флюса дугой / С. В. Гулаков, Б. И. Носовский, И. В. Тарасенко, И. С. Псарева // Автомат. сварка. — 2001. — № 8. — С. 25–27.
5. Гулаков С. В., Носовский Б. И. Особенности формирования сварочной ванны // Там же. — 1981. — № 11. — С. 32–35.
6. Гулаков С. В., Носовский Б. И. Влияние переноса тепла потоком жидкого металла на форму сварочной ванны // Свароч. пр-во. — 1982. — № 10. — С. 2–3.
7. Гулаков С. В., Носовский Б. И. О передаче тепла от источника к фронту плавления через жидкий металл сварочной ванны // Там же. — 1982. — № 6. — С. 5–6.
8. О границе раздела фронтов плавления и затвердевания в сварочной ванне / С. В. Гулаков, Б. И. Носовский, И. С.
9. Кулябина и др. // Вестн. Приазов. гос. техн. ун-та: Сб. науч. тр. — Мариуполь, 1998. — Вып. № 6. — С. 246–247.
10. Размышляев А. Д., Лещинский Л. К., Нестеренко К. А. Распределение толщины прослойки жидкого металла по длине кратера сварочной ванны // Автомат. сварка. — 1975. — № 12. — С. 62–63.
11. Гулаков С. В., Носовский Б. И. Устройство для удаления жидкого металла из сварочной ванны // Там же. — 1980. — № 10. — С. 75.
12. Райчук Ю. И. Распределение тока по пластине при дуговой сварке // Там же. — 1967. — № 4. — С. 19–22.
13. Гребельник П. Г. Рентгеноследование процесса автоматической сварки под флюсом // Там же. — 1950. — № 6. — С. 18–29.

Analysis of statistical and dynamic models of the weld pool was conducted. It revealed discrepancies and drawbacks of these models. Calculated and experimental data are given, allowing estimation of conditions of formation of the weld pool in MIG welding.

Поступила в редакцию 28.06.2001

Ответ Г. И. Лескова, С. В. Пустовойта

В приведенной статье повторно излагаются представления авторов о сварочной ванне при сварке с глубоким (10...13 мм) проплавлением, опубликованные в журнале «Свароч. пр-во» № 6 за 1982 г.

На рис. 4 авторы изображают ее примыкающей по всей глубине к передней стенке, которая в процессе сварки, по их мнению, плавится, «расстворяется и размывается» жидким металлом, нагреваемым дугой в верхней ее части.

Подобная ситуация, несложная для визуального наблюдения, фотографирования и рентгенопросвечивания не наблюдалась ни одним исследователем. Авторы ее также вряд ли видели. Приведенная ими фотография поверхности ванны (рис. 1) получена после погасания поверхностной дуги, когда заметен даже неглубокий кратер.

В действительности, как показали многочисленные эксперименты [1–3], при погруженной дуге жидкую ванну оттесняет к застывающему концу, активное пятно и столб дуги полностью или частично погружаются в кратер и более эффективно оплавляют дно ванны и ее переднюю кромку. Эти важные особенности сварочной ванны приведены во всех монографиях и учебниках по дуговой сварке.

Однако природа сил, вызывающих появление кратера и вытеснение жидкого металла в заднюю часть ванны, до настоящего времени дискуссионна. Существуют разногласия и о форме энергии, плавящей переднюю стенку кратера — излучением столба дуги или тепловым потоком, окружающим активное пятно дуги. Не рассмотрены физические явления, вызывающие движение расплавленного металла от передней стенки кратера в зону более высокого давления в его нижней части, и равновесие ванны в динамическом режиме.

В нашей статье [4] предпринята попытка анализа этих явлений. При этом мы опирались на экспериментальные данные различных исследова-

телей и фундаментальные законы физики, в том числе гидро- и газодинамики.

Предлагая свою «модель» ванны, авторы предварительно проанализировали исходные положения и методы этого анализа. Критические замечания всегда полезны для совершенствования представлений о слабо изученных явлениях, поэтому мы рассмотрим их подробно.

1. Сечение плавящейся передней стенки кратера плоскостью симметрии ванны, наблюдаемое при сварке с глубоким проплавлением, считается не верным. Нами оно принято по результатам наблюдения этой стенки многими исследователями после удара ванны.

2. Ошибочными считаются заложенные в анализ данные о толщине жидкой прослойки на передней стенке и дне кратера, взятые нами из экспериментальной работы [5]. Для их опровержения авторы статьи поставили собственный эксперимент, подержав tantalовый индикатор ($T_{пл} = 2996^{\circ}\text{C}$) в жидкой стали 3 и 6 с, чтобы обнаружить его растворение, не учтенное в работе [5].

Полученный результат совпадает с данными [5] и принят в нашем анализе. Растворение индикатора не обнаружено. Его высота осталась неизменной.

3. Опыт авторов с заполнением выплеснутой ванны пластилином, якобы показывающий отсутствие в ней «каверны» и подтверждающий их «модель», не вызывает доверия. Кратер и газовая полость между электродом и его передней стенкой всегда существуют, и технологией сварки предусматривается его заварка в конце шва. Свои сомнения о ценности рентгеновских снимков при определении положения дуги авторы, надеемся, снимут после рассмотрения их в работе [1]. Главная ценность этих снимков — доказательство существования кратера при сварке под флюсом, а также отторжение любых «моделей», отрицающих этот факт.



4. Предложенная нами методика и результаты расчетов распределения мощности дуги по передней стенке кратера, опирающаяся на экспериментальные данные о равенстве скоростей плавления всех элементов передней стенки кратера, по мнению авторов, «перечеркивают все дальнейшие рассуждения об адекватности предлагаемой модели».

Нами показано, что постоянство указанных скоростей будет обеспечено, если время Δt пребывания блющающего пятна дуги на элементах ds передней стенки пропорционально $\sin \alpha = ds/df$. Элементарные части ds и df передней стенки в нижних и верхних ее частях четко обозначены на рис. 2. Внимательный читатель увидит, что в нижней части кратера $df >> ds$, поэтому $\sin \alpha$ и Δt близки к нулю. В верхней же части $df \approx ds$, поэтому значение $\sin \alpha$ и Δt максимальны. На этой основе и сделан вывод о различном времени пребывания активного пятна дуги в зонах передней стенки — максимальном в верхней и минимальной в нижней. «Перечеркивать» этот вывод не следует.

5. Оценка сил и давлений, действующих на расплавляемый металл передней стенки кратера и смещающих его вниз, произведен на основе экспериментальных данных о том, что протекает 70 % тока дуги на эту стенку и уравнений Ампера и Био-Савари. Их интегрирование, применение в расчетах напряженности магнитного поля и электромагнитных сил общезвестны. Поэтому мы не считали необходимым объяснять, что dl — элемент проводника с током, r — радиус-вектор, β — угол между радиусом-вектором и направлением тока и т. д. В статье указаны принятые нами пределы интегрирования уравнения Био-Савари. Поэтому замечания авторов «что за линия r , в какой области располагается ее окончание, ...» в научном журнале неуместны.

6. Оценка глубины кратера произведена, опираясь на второй закон Ньютона, молекулярно-кинетическую теорию газов и экспериментальные данные о скорости плазмы в столбе конусной дуги 100...500 м/с. Приняв ее значение 330 м/с, среднюю температуру $5 \cdot 10^3$ К, радиус корня шва 3 мм и глубину 1 см, изменение направления движения плазмы в кратере на $\pi/4$ с помощью расчета найдена сила, действующая на дно кратера, достаточная для его углубления на указанную величину.

Свои сомнения о возможности данного явления авторы могут проверить, подув на воду через трубочку. Углубление вызывается изменением количества движения любой струи, а не плотностью жидкости и плазмы. Условия динамического равновесия ванны и ее частей проанализированы на основе закона о движении идеальной жидкости и уравнения Бернулли.

Таким образом, модель сварочной ванны, предложенная С. В. Гулаковым и Б. И. Носовским, не имеет экспериментального подтверждения. Критические замечания в адрес опубликованной динамической модели несущественны, хотя она представляет лишь первую попытку ее построения. Для развития этой модели необходимо расширение и обобщение экспериментов.

1. Автоматическая сварка под флюсом. — К.; М.: Машгиз, 1948. — 344 с.
2. Рыкалев Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз. — 1951. — 296 с.
3. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машгиз, 1974. — 768 с.
4. Лесков Г. И., Пустовойт С. В. К вопросу построения динамической модели сварочной ванны при электродуговой сварке // Автомат. сварка. — 2001. — С. 11–15.
5. Распределение толщины прослойки жидкого металла по длине кратера сварочной ванны / А. Д. Размышляев, Л. К. Лещинский и др. // Там же. — 1975. — № 12. — С. 62–63.



СВАРКА КРУПНОГАБАРИТНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ НА МОНТАЖЕ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ КРИОГЕННЫХ ПРОДУКТОВ

Чл.-кор. НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО, Г. Г. МОНЬКО, Т. М. СТАРУЩЕНКО**, кандидаты техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Б. О. БЕЛОРОУСЕЦ, инж. (НПО «Криогенмаш», г. Балашиха, РФ),
А. С. НАУМОВ, инж. («Кислородмонтаж», г. Москва, РФ)

Предложены и реализованы способы сборки, монтажа и сварки крупногабаритных сферических изотермических резервуаров криогенного назначения, обеспечивающие максимальное сокращение объема сборочно-сварочных работ. При этом достигается повышение эффективности механизированной сварки и производительности труда, а также сокращение сроков строительства.

Ключевые слова: изотермические резервуары, криогенные продукты, сборка, монтажная сварка, автоматическая сварка, стабильно аустенитная сталь, повышенная прочность, инвар, трубопроводы

В современной авиакосмической технике в качестве ракетного топлива широко используются сжиженный кислород, азот, водород, гелий. В сжиженном состоянии газы имеют минимальный объем. Их хранят в специальных резервуарах различной формы. Транспортировка сжиженных газов может быть осуществлена на достаточно большие расстояния по трубопроводам либо транспортными средствами.

С целью обеспечения эксплуатации полигонов необходимы специальные системы хранения этих газов. Наиболее надежный способ их хранения

— крупногабаритные сферические изотермические резервуары.

ИЭС им. Е. О. Патона совместно с НПО «Криогенмаш» и другими организациями Минмонтажспецстроя Российской Федерации был выполнен комплекс работ по строительству крупногабаритных сферических изотермических резервуаров вместимостью 1400 м³. Мировая практика резервуаростроения не располагала опытом сооружения подобных резервуаров.

В соответствие с Проектом НПО «Криогенмаш» предусмотрено создание изотермического комплекса, состоящего из двух концентрически расположенных оболочек резервуара: внутренней — диаметром 14 м, выполненной из высоколегированной

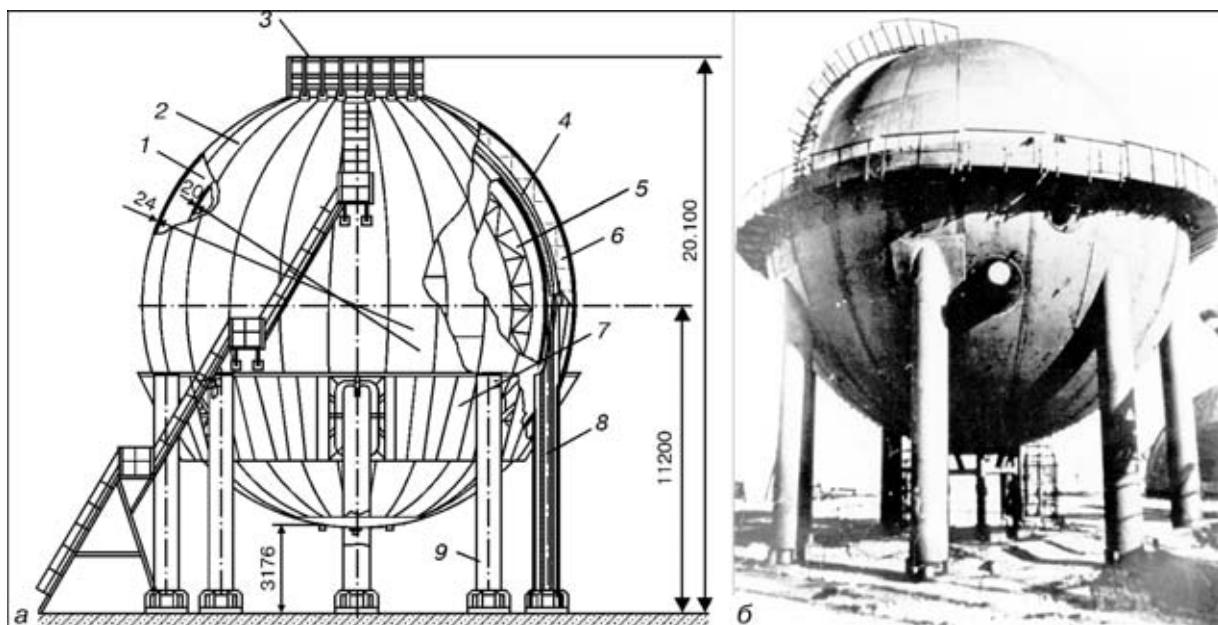


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) сферического изотермического резервуара вместимостью 1400 м³: 1 — внутренняя оболочка резервуара (сосуд); 2 — наружная его оболочка (кожух); 3 — кольцевая площадка; 4 — изоляция; 5 — внутренняя смотровая лестница; 6 — лестница катучая в межзеренном пространстве; 7 — опорный пояс; 8, 9 — опорная стойка соответственно оболочки сосуда и кожуха

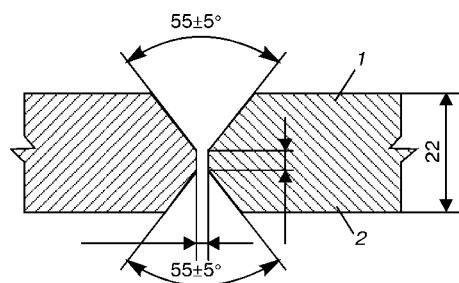


Рис. 2. Разделка кромок лепестков под сварку на манипуляторе: 1 — вакуум; 2 — рабочая среда

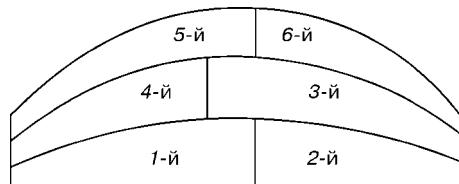


Рис. 3. Схема сборки трехлепесткового блока: 1–6 — лепестки стали марки 12Х18Н10Т или 03Х20Н16АГ6 толщиной 20...22 мм, и наружной диаметром 16 м из стали 09Г2С толщиной 24 мм.

На рис. 1 показан сферический изотермический резервуар вместимостью 1400 м³, рабочее давление в нем составляет 1·10³ кПа. Внутренняя и внешняя оболочки резервуара опираются на восемь опор-стоеч. Стойки внутренней оболочки резервуара проходят через отверстия внешней оболочки (кожуха), размещаются внутри ее стоек и крепятся к общей плате-фундаменту. В пространстве между оболочками и опорами давление достигает 5·10⁻² Па.

Внутренняя и наружная оболочка резервуара состоят из 24 лепестков, которые изготавливаются на машиностроительном заводе способом холодной вальцовки с применением экваториально-меридиального раскроя. Форма лепестков и размеры их кромок при подготовке под сварку на монтаже показаны на рис. 2.

Сборка внутреннего сосуда сферического резервуара включает две основные операции — сборка лепестков в блоки, а затем блоков на опорном кольце манипулятора. Сборка лепестков в блоки производится с помощью сборочных приспособлений на специальном стенде. Для предотвращения деформаций к готовым блокам привариваются трубы жесткости. Первоначально собираются трехлепестковые блоки (рис. 3), которые затем укрупняются. Порядок сборки шаровой оболочки из блоков на опорном кольце и схема расположения монтажных стыков показаны на рис. 4. Вначале

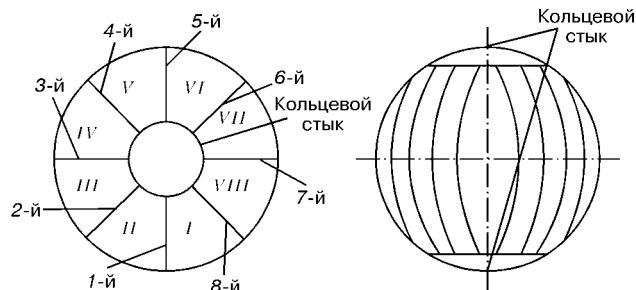


Рис. 4. Схема сборки блоков на опорном кольце: I—VIII — блоки; 1—8 — стыки

Таблица 1. Допустимые отклонения размеров элементов внутреннего сосуда при изготовлении резервуара

Допустимые отклонения	Способ измерения	Предельное отклонение, мм
Совместный пологий увод кромок и кривизна поверхности на длине не менее 500 мм наружу или внутрь (рис. 5, а–е)	Шаблон длиной не менее 1000 мм	5
Местные деформации в виде выступов и вмятин (рис. 5, г)	То же	3 (суммарные деформации не должны превышать 5 мм)
Увод кромок непосредственно у сварных швов наружу (рис. 5, д) или внутрь (рис. 5, е) сосуда резервуара	»	3
Волнистость и смешение кромок лепестков	Шаблон и глубомер	10 % толщины лепестка, но не более 3 мм
Длина окружности шара, измеренная по экватору и полосам, не может быть больше или меньше номинала на сумму полей допусков на зазоры по экватору, предусмотренные проектом	Мерная лента 2-го класса	То же
Овальность в экваториальном сечении сферического резервуара	То же	Не более 0,5 % диаметра

блоки крепятся между собой с помощью сборочных приспособлений, а затем и свариваются подварочным швом, который выполняется ручной аргонодуговой сваркой с присадкой проволоки по всей длине шва с катетом не менее 6 мм.

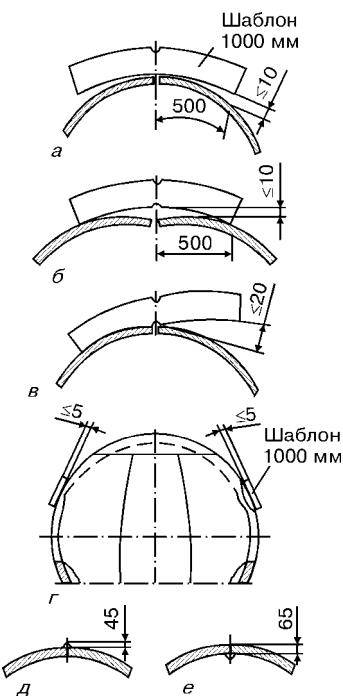


Рис. 5. Контролируемые размеры криогенного сосуда: а–е — см. объяснения в табл. 1



Рис. 6. Автоматическая сварка криогенного сосуда на манипуляторе

Автоматическая сварка монтажных швов внутренней оболочки резервуара производится на весу по подварочному шву в нижнем его положении в верхней точке сосуда, а сварка внутренних швов — в нижней точке внутри резервуара при вращении его на манипуляторе.

Качество сборки резервуара перед сваркой на манипуляторе проверяется, принимается и регистрируется согласно документации на технологический процесс.

Контролируемые размеры элементов внутренней оболочки сферического резервуара (рис. 5) должны выдерживаться с точностью, обеспечивающей качественное изготовление последнего на монтаже с предельными отклонениями, указанными в табл. 1.

Контроль качества сварных соединений криогенного резервуара предусматривает проведение следующих мероприятий: внешний осмотр и измерение; рентгенопросвечивание или гамма-контроль; испытания на вакуумную плотность; лабораторные испытания.

Перечень методов контроля и их объем устанавливаются техническими условиями на изделие.

При сооружении парка из 24 резервуаров вместимостью 1400 м³ была разработана рациональная технологическая схема: внутреннюю оболочку резервуара из высоколегированной хладостойкой стали 03Х20Н16АГ6 собирают из отдельных лепестков и полностью сваривают автоматической



Рис. 7. Транспортировка внутренней оболочки резервуара массой 110 т к месту монтажа

Таблица 2. Механические свойства металла шва и сварных соединений из стали 03Х20Н16АГ6, выполненных автоматической сваркой под флюсом, при комнатной и низких температурах

Объект исследования	$T_{исп}$, К	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU , МДж/м ²
Основной металл	293,0	418	712	48,0	83,0	3,45
	77,0	810	1375	53,5	67,0	2,03
	20,0	1070	1590	35,0	—	2,15
	4,2	1230	1630	32,4	—	—
Металл шва	293,0	371	$\frac{672}{685}$	40,8	66,0	2,0
	77,0	703	$\frac{1142}{1160}$	43,5	44,5	1,21
	20,0	825	$\frac{1370}{1340}$	32,5	—	1,08
	4,2	975	$\frac{1410}{1450}$	27,0	—	—

* Примечания. 1. В знаменателе приведены значения σ_b сварных соединений. 2. Угол загиба во всех случаях составлял 180°.

сваркой под слоем флюса АНК-45 на манипуляторе (рис. 6), здесь же выполняются приварка технологической оснастки в нижнем удобном для сварки положении, 100 %-ный рентгеноконтроль всех сварных швов, а также их ремонт.

В табл. 2 приведены обобщенные данные о свойствах стали 03Х20Н16АГ6 толщиной 20 мм и ее сварных соединениях, выполненных автоматической сваркой под слоем флюса, при температуре испытаний $T_{исп} = 293,0 \dots 4,2$ К. Как следует из приведенных данных, сталь 03Х20Н16АГ6 и ее сварные соединения имеют повышенные прочностные характеристики при высоких показателях пластичности и ударной вязкости, вплоть до 4,2 К.

Внутренняя оболочка резервуара массой 110 т, полностью сваренная, прошедшая контроль и подготовленная к монтажу, транспортируется из цеха к месту монтажа тягачом на специально спроектированном ложементе (рис. 7). Ее наружный кожух из стали 09Г2С собирают на монтаже из двух полусфер. Сборка и сварка оболочки защитного кожуха выполняется в следующей последовательности: разделка кромок лепестков (рис. 8) на заводе-изготовителе или в условиях монтажной площадки механическими кромкорезами с последующей зачисткой поверхности; сборка двух полусфер оболочки из лепестков на специальном стенде; контроль геометрии; подварка корня шва ручной элект

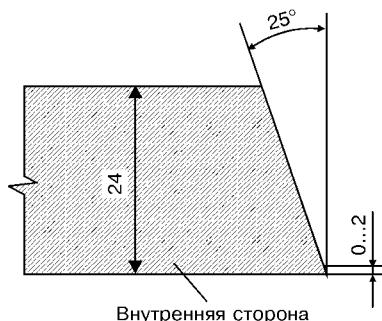


Рис. 8. Разделка кромок лепестков наружного кожуха

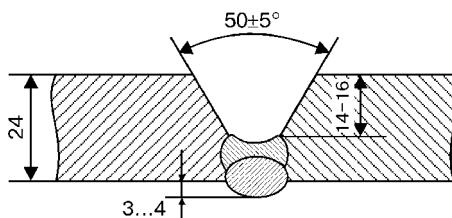


Рис. 9. Вид и параметры разделки кромок лепестков кожуха под автоматическую сварку аппаратом А-1381М



Рис. 10. Монтаж, сборка и сварка изотермического комплекта тродуговой сваркой высота подварочного шва со стороны разделки составляет 5...6 мм, усиление — 3...4 мм (рис. 9); сварка полусфер автоматом марки А-1381М с применением самозащитной порошковой проволоки в различных пространственных положениях за один проход; сборка, прихватка и сварка стоек-опор кожуха; контроль геометрии сосуда.

Таким образом, выполняются монтаж, сборка и сварка изотермического комплекта на проектной отметке (рис. 10) трех укрупненных элементов (внутренний сосуд целиком и наружная оболочка из двух полусфер) по экваториальному стыку.

Монтаж осуществляется в следующей последовательности: установка нижней полусферы кожуха в проектное положение; монтаж и сварка опор внутреннего сосуда; установка внутреннего сосуда в проектное положение и приварка его к внутренним опорам; установка верхней полусферы



Рис. 11. Элемент криогенного трубопровода из сплава инвар

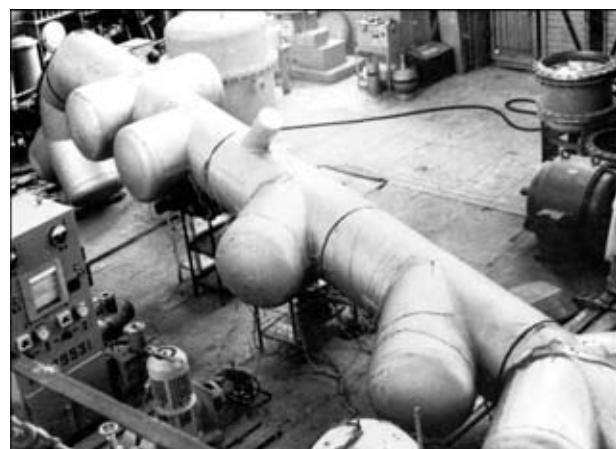


Рис. 12. Криогенный трубопровод в собранном виде защитного кожуха; сварка экваториального стыка защитного кожуха; контроль и вакуумирование.

Предложенные способы сборки, монтажа и сварки крупногабаритных сферических изотермических резервуаров вместимостью 1400 м³ были успешно использованы при сооружении стартового комплекса системы «Буран» на полигоне Байконур и других авиакосмических объектах.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология аргонодуговой сварки инвара марки 36НХ с присадочной проволокой 36НГМТ (ЭП-803) применительно к криогенным трубопроводам заправочного комплекса. Механические свойства инвара и его сварных соединений приведены в табл. 3.

На рис. 11 показан элемент криогенного трубопровода, выполненного из сплава 36НХ, а на рис. 12 — криогенный трубопровод в собранном виде.

При сварке криогенных трубопроводов из инвара необходимо решить ряд проблем, связанных с появлением горячих трещин в инварных швах. Экспериментально доказано, что на склонность металла инварного шва к горячим трещинам большое

Таблица 3. Механические свойства инвара и его сварных соединений

Объект исследования	$T_{исп}$, К	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU , МДж/м ²
Основной металл – сплав 36НХ	293	313	461	41,0	69,4	2,13
	77	607	802	40,0	72,8	1,76
	20	740	932	59,0	71,0	1,31
Сварное соединение (присадочная проволока 36НГМТ диаметром 1,2 мм)	293	320	471	32,3	62,0	2,65
	77	521	763	26,1	54,1	1,51
	20	624	892	23,1	48,2	0,84



ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

влияние оказывает кислород. Трещины в металле инварного шва образуются по вторичным границам за счет сегрегации кислорода. Предложено выполнять комплексное легирование шва молибденом, марганцем и титаном с целью подавления диффузии кислорода и связывания его на стадии жидкой ванны в нерастворимые оксиды. Для сварки инвара была создана и освоена в промышленности новая присадочная проволока марки 36НГМТ.

С помощью разработанной технологии сварки была решена проблема создания сварных криогенных трубопроводов из сплава инвар в системе заправочного комплекса.

Выводы

1. Предложенная технология сборки, монтажа и сварки крупногабаритных сферических изотермических резервуаров способствует максимальному сокращению объема сборочно-сварочных работ на монтаже, повышению качества механизированной сварки и производительности труда, сокращению сроков строительства.

2. Применение стабильно аустенитной стали повышенной прочности 03Х20Н16АГ6 при сооружении изотермических резервуаров для хранения криогенных продуктов позволило уменьшить металлоемкость изделий, упростить их конструкцию, технологию изготовления и впервые использовать их при повышенном (до $1 \cdot 10^3$ Па) давлении.

Methods of assembly, mounting and welding of large-sized spherical isothermal tanks for cryogenic applications have been proposed and implemented, which provide a maximum reduction of the scope of assembly-welding operations. A higher level of mechanized welding application and labour efficiency is achieved, as well as shortening of the construction period.

Поступила в редакцию 15.04.2002

Информационная поддержка:

Журналы

«Сварочное производство»

«В мире неразрушающего контроля»

«Сварщик»

«Автоматическая сварка»

«Безопасность труда в промышленности»



МЕЖДУНАРОДНЫЙ СВАРОЧНЫЙ ФОРУМ

V Международная специализированная выставка

II Международная научно-техническая конференция

I Конкурс сварщиков СНГ

СВАРКА. КОНТРОЛЬ. РЕНОВАЦИЯ

V Международная специализированная выставка

МЕТАЛЛООБРАБОТКА

29 октября-1 ноября 2002 года г. Уфа

Республиканский выставочный комплекс ул. Менделеева, 158

Одновременно пройдут специализированные выставки

«Нефтегаз» и «Химиндустря»

Тел.: (3472) 52-53-86, 53-41-10, факс: 52-55-93

E-mail: bashexpo@ufanet.ru



СВАРКА ATIG КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

Д. Р. БАЙЧ, инж. (Техн. ун-т, г. Подгорица, Черногория),
М. М. САВИЦКИЙ, д-р техн. наук, **Г. М. МЕЛЬНИЧУК**, **А. Ф. ЛУПАН**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучена эффективность применения сварки конструкционных низколегированных углеродистых и теплоустойчивых сталей вольфрамовым электродом в инертном газе с активирующим флюсом (сварка ATIG). Показано, что увеличение проплавляющей способности дуги на пониженных токах может инициировать образование в соединениях структурных составляющих, повышающих прочность и снижающих пластичность металла. Для устранения влияния этого фактора на конструктивную прочность соединений целесообразно их подвергать отпуску, в том числе местному, совмещенному с автоопрессовкой, используемой для получения удовлетворительной геометрии шва.

Ключевые слова: аргонодуговая сварка, активирующий флюс, формирование шва, автоопрессовка, конструкционные стали, химический состав, механические свойства, структура металла

Выполненные в ИЭС им. Е. О. Патона исследования в области металлургии сварки высокопрочных сталей и сплавов титана показали, что интенсификация окислительно-восстановительных реакций в дуге с инертной атмосферой малыми дозами химически активных элементов увеличивает глубину проплавления свариваемого металла и улучшает качество сварных соединений [1]. На основе эффекта активации в настоящее время разрабатываются перспективные технологические процессы сварки неплавящимся и плавящимся электродами в инертных газах [2]. Причем в некоторых странах, в частности США и Японии, эти работы были включены в перечень приоритетных направлений развития сварки [3, 4]. В ИЭС им. Е. О. Патона накоплен большой опыт применения активаторов для многих классов сталей — от высоколегированных до низкоуглеродистых кипящих. Целью настоящей работы было ознакомление читателей с некоторыми новыми результатами, касающимися сварки конструкционных углеродистых низколегированных и теплоустойчивых сталей.

Использование эффекта активации при сварке неплавящимся электродом конструкционных сталей, как показали наши исследования, существенно улучшает технологические и экономические показатели сварочных технологий (табл.1). В связи с увеличением глубины проплавления на стали толщиной 5...16 мм не требуется разделка кромок, сокращается количество проходов и суммарное время сварки, уменьшается расход присадочного металла, защитного газа и электроэнергии.

Что касается элементов-активаторов, то их стоимость в общем балансе затрат нез-

начительна из-за малого расхода. Экспериментально установлено, что при использовании в качестве активатора кислорода его расход, отнесенный к массе расплавляемого металла, должен составлять около 0,02 %. Это количество кислорода можно получить из основного металла, например, при сварке слабораскисленных сталей. Однако ввиду кратковременного пребывания расплавленного металла в жидком состоянии и непостоянства содержания кислорода в стали разных плавок обеспечить его равномерное поступление в междуэлектродный промежуток довольно сложно, а интенсификация его выделения из глубинных слоев сварочной ванны может привести к образованию пор. Более стабильные результаты дает введение кислорода через защитную атмосферу [5]. Но и в этом случае возникают определенные трудности с обеспечением точной подачи кислорода и защиты вольфрама от окисления.

Таблица 1. Затраты материалов и времени на погонную длину шва 1 м при сварке сталей способами TIG и ATIG

Способ сварки	Толщина свариваемого металла, мм	Количество проходов	Время сварки, мин	Расход		
				проводки, кг	аргона, м ³	электроэнергии, кВт·ч
TIG						
односторонняя	5	3	26	0,28	0,26	1,10
	8	4	34	0,50	0,34	1,49
	10	5	40	0,64	0,43	1,95
двусторонняя	12	5	43	0,78	0,43	1,90
	14	7	60	0,81	0,60	2,60
	16	9	77	1,10	0,77	3,40
ATIG						
односторонняя	5	1	7	0,06	0,07	0,13
	8	1	15	0,08	0,15	0,63
	10	1	20	0,10	0,20	0,87
двусторонняя	12	2	24	0	0,24	0,88
	14	2	30	0	0,30	1,10
	16	2	40	0	0,40	1,53



Рис. 1. Емкости для хранения и нанесения активирующего флюса

Эффективным способом введения активаторов в зону сварки является применение активирующих флюсов. В ИЭС им. Е. О. Патона разработана серия активирующих флюсов (высокодисперсных смесей оксидного и оксидно-фторидного типов для разных классов сталей), а также способы их применения в различных условиях [6], которые позволяют получить необходимое количество активаторов в междуэлектродном промежутке при расходе флюса 1...2 г на погонную длину стыка 1 м. Широкое распространение получил вариант нанесения пастообразного флюса с помощью флюсографа многоразового использования, заправляемого из специальных емкостей (рис. 1). При этом компоненты флюса участвуют в обменных реакциях, происходящих на поверхности сварочной ванны, что позволяет микролегировать и модифицировать металл шва с целью улучшения его структуры и свойств. Представленные на рис. 2 данные свидетельствуют о том, что эти операции реальны и управляемы: количество элементов, переходящих в металл шва, соответствует их содержанию во флюсе.

Указанный расход флюса практически не влияет на состав отработанных газов в месте расположения сварочного поста. Оценка интенсивности выделения твердой составляющей сварочного аэрозоля (ТССА)* показала, что в процессе сварки в аргоне низколегированной стали марки 12Х1МФ на предельных токах (до 300 А) с применением оксидного флюса ВС-2Э ТССА составляет 0,274 г на погонную длину шва 1 м. Это преимущественно оксиды хрома (0,0179), марганца (0,0156), титана (0,0139), кремния (0,0175) и железа (0,1625). При расходе аргона 0,2 м³ на погонную длину шва

*Авторы благодарят О. Г. Левченко и его сотрудников за выполненную оценку.

Таблица 2. Химический состав и механические свойства металла различных участков сварного соединения

Участок сварного соединения	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	O ₂	N ₂
ОМ	0,18	0,33	1,52	0,05	0,02	< 0,005	0,013	0,015	0,0021	0,0061
Шов	0,16	0,31	1,50	0,07	0,02	< 0,005	0,012	0,015	0,0025	0,0051
ОМ	0,11	0,23	0,80	0,23	0,05	0,01	0,015	0,017	0,0020	0,0086
Шов	0,09	0,21	0,81	0,27	0,05	0,01	0,013	0,017	0,0023	0,0078
ОМ	0,17	0,25	0,32	1,31	2,82	0,35	0,002	0,010	0,0018	0,0080
Шов	0,16	0,22	0,30	1,35	2,81	0,33	0,002	0,010	0,0023	0,0071

Примечание. Здесь ОМ — основной металл.

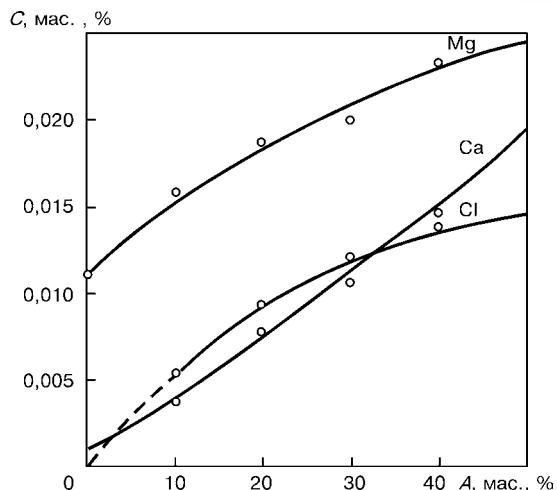


Рис. 2. Зависимость массовой доли элементов в металле шва С от их содержания в активирующем флюсе A

1 м общее количество аэрозолей не превышает 0,1 мас. %, т. е. применение сварки ATIG не требует дополнительных средств для защиты персонала, поскольку может выполняться в тех же условиях, что и сварка TIG. Не требуется также специализированное сварочное оборудование, так как условия возбуждения и горения дуги в целом определяются защитным газом, а активаторы действуют в локальных зонах междуэлектродного промежутка.

Характерной особенностью сварки ATIG является образование узких швов с глубоким проплавлением основного металла без разделки кромок: коэффициент их формы при U-образном проплавлении составляет ≤ 1 (рис. 3, a), а структура состоит из мелкодисперсных дезориентированных кристаллитов, что обуславливает высокую сопротивляемость металла образованию кристаллизационных трещин [2]. Не вступая в дискуссию со сторонниками не подтвержденного экспериментально предположения Хейпли о первостепенном влиянии на проплавление стали поверхностного натяжения жидкого металла, отметим, что указанная особенность сильно влияет на комплекс технологических и служебных свойств сварных соединений. С одной стороны, она способствует снижению уровня сварочных напряжений и, следовательно, вызванных ими остаточных деформаций. Измерение последних показало, что при сварке ATIG плоских стыковых соединений продольные и поперечные деформации примерно в два раза меньше, чем при сварке TIG, а угловые деформации



Продолжение табл. 2

Участок сварного соединения	Механические свойства					
	σ_b , МПа	σ_s , МПа	δ , %	KCV , Дж/см ² , при T , °C		
				+20	-20	-20
				Без отпуска	Отпуск 650 °C	
ОМ	508,0	385,0	26,3	64,7	27,3	30,5
Шов	567,1	437,0	20,6	39,8	17,7	31,9
ОМ	459,7	360,1	29,1	71,1	32,3	34,0
Шов	485,8	375,6	22,9	41,5	23,2	35,3
ОМ	868,6	598,4	27,1	73,4	36,7	37,6
Шов	779,3	670,1	19,0	30,1	18,2	37,0

вообще близки к нулю. Эти результаты коррелируют с данными, полученными при испытаниях сварных соединений на трещиностойкость: при сварке по способу ATIG стойкость соединений против образования горячих и холодных трещин выше стойкости соединений, выполненных сваркой TIG [2].

С другой стороны, сварные швы с глубоким проплавлением, сформированные из основного металла без присадочной проволоки, которая, как правило, имеет пониженное содержание углерода, характеризуются более высокой склонностью к закалке, усиливающей еще и тем, что сварка ATIG осуществляется с меньшей погонной энергией, и скорость охлаждения сварных соединений возрастает. Последнее способствует более интенсивному образованию закалочных структурных составляющих в металле шва и ЗТВ, которые повышают его прочность, снижая пластичность и вязкость. Как следует из табл. 2, эта тенденция достаточно четко прослеживается в соединениях низколегированных сталей при испытании образцов без последующей термической обработки. Применение высокого отпуска устраняет различие свойств, обусловленное сваркой в пределах данного химического состава стали, в том числе и ударной вязкости при отрицательной температуре. Причем, как свидетельствуют результаты работы [6], этот эффект может быть достигнут посредством не только печной, но и местной термической обработки с использованием сварочной дуги при ее совмещении с выполнением декоративного слоя для улучшения геометрических размеров шва (рис. 3, б). Что касается влияния колебаний химического состава, присущих каждой марке стали, то оно всегда будет проявляться через разброс показателей механических свойств. Однако в отличие от соединений, выполненных другими способами дуговой сварки, изменение показателей механических свойств в нашем случае происходит синхронно для основного металла и металла шва тем более, что они весьма близки по химическому составу и свойствам.

Аналогичная тенденция прослеживается и для сталей, изготовленных по стандартам Украины, с той лишь разницей, что содержание в них примесей (S, P, O₂ и N₂) в 2...3 раза выше. Последнее обстоятельство способствует увеличению разброса результатов испытаний на ударную вязкость. Так, например, при сварке стали 20 без послесварочного

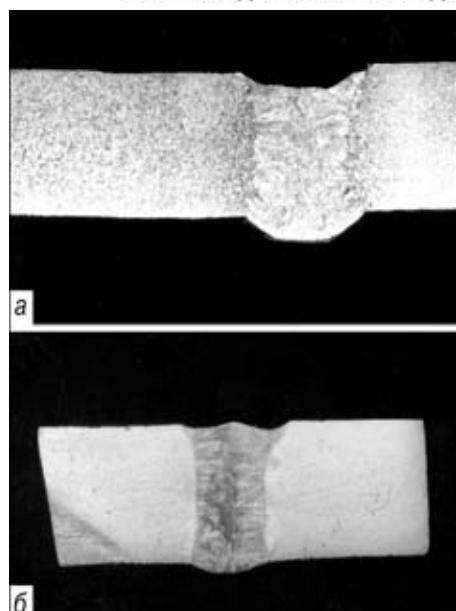


Рис. 3. Сварной шов, выполненный сваркой ATIG без присадочной проволоки: а – без автоопрессовки; б – с автоопрессовкой

отпуска ударная вязкость KCV^{+20} составила для основного металла 54,1...39,7, а для металла шва 36,3...29,3 Дж/см². Немного лучшие показатели ударной вязкости получены при испытании соединения из сталей 12Х1МФ и 10ХСНД. Однако общая тенденция снижения ударной вязкости лигото металла шва непосредственно после охлаждения со сварочного нагрева зафиксирована и в этих случаях, если не применяли послесварочный отпуск. Это обусловлено более высокими скоростями охлаждения сварного соединения при сварке ATIG и образованием менее пластичных составляющих структуры из-за повышенной концентрации нагрева. При отпуске механические свойства сварных соединений, выполненных сваркой ATIG, стабилизировались на уровне свойств основного металла. Это позволяет достигать равнопрочности металла всех участков сварного соединения.

Влияние последующего местного отпуска на механические свойства соединений труб из сталей 20 (размером 8×160 мм), 10ХСНД (6×120 мм) и 12Х1МФ (6×76 мм), применяемых в энергетических установках, представлено в табл. 3. Сварку основного слоя шва в первом случае выполняли на токе 200, а во втором и третьем – 150 А. Для получения декоративного слоя шва (рис. 3) способом автоопрессовки и отпуска металла в предыдущем слое и ЗТВ изменяли скорость сварки таким образом, чтобы обеспечить оптимальное сочетание скоростей распространения тепла и нарастания термических напряжений в сварном соединении в период развития пластического течения металла.

Данные табл. 3 и рис. 3 показывают, что влияние автоопрессовки на форму и качество шва весьма положительное и может быть использовано для практических целей. При этом улучшается его структура. Литая дендритная структура, сформировавшаяся в процессе сварки первого (основного) слоя шва, после автоопрессовки становится менее четкой («размытой») (рис. 4). Аустенитное



ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Таблица 3. Механические свойства соединений сталей 20, 12Х1МФ и 10ХСНД при сварке ATIG с автоопрессовкой

Марка стали	Участок сварного соединения	Температура испытаний, °C	σ_b , МПа	σ_s , МПа	δ , %	ψ , %	Ударная вязкость, Дж/см ²		
							С автопрессовкой		Без автопрессовки
							KCU	KCV	KCV
10ХСНД	ОМ	20	736,0	589,4	21,3	66,6	166,3	72,4	72,0
	Шов		751,2	674,3	20,0	55,6	159,1	71,1	23,1
12Х1МФ	ОМ	20	523,9	328,7	23,1	67,3	117,1	67,4	67,4
	Шов		567,1	368,1	26,7	64,1	121,3	69,9	32,6
Ст 20	ОМ	20	440,7	356,1	24,1	65,0	116,7	70,0	69,7
	Шов		499,3	374,4	22,6	71,6	118,1	78,0	29,1
	ОМ	100	495,4	268,3	18,2	62,0			
	Шов	200	547,8	263,5	17,3	58,6			
	ОМ	250	531,7	256,4	16,2	51,4			
	Шов	350	526,2	232,1	18,0	53,3			

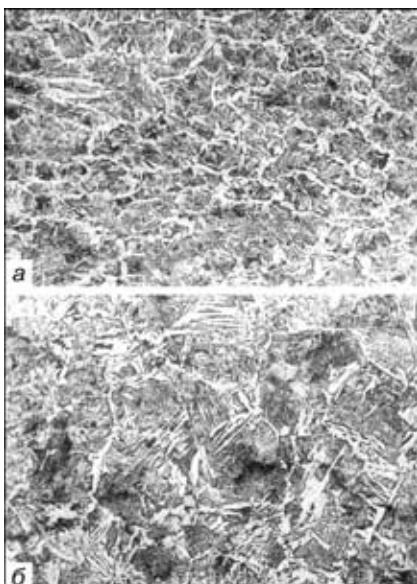


Рис. 4. Микроструктура ($\times 200$, уменьш. 4/5) металла шва (а) и металла ЗТВ (б) при сварке с автоопрессовкой

зерно в металле ЗТВ при этом практически не изменяется. Что касается вторичной структуры металла шва, то после сварки в основном слое шва на стальях 10ХСНД и 12Х1МФ ее можно идентифицировать как смесь глобулярного бейнита (HV_{50} 300...330) с мартенситом (HV_{50} 400...410). На участке перегрева металла ЗТВ пластины мартенсита встречаются реже и структура металла в основном представлена бейнитом (HV_{50} 270...350). После проведения автоопрессовки структура металла шва и металла ЗТВ становится более дисперсной. Микротвердость ее составляющих при этом практически не изменяется, снижается только разброс ее значений.

Для обеспечения необходимого сочетания прочностных характеристик сварных соединений с по-

Effectiveness of application of ATIG welding of structural low-alloyed carbon and heat-resistant steels was studied. It was shown that improved arc penetrability at lower currents may initiate formation of structural components in the joints, which increase the strength and lower the ductility of the metal. In order to eliminate the influence of this factor on the structural strength of the joints, it is rational to conduct their annealing, including local annealing combined with self-pressing, used to produce a satisfactory weld geometry.

казателями пластичности и вязкости переплава металла в аргоне всегда имеет положительное значение. Применение активирующего флюса не внесло противопоказаний. Согласно результатам измерений, проведенных с использованием микроскопа «Квантимет-720», более крупные и вытянутые в цепочки сульфиды и оксиды, присутствующие в основном металле, измельчаются и глобулизаются в швах, выполненных способом ATIG. Если объемная доля сульфидов в основном металле составляла примерно 0,010, а оксидов 0,004...0,008 %, то в металле шва было обнаружено 0,0075 % сульфидов и 0,0073 % оксидов.

Таким образом, применение сварки ATIG в комбинации с автоопрессовкой для углеродистых, марганцовистых и низколегированных сталей, используемых в энергетическом оборудовании, позволит повысить качество сварных соединений без применения таких сложных и дорогостоящих технологических приемов, как разделка кромок, объемный печной отпуск, а также специальных присадочных проволок.

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. акад. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 767 с.
2. Савицкий М. М., Кушниренко Б. М., Олейник О. И. Особенности сварки сталей вольфрамовым электродом с активирующими флюсами (ATIG-процесс) // Автомат. сварка. — 1999. — № 12. — С. 20–28.
3. Gordon J. R. Perspectives on welding research end development in the USA // Weld. Review Intern. — 1995. — № 9. — Р. 95–108.
4. Технологии сварки и соединений в XXI веке // Jap. Weld. Soc. — 2001. — № 3. — Р. 6–18.
5. Способы применения активаторов для сварки в инертном газе / М. М. Савицкий, А. Ф. Лупан, Г. М. Мельничук, О. И. Олейник // Автомат. сварка. — 2000. — № 3. — С. 48–49.
6. Савицкий М. М., Кулик В. М., Бурский Г. В. Особенности дуговой обработки закаливающихся сталей без расплавления // Там же. — 2000. — № 5. — С. 31–36.

Поступила в редакцию 04.03.2002,
в окончательном варианте 27.03.2002

ДУГОВАЯ СВАРКА В УЗКИЙ ЗАЗОР ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ (Обзор)

В. Ю. БЕЛОУС, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализирован опыт практического применения дуговой сварки в узкий зазор конструкций из титана и титановых сплавов. Показаны преимущества указанного способа сварки. Отмечена перспективность применения магнитных способов управления сварочной дугой.

Ключевые слова: аргонодуговая сварка, дуговая сварка в узкий зазор, узкощелевая разделка, титан, титановые сплавы

Высокая химическая активность титана по отношению к атмосферным газам вызывает значительные трудности при его горячей обработке и прежде всего при сварке. Заметное поглощение кислорода титаном начинается уже при температуре 500, азота — при 600 °C, взаимодействие титана с влагой и растворение в нем водорода происходит даже при более низких температурах [1, 2]. В свою очередь по мере увеличения содержания этих примесей в титане улучшаются его прочностные характеристики, снижается пластичность. Известно, что каждые 0,05 мас. % кислорода в титане увеличивают его временное сопротивление примерно на 60 МПа. С возрастанием количества кислорода в титане снижается его ударная вязкость, особенно при 0,1...0,3 мас. %. Азот в еще большей степени чем кислород упрочняет титан и ухудшает его пластические свойства. Водород резко снижает ударную вязкость титана, способствует его охрупчиванию, вызывает самопроизвольное разрушение конструкций [3], является одной из основных причин возникновения пор в швах.

Отрицательное влияние примесей газов на свойства сварных соединений титановых сплавов проявляется более резко, чем на свойства самих сплавов. Кроме общего снижения пластичности металла швов и зоны термического влияния (ЗТВ), примеси кислорода и азота способствуют развитию структурной и химической неоднородности, что является дополнительной причиной резкого падения работоспособности сварных соединений титановых сплавов [4].

Таким образом, при сварке изделий из титановых сплавов прежде всего следует обеспечить надежную защиту не только сварочной ванны, но и остывающего металла шва и участков ЗТВ, которые в процессе сварки нагреваются до температуры выше 350...450 °C, чтобы содержание примесей газов в металле шва и в металле ЗТВ соответствовало их количеству в основном металле.

Необходимость создания надежной защиты зоны сварки от контакта с воздухом (с учетом характерных для титана низкой теплопроводностью и относительно высокой теплоемкостью) во многом

определяет параметры режимов сварки титановых сплавов, в частности ограничивает сварочный ток и сужает интервал приемлемых скоростей сварки [5]. На выбор режимов сварки существенное влияние оказывает и особенность полиморфного превращения в титане.

Как следует из работы [2], полиморфное превращение в титане носит мартенситный характер и при охлаждении из β -области микроструктура металла шва и окколошовных участков ЗТВ большинства титановых сплавов представляет собой мартенситоподобные выделения в виде игл или пластин. В зависимости от скорости охлаждения, т. е. от режимов сварки, степени легирования сплава форма и размеры этих выделений могут изменяться от крупнопластинчатой α -фазы до тонкоигольчатой α' -фазы. Обычно большая высокая работоспособность присуща сварным соединениям, имеющим тонкоигольчатую структуру металла шва и окколошовного участка ЗТВ.

Размер зерна также оказывает существенное влияние на механические свойства сварных соединений, однако регулировать его в металле ЗТВ путем подбора соответствующих режимов сварки не представляется возможным [6]. Можно лишь уменьшить ширину ЗТВ и, следовательно, протяженность участка металла с крупным зерном. Поэтому при сварке титановых сплавов по мере увеличения толщины металла обеспечивать надежность защиты зоны сварки и определенное структурное состояние металла шва и ЗТВ становится значительно сложнее.

В настоящее время для соединения толстого металла наиболее перспективной является дуговая многослойная сварка в узкий зазор [7]. По сравнению со сваркой в обычную разделку этот способ обеспечивает уменьшение количества наплавленного металла, снижение трудоемкости сварочных работ и тепловложения в свариваемый металл. Для сварки титановых сплавов это имеет особое значение, поскольку стоимость титановой проволоки в несколько раз превышает стоимость полуфабрикатов.

Сварка титана и титановых сплавов в узкий зазор может осуществляться как неплавящимся, так и плавящимся электродом. В работе [8] описан опыт применения механизированной двусторонней сварки титановых сплавов в узкий зазор плавящимся электродом. Толщина металла стыковых

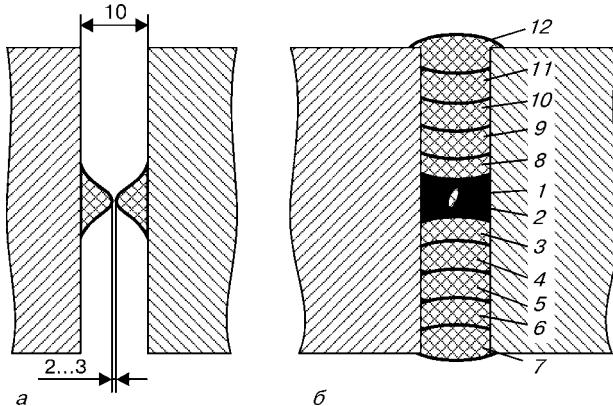


Рис. 1. Схема соединения с наплавками, собранное под сварку, (а) и порядок выполнения проходов (б), обозначенный цифрами

соединений из сплава ВТ5 составляла 36...130 мм. В связи с высоким электросопротивлением титана вылет плавящегося электрода не превышал 35 мм при использовании источника питания ПСГ-500 с жесткой характеристикой и 60 мм — модернизированного источника питания. Поэтому сварку соединений толщиной более 60 мм выполняли с двух сторон. Предварительно посредством ручной аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом с присадочной проволокой из сплава ВТ1-00св на середину кромки наплавляли валики. Подготовленные таким образом детали собирали с зазором 2...3 мм (рис. 1, а), что позволило не производить дополнительную механическую обработку торцов свариваемых листов для создания притупления. Корневой проход также выполняли ручной аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом, а заполняющие проходы — механизированной сваркой плавящимся электродом в аргоне. Для предотвращения возможных замыканий токоподводящего наконечника с кромками изделия на тыльной стороне газозащитной приставки были установлены специальные фиксаторы. В качестве присадочного материала использовали проволоку ВТ1-00св диаметром 1,6 или 2,0 мм. Несмотря на то что в этом случае временное сопротивление металла шва (400...430 МПа) меньше, чем основного металла (750...850 МПа), равнопрочность сварного соединения достигалась за счет эффекта контактного упрочнения соединений с мягкой прослойкой [9].

Свойства сварных соединений в зависимости от ширины шва и толщины основного металла

$B_{ш}$	$B_{ш}/\delta_{о.м}$	σ_t , МПа	σ_b , МПа	Место разрушения
20,6	0,70	413	551	Шов
11,9	0,39	614	765	»
7,9	0,30	689	930	Основной металл

Примечания. 1. Здесь $B_{ш}$ — ширина шва; $\delta_{о.м}$ — толщина основного металла; 2. σ_t основного металла составляет 803, присадочного — 422 МПа, а σ_b основного металла — 903, присадочного — 516 МПа.

Следует отметить, что по сравнению с ручной аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом, сварка в узкий зазор позволила значительно сократить количество проходов (от 60...70 до 16...18 при сварке плит толщиной 100 мм). Основной недостаток этого способа сварки заключается в большом разбрзгивании присадочного металла, что ухудшает газовую защиту зоны сварки и может вызвать нарушение процесса. Кроме того, возможны замыкания между токоподводящим наконечником и кромками изделия.

Возможность реализации эффекта контактного упрочнения в соединениях титановых сплавов, сваренных в узкий зазор, была использована в работе [10]. Цель исследований состояла в необходимости снижения стоимости сварных соединений. Для этого предусматривалось применение присадочной проволоки, менее легированной и менее прочной, чем основной металл, упрощение подготовки кромок под сварку и сокращение геометрических размеров сварного шва и ЗТВ. В частности, были сварены стыковые соединения толщиной 25 мм из сплава марки Ti-6Al-4V. В качестве присадочного материала использовали проволоку диаметром 1,6 мм из технически чистого титана. Сварку выполняли неплавящимся электродом в нижнем положении. Применили остающуюся подкладку толщиной 6,5 мм из того же сплава. Была опробована сварка стыковых образцов с разной шириной зазора: 19,0, 11,0 и 6,5 мм. Сварочный ток составлял 300...340 А, скорость сварки — 2,5...3,2 мм/с, напряжение на дуге — 14,5...18 В.

Результаты исследований показали, что с уменьшением ширины разделки прочность сварного соединения возрастает (таблица).

Это связано не только с увеличением доли основного металла в металле шва, но и с развитием сложного напряженного состояния в зоне пластической деформации, способствующего контактному упрочнению.

Ручную аргонодуговую сварку в узкий зазор вольфрамовым электродом применяют для изготовления из сплава ВТ1-0 силовых элементов химического оборудования (фланцев, колец, крышек высокого давления), где необходимо вы-

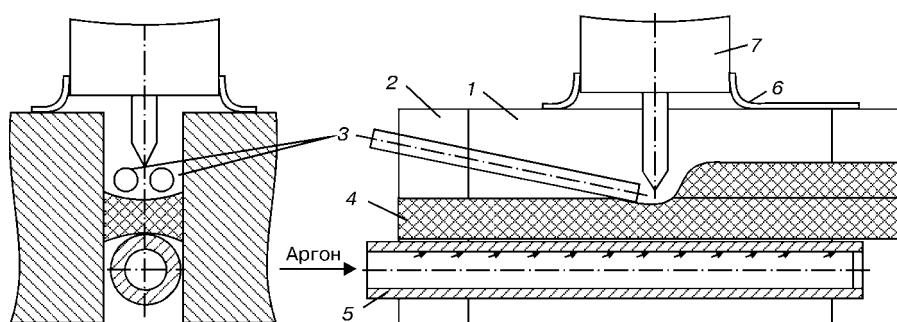


Рис. 2. Схема ручной аргонодуговой сварки по щелевому зазору неплавящимся электродом: 1 — свариваемая деталь; 2 — выводные планки; 3 — присадка; 4 — наплавленный металл; 5 — приспособление для наддува; 6 — щиток-отражатель; 7 — сопло горелки

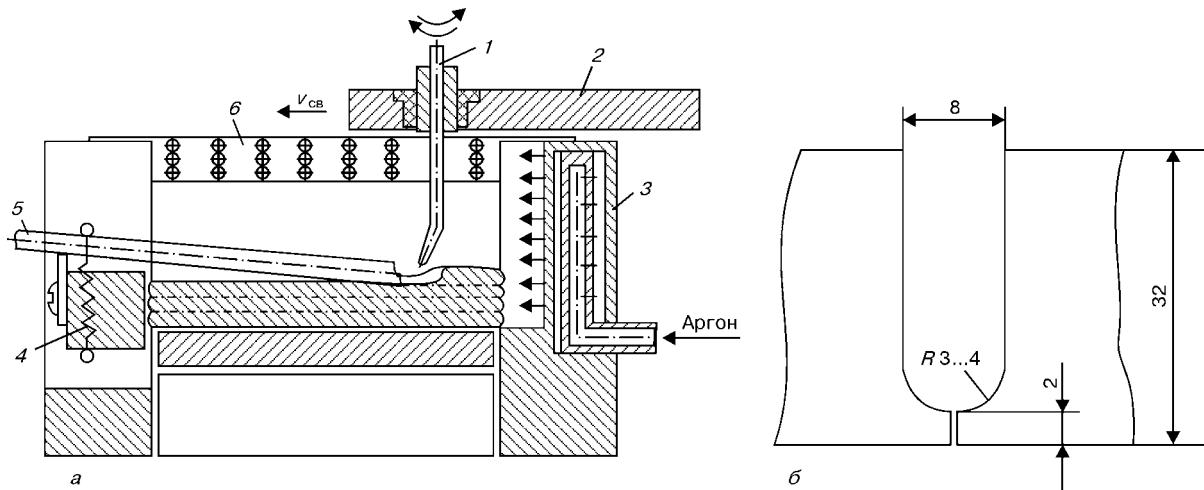


Рис. 3. Схема процесса аргонодуговой сварки в узкий зазор вращающимся изогнутым вольфрамовым электродом (а): 1 — вольфрамовый электрод; 2 — подвижная заслонка; 3 — распылитель; 4 — прижимное приспособление; 5 — пруток; 6 — защитные накладки кромок

полнять короткие швы на металле большой толщины [11]. При этом используют схему подготовки кромок, представленную на рис. 1, а. Сварку осуществляют в следующей последовательности. Первоначально (с двух сторон) сваривают созданное предварительной наплавкой притупление, а затем заполняют зазор последовательным наложением друг на друга валиков (см. рис. 1, б). Сварку осуществляют в аргоне вольфрамовым электродом марки ВЛ с присадочной проволокой ВТ1-00св. Сварочный ток составляет 380...400 А, напряжение на дуге — 10...12 В.

Следует отметить некоторые особенности техники сварки (рис. 2). Ось электрода должна находиться в вертикальной плоскости перпендикулярно к оси шва. Поперечных колебаний электродом не производят. Присадочные проволоки подаются в зону дуги под углом 5...10° без продольных перемещений. В случае сварки в относительно узкой и глубокой щели при соблюдении указанных условий надежная защита наплавляемого металла обеспечивается без применения насадок; используют лишь щиток-отражатель, надеваемый на сопло горелки.

При сварке внешних слоев применяют обычные насадки с дополнительной подачей аргона. Сварные соединения, выполненные по такой технологии, имеют достаточно высокие значения механических и коррозионных свойств. Согласно данным работы [12] эту технологию успешно применяли для сварки корпуса ацеталиятора, представляющего собой сосуд диаметром 3000 мм из листового сплава АТ3.

Основной проблемой, возникающей при сварке в узкий зазор, является обеспечение надежности сплавления металла шва со стенками разделки. Для предотвращения возможных дефектов предложен ряд технологических приемов, в частности, сварка на повышенных токах, выполнение швов с раскладкой валиков, принудительное колебание электрода и дуги [13].

Чтобы обеспечить надежное сплавление металла шва с вертикальными стенками зазора, при автоматической аргонодуговой сварке титана использу-

зовали вольфрамовый электрод диаметром 4 мм с изогнутым на 20...25° рабочим участком длиной 8...12 мм [14]. При повороте электрода вокруг своей оси сварочная дуга периодически направляется то на одну, то на другую стенку зазора (рис. 3, а), что обеспечивает равномерный прогрев и плавление. Регулируя амплитуду поворота (в пределах 70...160°) и частоту угловых колебаний, обеспечивали стабильное проплавление кромок на заданную глубину. О качественном сплавлении наплавленного металла с кромками свидетельствует характерное формирование поверхности каждого слоя в виде вогнутого мениска. Как показали результаты исследований, с изменением амплитуды поворота от 70 до 160° на титановом сплаве ВТ6 глубина проплавления увеличилась от 0,2...0,3 до 1,2...1,5 мм.

Зашиту металла от окисления обеспечивают путем подачи аргона вдоль щели через распылитель, установленный в начале шва или перемещающийся в щели за электродом. Чтобы не допустить попадания воздуха сверху и защитить вольфрам, аргон дополнительно подавали через водоохлаждаемые накладки, расположенные над щелью.

Горелка рассчитана на сварку титана толщиной до 100 мм. Присадочную проволоку подают в головную часть ванны. При сварке коротких швов прутки диаметром 3...5 мм предварительно укладываются в разделку. Сварку выполняют в U-образную разделку шириной 7...9 мм (рис. 3, б).

При сварочном токе 230 А и скорости сварки 5 м/ч высота наплавленного валика за один проход составляет 2...3 мм. Конструкция сварочной головки при таком способе сварки позволяет вести процесс в различных пространственных положениях.

Вследствие небольшого объема сварочной ванны жидкий металл надежно удерживается силами поверхностного натяжения при движении сварочной головки как сверху вниз, так и снизу вверх. Вертикальные швы свариваются на тех же режимах, что и швы в нижнем положении. Однако при сварке по этой схеме слабым звеном является изогнутый вольфрамовый электрод, поскольку его ра-



ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

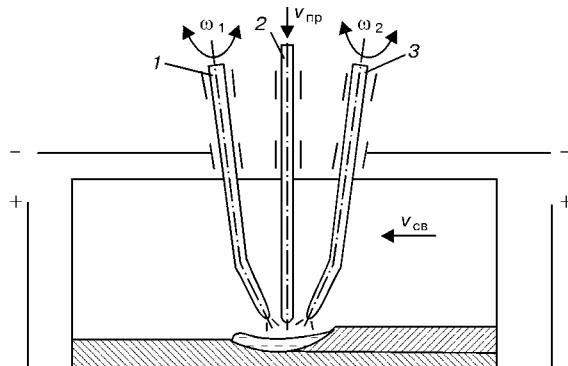


Рис. 4. Технологическая схема процесса сварки неплавящимся электродом: 1, 3 — изогнутые вольфрамовые электроды; 2 — присадочная проволока; ω_1 , ω_2 — угловые скорости вращения соответственно переднего и заднего вольфрамовых электродов; v_{prp} — скорость подачи присадочной проволоки

бочий участок постепенно разрушается, а многократная заточка электрода с изогнутым концом невозможна.

В работе [15] идея об использовании вольфрамового электрода с изогнутой рабочей частью реализована в двухэлектродной сварочной головке. Сварку (рис. 4) осуществляют одновременно двумя загнутыми вольфрамовыми электродами, которые вращаются вокруг собственных осей с угловыми скоростями ω_1 и ω_2 . Оси электродов и присадочной проволоки расположены в одной плоскости, совпадающей с осевой плоскостью щелевой разделки стыка. За счет вращательных движений электродов и их загнутых рабочих участков обе дуги совершают поперечные колебания. Присадочная проволока в щелевую разделку подается между двумя электродами перпендикулярно к поверхности шва. Схема управления головки позволяет автоматически изменять первоначально установленные значения тока дуги соответственно на переднем и заднем электродах в момент реверса продольного перемещения головки. Наиболее устойчивый процесс сварки и стабильное формирование шва были получены в том случае, когда сварочный ток на переднем электроде равнялся 100, а на заднем — 200 А. Проплавление стенок зазора и глубина проплавления металла предыдущего слоя были примерно одинаковыми и достигали 0,3...0,6 мм. Несмотря на очевидные достоинства предложенная схема двухдуговой сварки имеет тот же недостаток, что и однодуговая вольфрамовым электродом с изогнутой рабочей частью. Поэтому для управляемого перемещения сварочной дуги в щелевом зазоре наиболее перспективным следует считать использование переменного магнитного поля.

Способ сварки в узкий зазор вольфрамовым электродом магнитоуправляемой дугой применительно к титановым сплавам рассмотрен в работах [16, 17]. Сварку плит толщиной 110 мм из сплавов марок BT1-00 и AT3 осуществляли по схеме, приведенной на рис. 5, вольфрамовым электродом диаметром 5 мм с использованием присадочной проволоки диаметром 4 мм из сплава BT1-00св. Скорость сварки составляла 8 м/ч, сварочный ток — 420 А, напряжение на дуге — 13 В. Для создания управляющего магнитного поля использо-

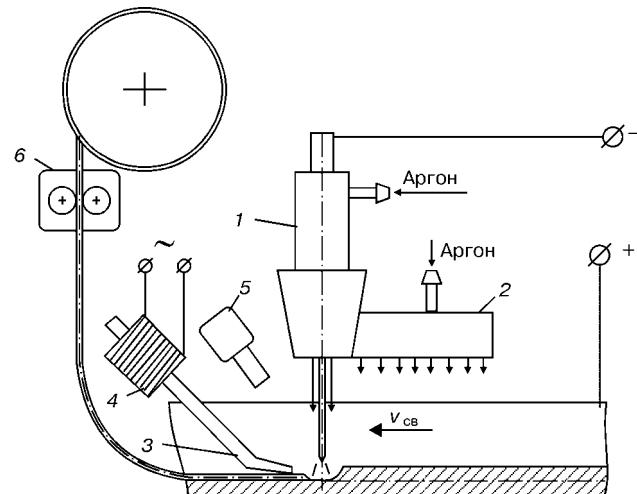


Рис. 5. Схема автоматической сварки в узкий зазор вольфрамовым электродом с магнитным управлением дугой: 1 — сварочная горелка; 2 — защитное приспособление; 3 — магнитопровод; 4 — электромагнит; 5 — телекамера; 6 — механизм подачи проволоки

вали специальное устройство (ОИ-119), позволяющее изменять частоту переменного магнитного поля в пределах 1...80 Гц и уровень магнитной индукции.

В ходе экспериментов оказалось, что наложение на дугу переменного магнитного поля приводит к снижению эффективности газовой защиты зоны сварки и, как следствие, к ухудшению качества сварных соединений. При увеличении толщины свариваемого металла до 100 мм нестабильность газового потока настолько велика, что сварка становится невозможной. Для устранения этого явления была создана специальная сварочная горелка, обеспечивающая стабильность газового потока в зазоре при сварке металла толщиной до 110 мм. При этом отмечается однородность структуры металла швов и высокий уровень механических свойств сварных соединений.

Автоматическую аргонодуговую сварку титановых сплавов в узкий зазор выполняли с применением плавящегося электрода на плитах из сплава BT6ч толщиной 26...135 мм [18]. В зависимости от их толщины осуществляли одно- или двустороннюю щелевую разделку кромок шириной 9,5...10,0 мм, с притуплением 5 мм при односторонней сварке и притуплением 10 мм при двусторонней (скорость сварки 15...22 м/ч; сварочная проволока диаметром 3 мм) с введением токоподвода в щелевой зазор без раскладки валиков по его ширине. После сварки примерно 10 м шва необходимо прочищать подающий канал от брызг и частиц налипшего металла. Защиту зоны сварки от воздуха обеспечивали три камеры: передняя (для защиты нагреваемых дугой кромок), средняя (для защиты зоны дуги и сварочной ванны) и задняя (для защиты остыивающего шва на длине до 350 мм).

Плиты толщиной до 26 мм сваривали в один проход на токе 650...720 А; для плит толщиной более 26 мм применяли многопроходную сварку на токе 450...480 А. Скорость подачи присадочной проволоки в этом случае составляла 420...470 м/ч

при однопроходной сварке и 220...230 м/ч при многопроходной. При оптимальном режиме обеспечивается наплавка валика толщиной около 19 мм при ширине разделки 10 мм. Несмотря на высокую производительность процесса сварки этот способ имеет серьезный недостаток — сильное разбрзгивание присадочного металла, что может вызвать нарушение процесса, короткое замыкание между стенками разделки и токоподводящим мундштуком, ухудшение газовой защиты зоны сварки.

В работе [19] сообщается о технологии сварки в узкий зазор неплавящимся вольфрамовым электродом, используемой при изготовлении таких ответственных конструкций, как котлы электростанций, аппараты глубоководного погружения и др. Сварку выполняли в U-образную разделку с углом раскрытия кромок 15°.

Для обеспечения надежной защиты сварочной ванны, присадочной проволоки и остывающего шва применена тройная газовая защита. В сварочную горелку независимо друг от друга подается три потока аргона: для защиты электрода, присадочной проволоки и остывающего металла шва. Особенность конструкции сварочной головки состоит в том, что в разделку помещается защитное сопло и цангa с вольфрамовым электродом (диаметр электрода 3 мм, вылет 20 мм), а над поверхностью изделия располагается дополнительное защитное приспособление, обдувающее аргоном поверхность изделия.

Как утверждают авторы работы [19], эта технология позволяет сваривать с двух сторон детали толщиной до 400 мм. Хотя не сообщается об опыте сварки титана или титановых сплавов, но считается возможным применение этого способа сварки для таких материалов, как высоколегированные сплавы, инконель, титановые сплавы.

Таким образом, дуговая сварка в узкий зазор считается эффективным процессом изготовления титановых конструкций из элементов средней и большой толщины, имеет самую высокую производительность. Однако наибольшее распространение получил способ сварки неплавящимся вольфрамовым электродом, имеющий относительно низкую производительность, но высокую надежность. Для получения бездефектных сварных соединений необходимо управлять процессами расплавления кромок и перемещения дуги в зазоре. Самым эффективным методом управления сварочной дугой является магнитное поле. Поэтому наиболее перспективным способом соединения титана

и сплавов на его основе следует считать автоматическую сварку неплавящимся электродом магнитоуправляемой дугой в сочетании с системой телевизионного контроля.

1. Цвиккер У. Титан и его сплавы. — М.: Металлургия, 1979. — 512 с.
2. Титан и его сплавы / А. С. Мороз, Б. Б. Чечулин, И. В. Долин и др. — Л.: Судпромгиз, 1960. — 516 с.
3. Гусева Е. А., Мордвичев Л. А. Холодные трещицы в сварных соединениях титановых сплавов. — М.: Металлургия, 1991. — 47 с.
4. Особенности газонасыщения титановых сплавов, легированных α - и β -стабилизаторами / Л. Ф. Сокирянский, Л. В. Губанова, В. В. Латаши и др. // Физика металлов и металловедение. — 1969. — № 28. — С. 847–852.
5. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блащук и др. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
6. Шоршоров М. Х. Металловедение сварки стали и сплавов титана. — М.: Наука, 1965. — 336 с.
7. Malin V. Monograph on narrow-gap welding technology // WRC Bulletin. — 1987. — 323 р.
8. Полув автоматическая сварка стыковых соединений титановых сплавов больших толщин без разделки кромок / В. Л. Руссо, Б. В. Кудояров, А. А. Николаев и др. // Свароч. пр-во. — 1971. — № 10. — С. 20–22.
9. Бакши О. А., Шрон Р. З. Прочность при статическом растяжении сварных соединений с мягкой прослойкой // Там же. — 1962. — № 5. — С. 9–15.
10. Wells M. E. Strengthening mechanisms in undermatched titanium welds // Titanium 92: science and technology: the minerals, metals, materials society: Proc. symp. 7th world titanium conf. (San Diego, June 29–July 2, 1992). — San Diego, 1992. — Р. 1787–1794.
11. Беседный В. А., Шеленков Г. М. Сварка титана больших толщин по щелевому зазору // Хим. и нефт. машиностроение. — 1970. — № 2. — С. 27.
12. Шеленков Г. М., Блащук В. Е. Применение сварки по щелевому зазору при изготовлении химической аппаратуры из сплава АТ3 // Автомат. сварка. — 1974. — № 9. — С. 50–53.
13. Кацуеси Х., Мицудаки Х. Дуговая сварка титана в узкий зазор // Журн. Яп. свароч. о-ва. — 1999. — № 3. — С. 41–62.
14. Штрикман М. М., Гринин В. С. Автоматическая сварка в узкощелевую разделку высокопрочных сталей и титановых сплавов // Свароч. пр-во. — 1971. — № 1. — С. 16–19.
15. Гринин В. С., Штрикман М. М. Высокопроизводительная автоматическая сварка в узкощелевую разделку // Там же. — 1982. — № 7. — С. 21–23.
16. Прилуцкий В. П., Замков В. Н., Лапченко С. В. Технологические и конструктивные особенности сварки титана в узкий зазор // Автомат. сварка. — 1989. — № 3. — С. 71–73.
17. Paton B. E., Zamkov V. N., Prilutsky V. P. Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium // Welding J. — 1996. — № 5. — С. 37–41.
18. Штрикман М. М., Бородин Ю. М., Ермаков Л. К. Автоматическая аргонодуговая сварка толстостенных узлов плавящимся электродом по щелевому зазору // Сварка цветных металлов. — Киев: Наук. думка, 1989. — С. 31–48.
19. Matsui S., Nakayama S., Sakurai T. Application of narrow gap GTA welding to various products. — Osaka: JWS, 1988. — Р. 127–134.

Experience of practical application of narrow gap welding of structures of titanium and its alloys has been analyzed. The advantages of the above-mentioned method of welding are shown. Prospects of application of magnetic methods of welding arc control are outlined.

Поступила в редакцию 09.04.2002,
в окончательном варианте 14.05.2002



ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК

А. С. ПИСЬМЕННЫЙ, д-р техн. наук, М. Е. ШИНЛОВ, канд. техн. наук, Р. В. ЮХИМЕНКО, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены высокочастотные силовые трансформаторы для специализированных установок малой и большой мощности, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона. Описаны особенности их конструктивного исполнения. Приведены результаты сопоставления рассмотренных высокочастотных трансформаторов с трансформаторами промышленной частоты.

Ключевые слова: термообработка, высокочастотные силовые трансформаторы, индукционные установки, конструкция, магнитопровод, обмотки

Большинство высокочастотных индукционных установок технологического назначения имеют в своем составе силовые трансформаторы, согласующие электрические параметры нагрузки (индуктор с нагреваемой деталью) с параметрами источника питания током высокой частоты.

В бывшем СССР (г. Степанован, Армения) для этих целей серийно выпускались трансформаторы типа ТЗ (трансформатор закалочный) мощностью от 800 до 3200 кВ·А и автотрансформаторы типа АТС мощностью 1500 кВ·А для диапазона частот тока 1...10 кГц. Конструкции этих трансформаторов и автотрансформаторов были максимально унифицированы. В них применяли Ш-образные магнитопроводы, внешние торцы которых вместе с расположенным рядом трубками охлаждения заливали алюминиево-цинковым сплавом, осуществляющим передачу тепла от магнитопровода к системе охлаждения. В трансформаторах использовали обмотки галетного типа с достаточно сложной технологией изготовления.

Первичная обмотка представляла собой плоскую спираль из нескольких витков изолированной медной трубы.

Вторичную обмотку изготавливали путем заливки первичной обмотки и дополнительных трубок охлаждения алюминием. В результате получалась неразборная секция (галета), состоящая из первичной обмотки, полностью окруженной телом вторичной обмотки. Достоинством такой конструкции обмоток является возможность изменения в широких пределах коэффициента трансформации, а также экономия меди. Однако в связи с увеличением потерь во вторичной обмотке и выводных частях обмоток снижается КПД трансформатора.

Универсальности конструкции достигали за счет некоторого увеличения массогабаритных показателей по сравнению со специализированными трансформаторами. Производимые заводом в г. Степанован трансформаторы и автотрансформаторы в основном удовлетворяли потребности в них при комплектации электротермического оборудования. Их применяли во многих случаях даже

тогда, когда мощность технологического оборудования была значительно меньше 800 кВ·А, поскольку трансформаторы меньшей мощности не выпускались (точнее, разрабатывались и изготавливались только в специальных целях).

В настоящее время в странах СНГ сокращено производство некоторых видов электротермического оборудования, практически прекращено производство высокочастотных трансформаторов. При этом остро встала проблема замены устаревшего оборудования.

Кроме того, существует потребность в трансформаторах малой мощности (менее 800 кВ·А) как для специализированных установок (в частности для сварочных машин, имеющих особые требования к массогабаритным показателям), так и для других установок с учетом современных требований, касающихся снижения себестоимости изготовления оборудования и экономии энергии. То же относится к специализированным трансформаторам большой мощности, поскольку они экономичнее, чем универсальные.

Исходя из изложенных причин, в Институте электросварки им. Е. О. Патона разработаны высокочастотные трансформаторы для специализированных установок малой и большой мощности.

Высокочастотный сварочный трансформатор малой мощности типа П-139 УХЛ4 и его модификации П-144 и П-145 (рис. 1) имеют следующие технические характеристики (для конкретного исполнения):

Напряжение, В	
первичное	350
вторичное	32
Ток, А	
первичный	490
вторичный	5000
Мощность нагрузки, кВ·А	160
Частота тока, Гц	2400
Коэффициент трансформации*	11
Масса, кг	22
Габаритные размеры (с кронштейном), мм	
длина	265
ширина	165
высота	280

* Коэффициент трансформации изменяется путем замены первичной обмотки — цилиндрической спирали из медной трубы с необходимым количеством витков.

В трансформаторе используются листовой (витой) П-образный секционированный магнитопровод (рис. 2, а), более простой в конструкции и экономичный в изготовлении по сравнению с шихтованным. Кроме того, он более надежный, чем шихтованный, поскольку в нем не используют стяжку пакета шпильками. Стяжку набора стали осуществляют обматыванием после его сборки миткалевой лентой, пропитанной бакелитовым лаком с последующим прогревом в течение 3...4 ч при температуре около 100 °С. Обе стороны стальных лент перед сборкой магнитопровода покрывают изоляцией.

Большие потери в магнитопроводе трансформаторов обусловливают необходимость применения интенсивного охлаждения. Для этого используют водоохлаждаемые экраны, состоящие из медных радиаторных листов с припаянными к ним трубками для охлаждающей воды (рис. 2, б).

Радиаторные листы выполняют из горячекатаной листовой меди, имеющей большую теплопроводность, вследствие чего тепло, выделяющееся в пакетах магнитопровода, отводится в протекающую по охлаждающим трубкам воду. Потери от протекания вихревых токов в самих радиаторных листах, даже при их сравнительно большой толщине (1...2 мм), в обычных условиях невелики, поскольку медь является немагнитным материалом.

Система водяного охлаждения магнитной цепи выполняется таким образом, чтобы предотвратить образование замкнутых электрических контуров вокруг пакетов стали, которые могли бы вызвать добавочные потери от индуцированных в этих контурах токов. Для поступления воды к системам охлаждения магнитопровода и обмоток они снабжаются необходимым количеством специальных наконечников (штуцеров) из меди, латуни или стали, непосредственно на которые надеваются резиново-тканевые шланги для соединения трубок систем охлаждения между собой, а также для подачи воды от распределющего приспособления. В зависимости от сечения канала системы охлаждения диаметр штуцеров может меняться в широких пределах, соответственно меняется и толщина стенки. Крепление штуцера из латуни и стали к трубкам охлаждения может быть резьбовым, а из меди — выполненным посредством пайки твердым припоем.

Применение интенсивного водяного охлаждения магнитной цепи дает возможность работать с индукцией, недопустимой при ином способе охлаждения, например, воздушном или масляном. При водяном охлаждении сечение сердечника и общие размеры магнитной цепи, а также диаметр обмоток, расположенных coaxialno с сердечником, их длина, активное сопротивление и потери в них уменьшаются.

При размещении радиаторных листов следует исходить из того, что все они должны нести по возможности одинаковую тепловую нагрузку. Их количество не должно быть большим, так как каждый лист с припаянными трубками, занимая часть полезной площади сердечника, снижает коэффициент заполнения сечения магнитопровода, что



Рис. 1. Высокочастотный сварочный трансформатор малой мощности типа П-139

приводит к увеличению радиальных размеров обмоток.

Трансформатор имеет цилиндрическую систему обмоток с непосредственным охлаждением. В большинстве случаев он выполняется со вторичной обмоткой, имеющей один виток, реже два. Первичная обмотка состоит из 10...30 витков.

Первичная обмотка (рис. 2, в) выполнена в виде однослойной спирали. Увеличение количества слоев, непосредственно прилегающих друг к другу, вызывает значительный рост потерь в медных проводниках обмоток вследствие того, что каждый последующий слой находится в магнитном поле, созданном полным током всех предыдущих слоев.

Поскольку при высоких частотах вследствие поверхностного эффекта активное сечение провода располагается в слоях металла, прилегающих к его поверхности, спираль первичной обмотки выполняется из полой медной трубы, канал которой используется для интенсивного водяного охлаждения.

Конфигурация сечения трубы должна быть прямоугольной, поскольку ток в витках первичной обмотки протекает по боковой стороне трубок, и такая конфигурация обеспечивает получение большего активного сечения провода по сравнению с трубкой круглого сечения при равной высоте витка. При этом также улучшаются условия охлаждения обмотки.

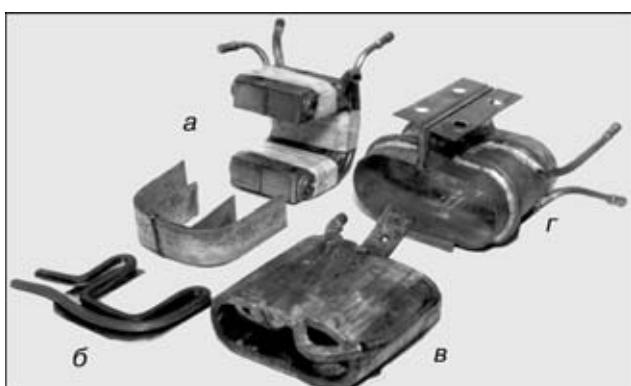


Рис. 2. Основные узлы трансформатора типа П-139: а — витой П-образный секционированный магнитопровод; б — медные радиаторные листы с припаянными к ним трубками для охлаждающей воды; в, г — соответственно первичная и вторичная обмотки

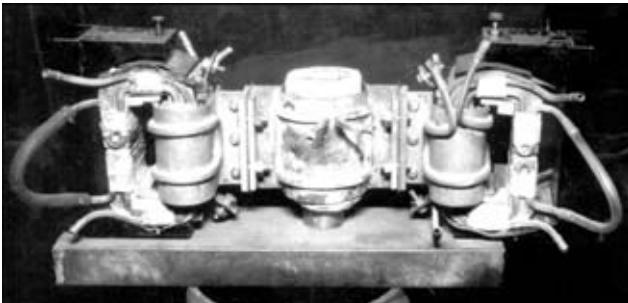


Рис. 3. Использование группы трансформаторов типа П-139 для питания индукционной тигельной печи

Витки первичной обмотки изолируются друг от друга лентой из лакоткани, которая навивается на трубку в один-два слоя внахлест. Выводы обмотки обычно ориентируются в направлении, противоположном контактным колодкам перпендикулярно к оси трансформатора.

Вторичная обмотка (рис. 2, г), представляющая собой незамкнутый цилиндрический виток, расположена коаксиально первичной обмотке с обхватом ее снаружи. Вторичная обмотка может иметь различное исполнение в зависимости от типа и условий работы трансформатора. Целесообразно делать ее из свернутого в виде цилиндра листа красной меди толщиной 2...4 мм. Для охлаждения с наружной стороны цилиндра напаиваются прямогольные медные трубки, расположенные в определенном порядке.

С целью получения наименьшего рассеяния магнитного потока целесообразно, чтобы высота первичной обмотки по возможности была равна высоте вторичной.

Мощность трансформатора может быть удвоена при двойном увеличении количества секций магнитопровода. При этом в два раза возрастает ширина трансформатора.

Трансформаторы можно использовать при групповом соединении первичных или вторичных обмоток. На рис. 3 показан пример использования двух трансформаторов типа П-139 для питания индукционной тигельной печи, причем вторичные обмотки трансформаторов соединены последовательно.

Трансформатор типа П-139 применяется в машинах для стыковой индукционной сварки пайки труб диаметром 114...325 мм (на базе машины для кон-

тактной сварки типа К-584 М), типа П-144 — для соединения труб диаметром 57...114 мм и типа П-145 — труб диаметром 114...325 мм. Машины П-144 внедрены на предприятиях Татарстана для соединения труб нефтяного сортамента [1].

Другое применение трансформаторы типа П-139 нашли в составе блока для индукционной термообработки сварных соединений труб диаметром до 426 мм.

Трансформатор высокочастотный большой мощности типа ОБ-2030 У4 (рис. 4) имеет следующие технические данные:

Напряжение, В	
первичное	750
вторичное (макс.)	300
Коэффициент трансформации	
Мощность нагрузки, кВ·А	15...2
Частота тока, Гц	4000
Масса, кг	2400
Габаритные размеры, мм	
длина	355
ширина	665
высота	620
	515

Такие трансформаторы используются в специальных печах для индукционного переплава, в машинах для разрыва труб на мерные части в линии высокочастотной сварки труб среднего диаметра, а также в других технологических установках.

В трансформаторе применяют магнитопровод броневого типа, имеющий более благоприятные условия охлаждения по сравнению с магнитопроводом стержневого типа [2]. Набор стали магнитопровода для охлаждения разбивается по толщине на несколько пакетов, между которыми размещаются медные радиаторные листы с припаянными к ним трубками для охлаждающей воды.

Трансформатор имеет дисковую систему обмоток, характеризующуюся малым сопротивлением рассеяния, с непосредственным жидкостным охлаждением каждой из секций обмоток. Путем переключения дисков первичной и вторичной обмоток в соответствующие группы можно варьировать коэффициент трансформации в широких пределах.

Первичные катушки в этих обмотках представляют собой многовитковую плоскую спираль овальной формы, которая изготавливается из полой медной трубы. На обоих концах эта трубка имеет контактные колодки для подключения к схеме.

Одновитковые вторичные дисковые катушки представляют собой незамкнутый диск из листовой меди. Примыкающие к разрезу части диска заканчиваются выводами в виде колодок или пластин для объединения катушек в обмотку.

Поскольку каждый диск первичной обмотки размещен между двумя дисками вторичной, то рассеяние всей системы улучшается. Ток распределяется не по одной стороне трубы, как в однослойных цилиндрических обмотках, а по двум, что значительно повышает использование меди, поскольку при прочих равных условиях активное сечение провода увеличивается вдвое. Кроме того, такая конструкция дает возможность размещения в окне магнитопровода обмоток сравнительно небольшой высоты с большим количеством витков (4...15 в первичной обмотке и 1...2 во вторичной).

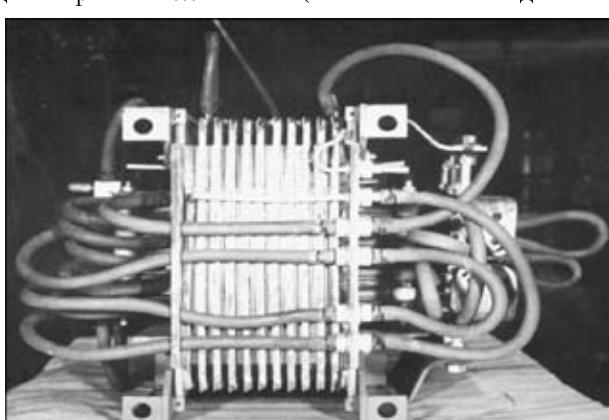


Рис. 4. Трансформатор высокочастотный большой мощности (4000 кВ·А) типа ОБ-2030

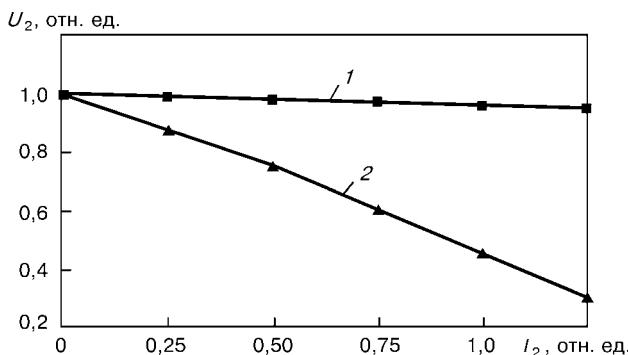


Рис. 5. Внешние характеристики трансформаторов типа П-139 УХЛ4 (1) и ТСС-400/0,5 (2)

В некоторых технологических процессах в качестве источников питания возможно применение трансформаторов как высокочастотных, так и промышленной частоты.

Сравнивая силовые трансформаторы промышленной частоты с высокочастотными силовыми, можно сделать вывод, что во многих случаях последние более эффективны в использовании. Так, например, полезная мощность высокочастотного сварочного трансформатора малой мощности типа П-139 УХЛ4 на один килограмм его массы составляет 2,55 кВт, тогда как полезная мощность силового трансформатора промышленной частоты ТСС-400/0,5, используемого для нагрева и питания электропечей, равняется 0,2 кВт.

Большая степень компактности высокочастотных трансформаторов способствует их использованию в выносных блоках для термообработки изделий.

Рассмотрим, например, конструкцию блока индукционной термообработки труб в полевых условиях (БИТО). В рабочем положении блок располагается на подвеске стрелы транспортной базы комплекса для термообработки труб, соединяется кабелями с источником токов высокой частоты и блоком управления процессом, а также шлангами с магистралью принудительного жидкостного охлаждения токоведущих частей индуктора и трансформатора. БИТО состоит из жесткого индуктора с бесконтактным разъемом, обеспечивающего заданный локальный нагрев зоны сварного шва (раз-

работка ИЭС); высокочастотных трансформаторов типа П-139 (2 шт.); механизма сведения-разведения индуктора; механизма фиксации БИТО на трубе; датчиков параметров режима термообработки.

Индуктор состоит из двух симметричных полуиндукторов, каждый из которых имеет съемный индуктирующий виток, пакеты магнитопровода и токопроводы. Конструкция индуктора обеспечивает равномерный по периметру трубы заданный локальный нагрев сварного соединения, быструю установку на место выполнения термообработки и съем с него, а также отсутствие электрического контакта в месте разъема полуиндукторов, что значительно повышает эксплуатационные показатели и надежность работы оборудования. Конструкция индуктора предусматривает установку датчиков параметров режима термообработки.

Техническая характеристика индуктора

Максимальная мощность, кВт	160
Номинальная частота тока, Гц	2400
Температура нагрева труб, °С	любая в пределах режимов ТО

Другим важнейшим параметром трансформаторов является их внешняя характеристика — зависимость вторичного напряжения U_2 трансформатора от тока нагрузки I_2 , который во многом определяет область эффективного использования трансформатора соответствующей частоты в технологических процессах.

Вид внешней характеристики (рис. 5) зависит от характера нагрузки трансформатора ($\cos \varphi_2$). Как видно из рисунка, внешняя характеристика высокочастотного сварочного трансформатора является крутопадающей, что обеспечивает трансформатору устойчивую работу при его использовании в электродуговых технологиях. Это достигается за счет увеличения индуктивного сопротивления трансформатора и электрических цепей нагрузки (пропорционально частоте тока).

1. Письменный А. С., Шиплов М. Е., Буженецкий А. И. Применение индукционной сваркой для соединения труб нефтяного сортамента // Автомат. сварка. — 1995. — № 12. — С. 35–38.
2. Тир Л. Л. Трансформаторы для устройств индукционного нагрева повышенной частоты. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. — 240 с.

High-frequency power transformers for specialized units of a low and high power developed at PWI are considered. Features of their design are described. Results of comparison of the considered high-frequency transformers with commercial frequency transformers are given.

Поступила в редакцию 04.04.2002



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКЦИИ УПРАВЛЯЮЩЕГО ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ СВАРКЕ ТАВРОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

**С. М. СИДОРЕНКО, инж., А. Д. РАЗМЫШЛЯЕВ, д-р техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь),
В. Р. МАЕВСКИЙ, канд. техн. наук (ОАО «Азовмаш», г. Мариуполь)**

При сварке тавровых соединений из ферромагнитных сталей продольная компонента управляемого продольного магнитного поля в зоне дуги в 2...3 раза меньше, чем при наплавке на плоскую поверхность. Определены оптимальные размеры соленоида, создающегоющееющее продольное магнитное поле, при которых обеспечивается требуемый уровень индукции в зоне сварочной дуги при сварке тавровых соединений из ферромагнитных сталей.

Ключевые слова: дуговая сварка под флюсом, ферромагнитные стали, тавровые соединения, магнитное поле, индукция, соленоид, расчеты, исследования

При автоматической дуговой сварке под флюсом тавровых соединений листовых конструкций из ферромагнитных сталей применение продольных магнитных полей (ПРМП) с целью

управления формированием (формой) шва является проблематичным. Это связано с тем, что магнитные силовые линии ПРМП будут шунтироваться свариваемыми листами, а в зоне сварочной дуги (рис. 1, *a*, точка 0) продольная компонента индукции поля B_z будет уменьшаться по сравнению с наплавкой на плоское изделие (рис. 1, *b*).

Для достижения максимальных значений B_z в зоне сопряжения листов таврового соединения (рис. 1, *a*, точка 0) целесообразно уменьшать наружный диаметр d_n ферромагнитного сердечника соленоида, создающего ПРМП. Внутренний диаметр отверстия в этом сердечнике, предусматривающем прохождение токоподводящего мундштутка и электродной проволоки (зачастую также из ферромагнитного материала диаметром $d_s = 3 \pm 5$ мм), исходя из конструктивных соображений должен составлять не менее 12 мм. В дальнейших экспериментах и расчетах принято постоянным значение $d_n = 12$ мм, диаметр электродной проволоки $d_s = 5$ мм, расстояние от торца электрода до точки 0 (рис. 1, *a*) $\Delta = 5$ мм. Катушку из медного изолированного провода диаметром 2,0 мм с количеством витков $w = 20$ размещали на сердечнике. В катушке пропускали переменный ток $I = 42$ А с частотой 50 Гц.

Целью настоящей работы явилось исследование уровня индукции ПРМП в зоне сварочной дуги с целью выяснения возможности использования ПРМП для управления формированием шва тавровых соединений из листовых конструкций ферромагнитных сталей, а также определение оптимальных размеров элементов соленоида применительно к сварке указанных соединений.

Расчетные исследования компонент индукции выполняли по методике, описанной в работе [1], а экспериментальные — с использованием миллитесламетра типа Ф4356 с датчиком

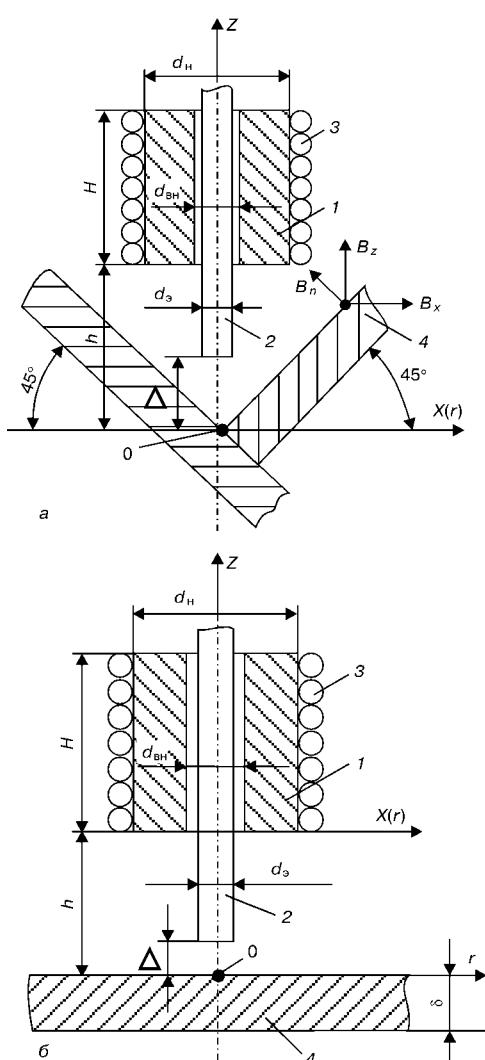


Рис. 1. Схема выполнения таврового соединения (*a*) и наплавки (*б*) с применением ПРМП: 1 — сердечник; 2 — электродная проволока; 3 — витки катушки; 4 — изделие

© С. М. Сидоренко, А. Д. Размышилев, В. Р. Маевский, 2002

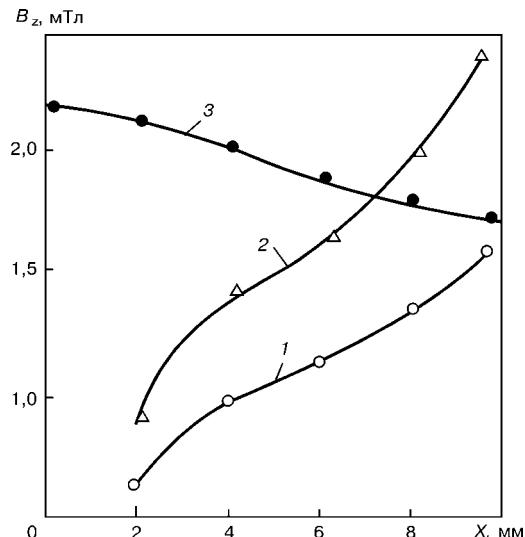


Рис. 2. Распределение индукции ПРМП вдоль оси 0X для таврового соединения (1, 2) и плоской пластины (3): 1, 3 — B_z ; 2 — B_n

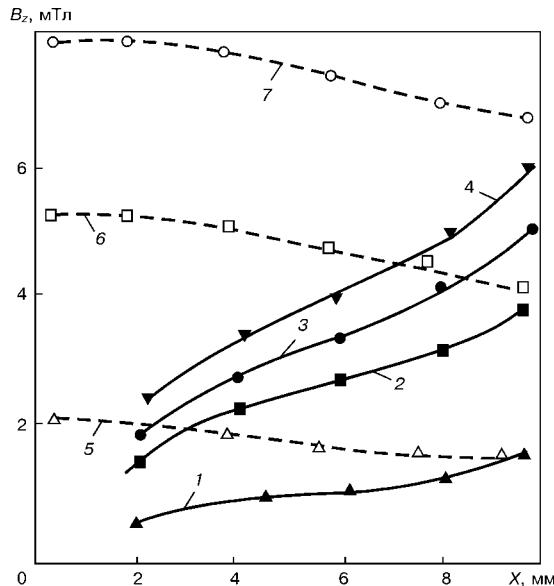


Рис. 3. Распределение компоненты индукции B_z вдоль оси OX при различных значениях d_n ($H = h = 40$ мм): 1–4 — тавровое соединение; $d_n = 20, 30, 40, 50$ мм; 5–7 — плоская пластина, $d_n = 20, 30, 40$ мм

Холла, имевшим измерительную базу 4×4 мм. В исследованиях изменяли размеры сердечника: высоту H в пределах $20 \dots 80$ мм, наружный диаметр d_n в пределах $20 \dots 50$ мм, расстояние от торца соленоида до точки 0 в пределах $20 \dots 50$ мм.

Следует отметить, что на рис. 2..4 имело место хорошее совпадение экспериментальных (точки) и расчетных (кривые) данных. По мере увеличения значений координаты X (следует учесть, что соответственство на столько же возрастают значения координаты Z , см. рис. 1, а) компонента индукции B_z возрастает (рис. 2, кривая 1). Аналогично увеличивается и нормальная компонента индукции B_n (измерения выполняли вдоль поверхности пластин) (рис. 2, кривая 2). В этом случае величина горизонтальной компоненты индукции B_x велика (см. рис. 1, а). При использовании в качестве изделия плоской пластины из такой же ферромагнитной стали (Ст3сп толщиной $d = 20$ мм) компонента индукции B_z вдоль OX , находящейся в плоскости диаметрального сечения цилиндрического соленоида, уменьшается (рис. 2, кривая 3). Горизонтальная (радиальная) компонента индукции B_x незначительна [2].

Существенные отличия в строении ПРМП в этих случаях обусловлены значительным шунтированием магнитного поля близкорасположенными пластинами таврового соединения к ферромагнитному сердечнику соленоида и ослаблением индукции B_z в зоне предполагаемого расположения сварочной дуги (ориентировано при значениях $X \leq 4$ мм). Из рис. 2 следует, что при $X = 4$ мм для таврового соединения $B_z = 1,0$ мТл, а при расположении этого соленоида над плоской пластиной $B_z = 2,0$ мТл, т. е. индукция B_z ослаблена в 2 раза. Для области $X = 2$ мм индукция ослаблена еще больше (в 3 раза).

При увеличении d_n индукция B_z значительно возрастает (рис. 3). Если увеличивать высоту соленоида H (при неизменных ампервитках), то индукция B_z в соответствующих точках (при равных значениях координаты X) значительно уменьшается (рис. 4, кривые 1..3). При увеличении параметра h и неизменных значениях параметра H индукция B_z в соответствующих точках также уменьшается (рис. 4, кривые 4..6). Таким образом, для повышения уровня индукции B_z в зоне дуги при сварке тавровых соединений (из ферромагнитных сталей) следует уменьшать значения параметров H и h , а наружный диаметр d_n увеличить.

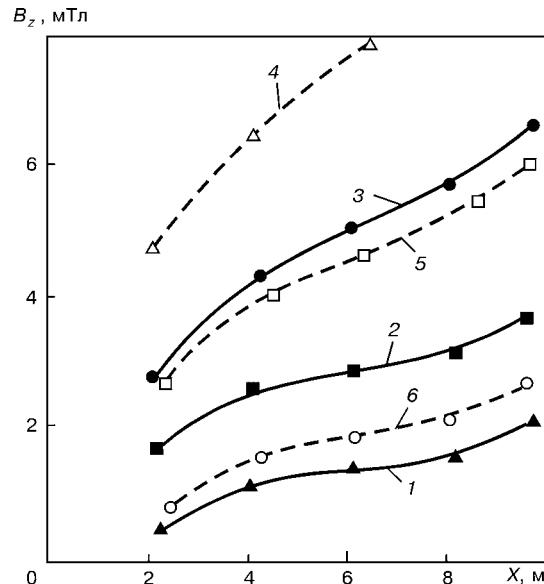


Рис. 4. Распределение компоненты индукции B_z вдоль оси OX ($d_n = 30$ мм): 1–3 — $h = 40$ мм, $H = 80, 40, 20$ мм; 4–6 — $H = 40$ мм, $h = 20, 30, 40$ мм

вать, однако в таких пределах, чтобы витки катушки не замыкались на изделие.

Оптимальными, по-видимому, следует считать величины: $d_n = 30$ мм, $H = 20 \dots 40$ мм, $h = 30$ мм. Если принять $H = 20$ мм, то для $w = 20$ (диаметр провода 2,0 мм) необходимо двухслойное исполнение катушки соленоида.

При сварке тавровых соединений несмотря на значительное ослабление компоненты индукции B_z ПРМП только за счет выбора рациональных размеров ферромагнитного сердечника (и катушки) соленоида d_n , H , h можно достичь (при равной намагничивающей силе катушки) такого же уровня индукции B_z в зоне дуги ($X = 2 \dots 4$ мм), который имеет место при наплавке на плоскую пластину (рис. 3, кривые 2, 3, 5).

Выполняли сварку тавровых соединений из стали Ст3сп проволокой Св-12ГС диаметром 5 мм под флюсом АН-348А без воздействия и с воздействием ПРМП с частотой 50 Гц. Сварку пластины (толщина 20 мм) производили на режиме ($I_{cb} = 730 \dots 750$ А, $U_d = 27 \dots 29$ В, $v_{cb} = 40$ м/ч), при котором формируется шов выпуклой формы [3]. Использовали соленоид следующих размеров: $d_n = 40$ мм, $H = 50$ мм (см. рис. 1, а), намагничивающая сила катушки 3000 ампервитков, вылет электрода $h = 40$ мм. Измеренная продольная компонента индукции ПРМП у изделия под электродом (в точке 0 на рис. 1, а) — 50 мТл.

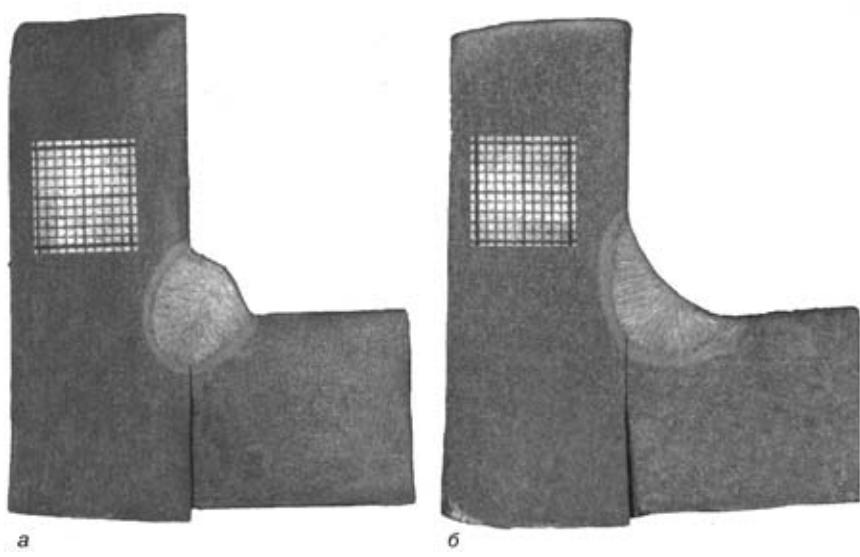


Рис. 5. Макрошлифы тавровых соединений при сварке без воздействия ПРМП (а) и с воздействием ПРМП (б) ($\times 1,5$)



При обычной сварке шов имеет выпуклую форму (рис. 5, а), а при сварке с воздействием ПРМП — благоприятную (с точки зрения уменьшения коэффициента концентрации напряжений) вогнутую форму (рис. 5, б) с плавным переходом шва к основному металлу при отсутствии подрезов.

Таким образом, возможно, использование ПРМП для управления формой швов тавровых соединений. В дальнейшем целесообразно исследовать взаимосвязь параметров ПРМП (индукции, частоты ПРМП) с формой шва, размерами его в сечении и служебными характеристиками тавровых сварных соединений.

Выводы

1. При сварке тавровых соединений из ферромагнитных сталей продольная компонента ПРМП в зоне дуги в 2...3 раза меньше, чем при наплавке на плоскую поверхность.

In welding of T-joints from ferromagnetic steels a longitudinal component of controlling longitudinal field in the arc zone is 2...3 times lower than that in surfacing on flat surface. Optimum sizes of solenoid generating longitudinal magnetic field are defined at which the required level of induction in the welding arc zone in ferromagnetic steel T-joint welding is provided.

2. Путем выбора оптимальных размеров соленоида при сварке тавровых соединений в зоне дуги можно добиться такого же уровня индукции ПРМП, как и при наплавке на плоскую пластину при равной намагничивающей силе катушки.

1. Размышляев А. Д., Маевский В. Р., Сидоренко С. М. Расчет индукции магнитного поля соленоида с ферромагнитным сердечником применительно к дуговой наплавке // Автомат. сварка. — 2001. — № 8. — С. 22–24.
2. Размышляев А. Д. Влияние магнитного поля на размеры зоны проплавления при наплавке под флюсом // Там же. 1996. — № 8. — С. 25–26, 30.
3. Акулов А. И., Бельчук Г. А., Демянцевич В. П. Технология и оборудование сварки плавлением. — М.: Машиностроение, 1977. — 432 с.

Поступила в редакцию 01.10.2001

УДК 621.791.76

УДАРНАЯ СВАРКА В ВАКУУМЕ АЛЮМИНИЯ С МЕДЬЮ

Г. К. ХАРЧЕНКО, д-р техн. наук, **Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО**, **В. В. АРСЕНИЮК**, кандидаты техн. наук,
Е. В. ПОЛОВЕЦКИЙ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучены особенности массопереноса при ударной сварке в вакууме алюминия с медью. Разработан процесс соединения без образования интерметаллидов встыке.

Ключевые слова: ударная сварка, массоперенос, биметалл, интерметаллид

Биметаллические соединения алюминия с медью имеют высокую теплопроводность, электропроводность и широко применяются в различных отраслях промышленности. Сварка взрывом (в силу ряда специфических особенностей) является одним из наиболее эффективных методов получения медно-алюминиевых переходников. Последующая холодная прокатка, вырезка плоских или штамповка сложной формы композиционных переходников позволяет получить качественные медно-алюминиевые контакты различного назначения [1].

Нахлесточные биметаллические соединения в виде шайб можно изготавливать также диффузионной сваркой в вакууме, что значительно упрощает технологию изготовления медно-алюминиевых контактов. Однако в процессе сварки встыке образуется сплошная прослойка интерметаллидов, обладающих диэлектрическими свойствами, что обусловливает высокое электросопротивление биметаллического контакта. В связи с тем, что инкубационный период образования интерметаллида при температуре 500 °C не превышает нескольких секунд [2], можно утверждать, что традиционные способы диффузионной сварки не обеспечивают формирование соединения алюминия с медью без интерметаллидной прослойки.

Представляется перспективным применить для сварки указанных металлов способ ударной сварки в вакууме (УСВ), при котором время высокотемпературной деформации составляет примерно 10^{-2} с, т. е. значительно меньше инкубационного периода образования интерметаллида. Авторами установлено, что способ УСВ наиболее перспективен для соединения разнородных металлов, имеющих ограниченную взаимную растворимость и малую длительность инкубационного периода образования интерметаллидов. На примерах соединения тугоплавких металлов со сталью [3] установлено, что при УСВ на стадии скоростной осадки встыке протекают интенсивные диффузионные процессы, которые обуславливают формирование

обширной зоны объемного взаимодействия в виде твердых растворов свариваемых металлов без образования интерметаллидов.

Цель настоящей работы состояла в получении нахлесточного биметаллического соединения медь–алюминий в виде шайб без интерметаллидной прослойки встыке способом УСВ. Сваривали медь М1 и сплав алюминия АД1 в виде заготовок диаметром 30 и толщиной 2 и 4 мм. Перед сваркой заготовки обезжиривали, стыкуемые поверхности шабрили. Сварку заготовок осуществляли на установке У-394М. Параметры процесса УСВ: температура сварки — 500 °C; энергия удара — 2...3 кДж. Для нагрева использовали кольцевые электронно-лучевые нагреватели. Масса ударника и скорость его перемещения обеспечивали необходимую энергию, идущую на образование сварного соединения. В процессе предварительного нагрева образцы меди и алюминия находились в разведенном состоянии (зазор составлял 2...3 мм). Импульсная нагрузка устраняет зазор между образцами и перемещает их в холодную формирующую матрицу, где происходит сварка в твердой фазе с одновременной формовкой биметаллического контакта необходимой конфигурации [4]. Деформация образцов меди и алюминия по толщине составляет соответственно 10 и 40 %, что обуславливает механическое разрушение оксидной пленки на алюминии в процессе сварки. Металлографический и микрорентгеноспектральный анализ сварного соединения показали отсутствие интерметаллидов встыке. Микротвердость (нагрузка 10 г) меди, алюминия истыка составляет соответственно 680, 350 и 400 МПа.

Изучали особенности массопереноса при УСВ алюминия с медью. Перед сваркой на медь наносили изотоп ^{63}Ni (толщина покрытия составляла 1...2 мкм). Установлено, что перемещение ^{63}Ni идет в алюминий и медь на расстояние до 50 мкм. Коэффициент массопереноса достигает $10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$, что еще раз подтверждает ранее открытое явление аномального ускорения диффузионных процессов в твердых металлах при высококонтинентивном силовом воздействии [5].



Проводили сравнительные испытания биметаллических контактов, имеющих в стыке слой интерметаллидов, и без них. Для образования в стыке слоя интерметаллида толщиной 10...15 мкм соединения, полученные УСВ, дополнительно отжигали при температуре 500 °C в течение 45 мин. Установлено, что более высокие показатели тепло- и электропроводности имеют биметаллические контакты, не содержащие в стыке интерметаллиды.

1. Пеев А. П. Разработка технологических процессов изготовления сваркой взрывом медно-алюминиевых элементов токоподводящих узлов для предприятий энергетики и электрометаллургии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Волгоград: ВГТУ, 2001. — 19 с.

The process of vacuum percussion welding of aluminium to copper has been developed. Metallography and X-ray microanalysis proved the absence of intermetallic compounds in the resulting welded joints.

2. Трутнев В. В., Якушин А. Ф., Якушина Г. В. Кинетика роста промежуточных фаз в соединении меди с алюминием // Свароч. пр-во. — 1971. — № 1. — С. 15–16.
3. Металлургия и технология сварки тугоплавких металлов и сплавов на их основе / С. М. Гуревич, М. М. Нероденко, Г. К. Харченко, Е. А. Аснис, Е. В. Полицук. — Киев: Наук. думка, 1982. — 304 с.
4. Arsenyuk V., Ignatenko A., Kharchenko G. Vacuum percussion welding — a new method joining dissimilar metals // Proc. of sump. on exploiting solid state joining, 13–14 Sept., 1999. — Cambridge, Great Abington: TWI, EWI, 1999.
5. Аномальное ускорение диффузии при импульсном нагружении металлов / Л. Н. Лариков, Ф. М. Фальченко, В. Ф. Мазанко, С. М. Гуревич, Г. К. Харченко // Докл. АН УССР. Сер. А. — 1975. — № 7. — С. 635–639.

Поступила в редакцию 09.04.2002

Диссертации на соискание ученой степени



Национальный НИИ охраны труда Министерства труда и социальной политики

О. Г. Левченко (ИЭС) защитил 14 мая 2002 г. докторскую диссертацию на тему «Способы и средства защиты локализации и нейтрализации сварочных аэрозолей».

В диссертации развиты представления о формировании состава сварочных аэрозолей (СА) при электродуговом сварочном процессе как результате равновесного и неравновесного испарения компонентов расплава, разработаны математические модели химического состава твердой составляющей СА (ТССА). Показано, что за счет выбора режима сварки можно регулировать соотношение равновесного и неравновесного испарения компонентов расплава и изменять состав ТССА.

Диссидентом установлено, что при сварке модулированным током в отличие от сварки постоянным током удается снизить интенсивность выделения ТССА и содержание в нем марганца до 2,5 раз. Показано, что сложные зависимости интенсивности определения СА от сварочного тока в основном обусловлены глубиной проплавления основного металла. Минимальный уровень выделения СА достигается при максимальном проплавлении основного металла.

В работе показано, что СА и способы сварки, при которых они образуются, можно классифицировать по химическому составу газоподобной составляющей СА (ГССА) и присвоить им названия: бесфтористый, фтористый, оксиодуглеродный, озоновый, фтористо-оксиднуглеродный и фтористо-озоновый. Установлено, что наиболее универсальным фильтрующим материалом для улавливания вредных компонентов ГССА и ТССА является природный алюмосиликат-цеолит; для нейтрализации монооксида углерода наиболее эффективным фильтрующим материалом является предложенная новая модификация цеолит-кадмий и кобальт-тзамещенный клиноптилолит.

С участием диссидентанта наложен серийный выпуск фильтровентиляционных агрегатов «Темп-2000» и модификаций на их основе, переносных вентиляционных агрегатов «Шмель-2500», а также портативных устройств очистки и подачи воздуха в зону дыхания сварщика — Шмель-40».



Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

В. Г. Кузьменко (ИЭС) защитил 12 июня 2002 г. докторскую диссертацию на тему «Термодинамические и структурные аспекты выбора составов флюсов для электродуговой сварки (основы теории флюсов нейтрального типа)».

В диссертации изложены теоретические положения о принципах выбора состава флюсов для электродуговой сварки. В основу выбора положены результаты анализа требований к флюсам, изучения физико-химических процессов в сварочной ванне, а также термодинамические и структурные исследования шлаковых расплавов в диапазоне температур 1500...2000 К. Обоснованы принципы выбора состава флюсов нейтрального типа, физико-химические свойства которых способны оптимально адаптироваться к состоянию зон сварочной ванны.

Диссидентом установлено, что позитивное и негативное влияние флюса на металл сварочной ванны реализуется через шесть ее экспериментально определенных функциональных зон, включающих плавление металла и флюса, действие дуги, турбулентное течение металла и шлака, ламинарные течения металла и шлака, неподвижности металла, твердоожидное состояние металла и шлака, локализация которых обусловлена экспериментально-асимметричным термоциклом нагрева и охлаждения металла и флюса.

Термодинамические исследования шлаков системы $MnO-SiO_2-Me_xO_y$ показали, что при добавлении Al_2O_3 , CaO , TiO_2 , ZrO_2 имеет место сложный характер межионного взаимодействия, который сопровождается знакопеременным отклонением от законов идеальных расплавов, обусловленным энергетической неравноценностью ионов в расплавах и влиянием ковалентных связей между ними. В результате измерения активностей компонентов определены составы шлаков с высоким содержанием Al_2O_3 , которые при сбалансированном сочетании с компонентами, имеющими разное соотношение ионных и ковалентных связей, существенно ограничивают активность MnO и SiO_2 и соответственно способность окислять металл.

Установленный в диссертации механизм действия шлаков на металл сварочной ванны позволяет прогнозировать их влияние на сварочно-технологические и металлургические характеристики сварочного процесса.



ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

Износостойкая электродная проволока высокой твердости с флюсовым сердечником, отличающаяся тем, что флюсовой сердечник дополнительно содержит кремнефтористый натрий, ниобит, бор, кварц и редкоземельные металлы при следующем соотношении компонентов, мас. %: 1...10 молибдена, 1...10 вольфрама, 1...10 графита, 1...7 никеля, 2...10 ванадия, 20...40 хрома, 5...15 кремнефтористого натрия, 1...10 ниобита, 10...25 бора, 2...10 кварца, 1...8 редкоземельных металлов. Патент РФ 2181077. Пэнь Джушки [10].

Способ сварки труб и устройство для его осуществления, отличающийся тем, что для удержания конца электродной проволоки впереди сварочной ванны во время выполнения начального прохода осуществляют изменение скорости перемещения электроэлектрического аппарата без его остановки. Патент РФ 2181320. Уильям Д. Паркер (Линкольн Электрик Компани, США) [11].

Способ прессовой сварки с нагревом дугой, отличающийся тем, что в процессе нагрева осуществляют управляемое непрерывное относительное перемещение свариваемых деталей, при этом зазор между торцами деталей поддерживают постоянным, в качестве параметра регулирования величины зазора используют значение напряжения на сварочной дуге. Патент РФ 2181647. С. И. Кучук-Яценко, В. Ю. Игнатенко, В. С. Качинский, М. П. Коваль (ИЭС им. Е. О. Патона) [12].

Способ сварки заготовок тонколистовых материалов, при котором в одной из заготовок отбортовывают кромку под углом 90° и сваривают с другой заготовкой, отличающийся тем, что отбортовку кромки производят в верхней заготовке высотой 3...4 толщины материала, верхнюю заготовку накладывают на нижнюю заготовку, а сварку ведут внахлестку оплавлением отбортовки плавмой. Патент РФ 2181648. А. Ф. Коцей, В. В. Бондарь, С. Ю. Чернобоков (ОАО Белоярский экспериментально-инструментальный завод) [12].

Способ пайки алюминия с использованием флюса, содержащего фторалюминат калия, отличающийся тем, что пайку осуществляют без применения припоев и используют флюс, дополнительно содержащий K_2SiF_6 , при следующем соотношении компонентов, мас. %: K_2SiF_6 6...50, фторалюминат калия 50...94. Патент РФ 2182059. Т. Борн, Х.-Й. Белт (Сольвей флуор инд Дериватс Гмбх, Германия) [13].

Сварочный аппарат постоянного тока, отличающийся тем, что в него введены силовой и накопительный дроссели, а силовой трансформатор выполнен насыщающимися, при этом силовой дроссель включен последовательно с первичной обмоткой силового трансформатора, вспомогательная обмотка одним из выводов, связанных с одним из входных выводов вспомогательного выпрямителя, соединена электрически согласно со вторичной обмоткой и вторым выводом через накопительный дроссель — с другим входным выводом вспомогательного выпрямителя, или вспомогательная обмотка одним из выводов, связанных с одним из входных выводов вспомогательного выпрямителя, соединена электрически согласно со вторичной обмоткой через накопительный дроссель и вторым выводом — с другим входным выводом вспомогательного выпрямителя. Патент РФ 2182060. А. П. Буденный [13].

Германия

Способ сварки алюминия переменным током и вольфрамовым электродом в инертном газе предусматривает выполнение

сварки в смеси 83...95 об. % гелия и преимущественно аргона в качестве остатка. Патент 19837039. А. Farwer (Messer Griseheim GmbH).

ЕПВ

Сварочный генератор с активным фильтром содержит выпрямитель, подключенный к сети переменного тока, инвертор, соединенный с выпрямителем, выходной диодный блок, соединенный с инвертором, а также активный фильтр, подключенный параллельно к входу выпрямителя. Фильтр пропускает ток I_2 и накладывает его на ток I_1 выпрямителя. Результирующий ток I_3 имеет синусоидальную форму. Патент 978344. G. Montecceki (Selco S.R.L.).

Мягкие припои, имеющие оптимальную температуру плавления, повышенные механические свойства и хорошую смачиваемость паяемой поверхности, изготавливают из сплавов Sn-Zn-Bi, Sn-Bi-Ag и Sn-Zn-In. При этом в первый и второй сплавы добавляют медь и германий, а в третий сплав — германий и серебро. Патент 978346. K. Habu, H. Takeda (Sony Corp.).

Франция

Способ и устройство для пайки деталей электроники, например, на печатной плате, осуществляют с помощью припоя, уложенного на подложку в месте крепления детали. Пайку осуществляют путем термообработки подложки при давлении, близком к атмосферному. При этом на подложку воздействуют средой, содержащей нестабильные или возбужденные химические вещества, особенно электрически заряженные. Среда создается путем пропускания исходного газа через электрический разряд. Под действием разряда происходит нагрев химических веществ. Патент 2781706. C. Carsac, G. Conor, T. Sindzingre et al. (L'Aer Liquide Societe Anonyme Poul L'Etude Et L'Exploitation Des Procedes Georges Claude).

Великобритания

Устройство для внутренней сварки труб содержит сварочную головку, которая смонтирована на держателе, а также механизм, с помощью которого сварочный электрод вводят в контакт с внутренней поверхностью трубы. Таким механизмом может быть гидроцилиндр или надувная подушка, которая прилагает давление к головке, прижимая электрод к стенке трубы. Головка может устанавливаться на держателе с помощью шарнира. Патент 9815128. M. Dale (Rover Group Limited).

Способ сварки труб с местом, при котором используют уголки. Вначале с помощью рельефной сварки уголки соединяют с поверхностью трубы. Затем лист прикрепляют к уголкам с помощью крепежных деталей, типа болтов, заклепок и т. п. Патент 9815119. G. John (Rover Group Ltd.).

Машина для подводной электродуговой сварки неплавящимся электродом в среде защитного газа содержит источник питания, установленный в надводном положении, сварочную горелку, опускаемую под воду, образующую дугу, которая сваривает плиты, а также упругий кожух, который окружает зону сварки. Кожух изготовлен из ткани типа шерсти, волокна которой переплетены с волокнами углерода. Под кожух подается под давлением аргон, который вытесняет воду из зоны сварки. Машина оснащена телекамерой, которая передает изображение зоны сварки. Патент 280865. E. Sekiguchi и др. (Hitachi Ltd.).

* Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетенях РФ «Изобретения. Полезные модели» за 2002 г. (в квадратных скобках указан номер бюллетеня), а также «Изобретения стран мира» за 2001 г. (вып. 18, № 2).



ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ЖУРНАЛАМ*



(Италия), 2001. — № 5 (итал. яз.)

Dini G., Failli F., Pecoraro L., Santochi M. Моделирование методом конечных элементов процесса деформации сварных конструкций, с. 581–590.

Piccardo P., Pinasco M.R., Ricci E., Rosellini C. Свойства смачиваемости и свариваемости золотых сплавов, используемых для изготовления ювелирных изделий, с. 593–606.

Dunkerton S., Dunn B. D., Ferrie W. B. Сварка и соединение в условиях космоса, с. 615–627.

Stauffer H. Гибридная лазерная сварка, с. 635–639.

(Италия), 2001. — № 6 (итал. яз.)

Vedani M. Микроструктурные и механические свойства швов, выполненных контактной рельефной сваркой на аустенитных нержавеющих стальах, с. 717–725.

Colitti M. Экономические и технологические аспекты и стандартизация, с. 727–729.

Barsanti L. Свариваемость стали X100, используемой для строительства метанопровода, с. 731–738.

Mandina M., Tolle E. Мартенситные стали 9 %Cr–1Mo–Nb–V позволяют более высокие допустимые напряжения при разрушении вследствие ползучести и более высокую стойкость против окисления при высокой температуре, с. 743–750.

Dzienitzki D. Импульсная сварка ТИГ с постоянным током высокой частоты. Новый вариант процесса, с. 771–774.

Определение размеров рефлекторов с помощью ультразвукового контроля, с. 777–781.



(Австрия), 2002. — № 1 (нем. яз.)

Vanschen W. Резка лазерным лучом, с. 2–6.

Hackl H. Инновации в сварке в защитных газах, с. 7–9.

Открытие цеха для испытания шин и колес в испытательном центре в Вене, с. 12.

Wetterau J. Азот делает процесс сварки алюминия стабильнее, с. 13.

Цифровая радиография — путь в 21-й век, с. 14–15.



(Франция), 2001. — Vol. 55, № 5/6 (франц. яз.)

Dilthey U., Wiesschermann A. Перспективы сочетания лазерного луча с дуговыми процессами сварки, с. 3–11.

Французские станки на мировом рынке, с. 13, 15–16.

Manteghi S. Усталостные испытания круглых заготовок, сваренных трением, с. 19–28.

Haraga K. Механические характеристики соединений алюминий–алюминий и алюминий–сталь, используемых с целью облегчения массы автомобильных кузовов, с. 29–34.



(Румыния), 2001. — № 4 (December) (рум. яз.)

Ene T., Dumitriu D. Исследования по восстановлению деталей типа вала с помощью прямолинейной контактной сварки, с. 49–54.

* Раздел подготовлен сотрудниками Научно-технической библиотеки ИЭС им. Е. О. Патона. Более полно библиография представлена в Сигнальной информации (СИ) «Сварка и родственные технологии», издаваемой в ИЭС и распространяемой по заявкам (заказ по тел. (044) 227 07 71 НТБ ИЭС).

Sarbu I. Установленные способы изготовления аустенитно-ферритных нержавеющих стальных электродов, с. 55–62.

Joni N. Потребляемая энергия при импульсно-дуговой сварке МИГ/МАГ, с. 63–67.



(Швеция), 2001. — Vol. 56, № 2–3 (рус. яз.)

Луккари Ю. Самый большой в мире круизный лайнер, с. 3–5.

Шрибман В. Используйте преимущества нового процесса магнитно-импульсной сварки, с. 6–8.

Веман К. Разработка новых сварочных источников повышает качество сварки, с. 9–11.

Геке С., Хедергард Й., Лундин М., Кауфман Г. МИГ/МАГ сварка tandemом, с. 12–16.

Енсен Б.-И. Marathon Pac TM — емкая упаковка сварочной проволоки, с. 17–19.

Бломе К. МИГ сварка порошковой проволокой теплоустойчивой ферритной жаропрочной стали, с. 20–24.

Пашхольд Р. Нанесение коррозионно-стойкого покрытия методом электрошлаковой наплавки лентой, с. 26–31.

Каулих Г., Кайссер П. Сварка в химической промышленности, с. 30–36.

Кауфман Г. Лазерная сварка — окажет ли она существенное влияние на технологию сварки, с. 37–39.



(Великобритания), 2002. — January/February (англ. яз.)

Dickerson T., Feih S. Моделирование клеевых соединений с высокой прочностью сцепления, с. 3–7.

Wintle J. Надежность сварных соединений — следующий этап, с. 8, 13–14.

Hilton P. Применение табличных вычислений в области сварки мощным лазером, с. 15–17.



(Великобритания), 2001. — № 115 (англ. яз.)

Froment I. Практические рекомендации по сварке. Сварка пластмасс струей горячего газа. Ч. 1. Основы, с. 4–5.

Программное обеспечение RISKWISE находит применение в Японии, с. 6.

(Великобритания), 2002. — № 116 (англ. яз.)

Burling P. Квантовый скачок в проектировании ортопедических протезов, с. 1.

Froment I. Практические рекомендации по сварке. Сварка пластмасс струей горячего газа. Ч. 2. Методы сварки, с. 4–5.

Taylor D. Гибридная лазерно-дуговая сварка в Британском институте сварки, с. 7.



(Югославия), 2001. — Let. 50, № 3 (словен. яз.)

Hobbacher A. Научные и технологические тенденции в области сварки и соединения с точки зрения экономичных и надежных изделий, с. 91–106.

(Югославия), 2001. — Let. 50, № 4 (словен. яз.)

Suban M. Влияние формы рабочего конца сварочного электрода на зажигание дуги при МАГ/МИГ сварке, с. 127–131.

Praunseis Z., Toyoda M., Ohata M. Влияние мартенситно-аустенитных компонентов на вязкость и металлографические свойства сварных соединений из высокопрочных низколегированных сталей, с. 132–139.