



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

Издатель: 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,
И. В. Кривцун, С. И. Кучук-Яценко,
Ю. Н. Ланкин,
В. К. Лебедев (зам. гл. ред.),
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,
В. И. Махненко, В. Ф. Мошкин,
О. К. Назаренко, И. К. Походня,
И. А. Рябцев,
Б. В. Хитровская (отв. секр.),
В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

Н. П. Алешин (Россия)
Б. Брейтвейт (Великобритания)
Д. фон Хофе (Германия)
К. Буше (Франция)
Гуань Цяо (Китай)
У. Дилтай (Германия)
П. Зайффарт (Германия)
А. С. Зубченко (Россия)
Т. Игар (США)
К. Иноуэ (Япония)
Н. И. Никифоров (Россия)
Б. Е. Патон (Украина)
Я. Пилярчик (Польша)
Чжан Янмин (Китай)
В. К. Шелег (Беларусь)

Адрес редакции:
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
Тел.: (38044) 287 6302, 529 2623
Факс: (38044) 528 0486
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Редакторы:
Е. Н. Казарова, Т. В. Юштина

Электронная верстка:
И. С. Баташева, А. И. Сулима,
И. Р. Наумова, И. В. Петушков

Свидетельство о государственной
регистрации КВ 4788 от 09.01.2001

Журнал входит в перечень
утвержденных ВАК Украины изданий
для публикации трудов соискателей
ученых степеней.
При перепечатке материалов ссылка
на журнал обязательна.
За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности
не несет.

Цена договорная.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Порицкий П. В., Прилуцкий В. П., Замков В. Н. Контракция сварочной дуги с вольфрамовым катодом в смесях инертных газов 3

Земмлер У., Алалусс К., Маттес К.-И. Моделирование методом конечных элементов металлургических и термомеханических процессов при упрочняющей плазменной наплавке 10

Фадеев Ю. И., Добрушин Л. Д., Илларионов С. Ю. Механизмы формообразования границ соединения при сварке взрывом 16

Борисов Ю. С., Зацерковный А. С., Кривцун И. В. Особенности теплообмена ионизированного газа с испаряющейся частицей в условиях плазменного напыления 20

Дмитрик В. В., Конык А. И. К концепции зарождения пор в сварных соединениях при низкотемпературной ползучести 28

Рымар С. В. Оптимизация трансформатора с развитыми ярмовыми магнитными потоками рассеяния 32

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Блащук В. Е. Цирконий: сплавы, сварка, применение (Обзор) 36

Воропай Н. М., Илюшенко В. М., Мишенков В. А. Технологические возможности процессов импульсной двухдуговой сварки в защитных газах (Обзор) 44

Тарарычкин И. А. Особенности сборки и многопроходной сварки кольцевых стыков толстостенных обечаек 49

Жадкевич А. М. Светолучевая сварка и пайка (Обзор) 55

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Рыжов Р. Н. Применение комбинированных электромагнитных воздействий для улучшения качества швов при сварке неплавящимся электродом 59

Гнатенко М. Ф. Совершенствование технологии термообработки покрытых сварочных электродов 61

Диссертация на соискание ученой степени 63

Новости 64

Патенты в области сварочного производства 65

По зарубежным журналам 65

Календарь конференций и выставок в 2005 г. (сварка и родственные технологии) 69

ХРОНИКА

Научно-методическая конференция «Современные проблемы сварки, наплавки и материаловедения» 70

X Международная конференция «Физика и технология тонких пленок» 71

Международная конференция «Ti-2005 в СНГ» 72

Заседание секции «Источники питания и системы автоматического управления сварочным оборудованием» Межгосударственного научного совета по сварке и родственными технологиям 74

ИНФОРМАЦИЯ 76

Разработано в ИЭС 9, 19, 27, 31, 48

Avtomaticheskaya Svarka

(Automatic Welding)

№ 7 (627)
July 2005

Published since 1948

WELDING – CUTTING – SURFACING – BRAZING – COATING

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

Publisher: 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,
I. V. Krivtsun,
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, V. F. Moshkin,
O. K. Nazarenko, I. K. Pokhodnya,
I. A. Ryabtsev,
B. V. Khitrovskaya (exec. secr.),
V. F. Khorunov, K. A. Yushchenko

THE INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL:

N. P. Alyoshin (Russia)
B. Braithwaite (UK)
C. Boucher (France)
D. von Hofe (Germany)
Guan Qiao (China)
U. Dilthey (Germany)
P. Seyffarth (Germany)
A. S. Zubchenko (Russia)
T. Eagar (USA)
K. Inoue (Japan)
N. I. Nikiforov (Russia)
B. E. Paton (Ukraine)
Ya. Pilarczyk (Poland)
Zhang Yanmin (China)
V. K. Sheleg (Belarus)

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, T. V. Yushina
Electron galley:
I. S. Batasheva, A. I. Sulima,
I. R. Naumova,
I. V. Petushkov

State Registration Certificate
KV 4788 of 09.01.2001

All rights reserved.

This publication and each of the articles
contained here in are protected
by copyright.

Permission to reproduce material
contained in this journal must be obtained
in writing from the Publisher.

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Poritsky P. V., Prilutsky V. P., Zamkov V. N. Contraction of welding arc with tungsten cathode in mixtures of inert gases	3
Zemmler U., Alaluss K., Matthes K.-J. FE-Modeling of the thermometallurgy and stress-distortion behavior during PTA hardfacing	10
Fadeenko Yu. I., Dobrushin L. D., Illarionov S. Yu. Mechanism of formation of joint boundaries shape in explosion welding	16
Borisov Yu. S., Zatserkovnyi A. S., Krivtsun I. V. Peculiarities in heat exchange of ionized gas with evaporating particle under conditions of plasma spraying	20
Dmitrik V. V., Konyk A. I. Towards the conception of pore initiation in welded joints at low-temperature creep	28
Rymar S. V. Optimizing of transformer with developed yoke magnetic leakage fluxes	32

INDUSTRIAL

Blashchuk V. E. Zirconium: alloys, welding, application (Review)	36
Voropaj N. M., Ilyushenko V. M., Mishenkov V. A. Technological capabilities of process of a pulsed twin-arc shielded-gas welding (Review)	44
Tararychkin I. A. Peculiarities of assembly and multi-pass welding of circumferential welds of thick-walled shells	49
Zhadkevich A. M. Light beam welding and brazing (Review)	55

BRIEF INFORMATION

Ryzhov R. N. Application of combined electromagnetic actions for improvement of quality of welds in non-consumable electrode welding	59
Gnatenko M. F. Updating of technology of heat treatment of coated welding electrodes	61
Thesis for scientific degree	63
News	64
Patents in the field of welding	65
Review of foreign journals	65
Calendar of conferences and exhibitions in 2005 (welding and allied technologies)	69

NEWS

Scientific-Methodical Conference «Current problems of welding, surfacing and materials science»	70
X International Conference «Physics and technology of thin films»	71
International Conference «Ti-2005 in CIS»	72
Meeting of section «Power sources and systems of automatic control of welding equipment» of Inter-State Scientific Council on welding and related technologies	74

INFORMATION	76
-------------------	----

Developed at the PWI9, 19, 27, 31, 48

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



КОНТРАКЦИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ С ВОЛЬФРАМОВЫМ КАТОДОМ В СМЕСЯХ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

П. В. ПОРИЦКИЙ, канд. физ.-мат. наук (Ин-т ядер. исслед. НАН Украины),
В. П. ПРИЛУЦКИЙ, канд. техн. наук, **В. Н. ЗАМКОВ**, д-р техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучено влияние физических характеристик смесей инертных газов на контракцию положительного столба дуги. Показано, что изменение концентрации компонент смеси значительно влияет на их теплофизические свойства и общие характеристики электрон-атомных столкновений, которыми определяются электрофизические параметры дуги при определенных условиях ее горения. В связи с этим контракция сварочной дуги с вольфрамовым катодом в смесях инертных газов существенно зависит от соотношения концентрации компонент смеси. Определено, что сжатие дугового разряда в конкретной смеси газов наиболее значительно, если в процессе отвода тепла доминирует газовая теплопроводность.

Ключевые слова: сварка ТИГ, эффект Рамзауэра, сварочная дуга, вольфрамовый катод, смесь инертных газов, тепловая контракция, газовая теплопроводность

Эффективность сварки вольфрамовым электродом зависит при прочих равных условиях от глубины проплавления основного металла и прямо связана с концентрацией энергии (плотностью тока) в дуге. При сварке ТИГ используют несколько способов повышения концентрации энергии в столбе дуги; один из них — применение смеси инертных газов. Так, например, сварку погруженной дугой, как правило, выполняют в смеси аргона и гелия, что дает возможность при увеличении глубины проплавления получать швы без дефектов.

Целью настоящей работы является исследование влияния физических характеристик смесей инертных газов на контракцию положительного столба дуги.

Для дуговых разрядов характерно явление контракции, которое возникает при уменьшении области, занимаемой разрядной плазмой. В работах [1, 2] исследованы различные механизмы контракции дуги в инертных газах. Однако полученные при этом результаты не следует распространять на случай использования смесей инертных газов, поскольку свойства газовых смесей и многокомпонентной плазмы разрядов в этих смесях не являются аддитивными относительно свойств отдельных компонент [3–6]. Для сварочной дуги характерна тепловая контракция, возникновение которой обусловлено процессами переноса тепла [7, 8]. Проведем анализ процессов, вызывающих тепловую контракцию, полагая при этом, что электронная T_e и газовая T температуры в плазме столба дуги различные.

Двухтемпературная термическая плазма. Основной для рассмотрения характеристик дугового разряда является уравнение переноса тепла (уравнение Эленбааса–Геллера [7–9]). Его решение зависит от значений коэффициентов переноса (тран-

спортных коэффициентов), которые являются функциями температуры и концентрации заряженных частиц в плазме дуги. В свою очередь концентрация заряженных частиц в плазме определяется температурой, причем вид этой зависимости существенно отличается при различных состояниях плазмы. Рассмотрим сначала состояние плазмы дугового разряда.

В работе [2] утверждается, что в плазме сварочной дуги, состоящей из инертного газа, имеет место локальное термодинамическое и ионизационное равновесие, для которого характерны определенные газовая T и электронная T_e температуры. Соотношение между ними для случая сварки на постоянном токе можно записать в виде [8–10]

$$T_e - T = \left(\frac{E}{n_a}\right)^2 g(T_e), \quad (1)$$

где $g(T_e) = \frac{m_a}{3k} \left(\frac{e}{m_e}\right)^2 \frac{\langle u^2/k_{ea} \rangle}{\langle u^2 k_{ea} \rangle}$; m_a , m_e — масса соответственно атома и электрона; u — скорость электрона; $k_{ea} = v/n_a = u\sigma_{ea}^*(u)$ — константа скорости электрон-атомных столкновений; n_a — плотность атомов; σ_{ea}^* — транспортное (диффузное) сечение электрон-атомных столкновений. Причем функция $g(T_e)$ является универсальной характеристикой отрыва электронной температуры от газовой и для данного вида газа не зависит ни от напряженности электрического поля E , ни от плотности атомов n_a .

Критерий применимости формулы (1), который также отвечает возможности введения T_e и T температур для описания низкотемпературной плазмы, имеет следующий вид [10, 11]:

$$n_e \sigma_{ee} > \frac{m_e}{m_a} n_a \sigma_{ea}, \quad (2)$$



где n_e — плотность электронов; σ_{ee} , σ_{ea} — характерные сечения соответственно электрон-электронных и электрон-атомных столкновений.

Поскольку обычно для плазмы дуговых рядов $\sigma_{ee} \gg \sigma_{ea}$, то этот критерий может нарушаться только в случае малой степени ионизации газа. Плотность электронов, как правило, является экспоненциальной функцией электронной температуры, поэтому нарушение критерия (2) будет иметь место при низких (для условий плазмы дуги) значениях T_e .

Рассмотрим состояние газа при слабой ионизации, когда

$$kT_e \ll E_I, \quad (3)$$

где E_I — эффективная энергия ионизации газовой среды.

Если эта среда является смесью газов, то E_I можно рассчитать с помощью энергии ионизации компонент смеси:

$$E_I = -kT_e \ln \left[\frac{1}{(g_i/g_a)_{eff}} \sum_j x_j \frac{g_{ij}}{g_{aj}} \exp \left(-\frac{E_{I,j}}{kT_e} \right) \right],$$

где g_i , g_a — статистические веса основных состояний соответственно иона и атома; $(g_i/g_a)_{eff} = \sum_j (g_{ij}/g_{aj})x_j$ — эффективное отношение

статистических весов; $E_{I,j}$ — энергия ионизации компоненты; x_j — молярная доля компоненты; индекс j обозначает принадлежность к j -й компоненте смеси. При таком определении E_I в случае предельно малого содержания дополнительных компонент значения этого параметра совпадают с энергией ионизации однокомпонентного газа.

Отметим, что исходя из условия (3) плотность возбужденных атомов в плазме мала по сравнению с их плотностью в основном состоянии.

Выражение (1) можно также использовать с некоторыми изменениями для расчета термической плазмы газовых смесей. Так, обобщая метод сферических гармоник для кинетического уравнения Больцмана в случае газовых смесей, получаем, что отрыв электронной температуры можно рассчитать как

$$T_e - T = \frac{\mu_a}{3k} \left(\frac{eE}{m_e} \right)^2 \frac{\langle u^2/v_{ea} \rangle}{\langle u^2 v_{ea}^* \rangle}, \quad (4)$$

где μ_a — эффективная масса атома смеси; v_{ea} и v_{ea}^* — соответственно суммарная и эффективная частота столкновений электронов с атомами смеси, которые определяются следующим образом:

$$\frac{1}{\mu_a} = \sum_j \frac{x_j}{m_{aj}}; \quad v_{ea} = \sum_j v_{ea,j}; \quad v_{ea}^* = \sum_j \frac{m_{aj}}{\mu_a} v_{ea,j}$$

где m_{aj} — масса атома компоненты смеси; $v_{ea,j}$ — частота столкновений с атомами данной компоненты.

При повышении степени ионизации $\alpha = n_e/N$ (где N — плотность тяжелых частиц) до $1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3}$ становятся существенными столкновения электро-

нов с ионами. Для учета кулоновских столкновений в слабоионизированной плазме необходимо в использованных формулах заменить частоту электрон-атомных столкновений на суммарную частоту столкновений электронов с тяжелыми частицами $v_e = n_{ea} + v_{ei}$; $v_e^* = v_{ea}^* + v_{ei}^*$, где v_{ei} , v_{ei}^* — частота электрон-ионных столкновений соответственно суммарная и эффективная, которая выражается через транспортное сечение кулоновских столкновений [2] и определяется аналогично введенной выше частоте электрон-атомных столкновений.

Кроме того, повышение концентрации заряженных частиц усиливает эффекты, вызванные неидеальностью низкотемпературной плазмы, а именно уменьшение давления плазмы и энергии ионизации атома в плазме. Указанные эффекты будем учитывать с помощью наиболее распространенного метода дебаевской поправки или «коррекции Грима» [12]:

$$\Delta p = \frac{n_e e^2}{12\pi\epsilon_0 r_D}; \quad \Delta E_I = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_D},$$

где Δp — уменьшение давления; e — заряд электрона; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная вакуума; r_D — дебаевский радиус; ΔE_I — уменьшение энергии ионизации газовой среды.

Знание зависимости, существующей между электронной и газовой температурами, а также значений концентрации заряженных частиц позволяет рассчитать коэффициенты переноса в плазме дугового разряда в смеси инертных газов.

Транспортные коэффициенты термической плазмы газовых смесей. Современное состояние теории газовых смесей, а также многокомпонентной плазмы характеризуется отсутствием единого подхода к описанию процессов переноса. Причиной этого является очень сложный характер зависимости свойств газовых смесей и плазмы от свойств чистых газов и концентрации компонент. Детальный анализ современных теоретических представлений приведен в [3–6].

В настоящей работе для расчета коэффициентов переноса использовали методы, рекомендованные в [4, 5] и подходящие для смесей инертных газов и многокомпонентной плазмы дуги.

Теплопроводность газов, как известно, практически не зависит от давления (кроме случая низкого давления), а коэффициент теплопроводности инертных газов приближенно описывается с помощью формулы из работы [13]:

$$\kappa = \kappa_{273}(T/T_{273})^\gamma,$$

где $T_{273} = 273,16$ К; $\kappa_{273} = \kappa(T_{273})$; $0,70 < \gamma < 0,95$.

Особенностью теплопроводности газовых смесей является неаддитивность этой характеристики относительно теплопроводности каждой компоненты смеси. Для расчетов газовой теплопроводности смеси двух инертных газов использовали известную формулу Васильевой [3, 4]:



$$\kappa = \frac{\kappa_1}{1 + A_{12} \frac{x_2}{x_1}} + \frac{\kappa_2}{1 + A_{21} \frac{x_1}{x_2}},$$

где коэффициенты A_{lj} ($l, j = \{1, 2\}; l \neq j$) рассчитаны согласно приближенному методу Мэзона–Саксена [3, 4]:

$$A_{lj} = \frac{0,85}{2\sqrt{2}} \left(1 + \frac{m_{al}}{m_{aj}} \right)^{-1} \left(1 + \left(\frac{k_l}{k_j} \right)^{1/2} \left(\frac{m_{al}}{m_{aj}} \right)^{1/4} \right)^2,$$

где k_l, k_j — коэффициент теплопроводности отдельной компоненты; m_{al}, m_{aj} — масса атомов; индексы l и j — вид частиц в смеси газов.

Коэффициент теплопроводности вследствие процессов ионизации-рекомбинации κ_p согласно [10] определяли как

$$\kappa_p = \frac{D_{amb} n_e}{2} \left(\frac{E_I}{kT_e} \right)^2,$$

где D_{amb} — коэффициент амбиполярной диффузии.

Эта величина может вносить существенный вклад в общую теплопроводность вследствие большого значения $(E_I/kT_e)^2$.

Коэффициент амбиполярной диффузии выражается через коэффициент диффузии ионов D_{ion} согласно [8, 10]:

$$D_{amb} = D_{ion} \left(1 + \frac{T_e}{T} \right). \quad (5)$$

Коэффициент диффузии ионов может быть рассчитан следующим образом [8, 15]:

$$D_{ion} N = d_{i0} \sqrt{T/T_{i0}}, \quad (6)$$

где d_{i0} — постоянная для данного типа иона и буферного газа при $T_{i0} = 1000$ К.

В расчетах использовали данные о диффузии ионов, полученные в работах [14, 15]. Следует отметить, что при диффузии иона в газе коэффициент диффузии определяется в основном процессом резонансной перезарядки.

В случае газовой смеси коэффициент амбиполярной диффузии вместо (5) определяется как [5]:

$$D_{amb} = \sum_i \frac{n_i}{n_e} D_i \left(1 + \frac{T_e}{T} \right),$$

где сумма берется по всем видам ионов; D_i — коэффициент диффузии i -го вида в данной смеси, который рассчитывается как

$$D_i = 1 / \left(\sum_l \frac{x_l}{D_{il}} \right),$$

где x_l — молярная доля l -й компоненты смеси; D_{il} — коэффициент взаимной диффузии иона в l -й компоненте смеси, определяемый по (6).

Электропроводность плазмы и электронную теплопроводность находят из выражений [5, 16]:

$$\sigma = \frac{n_e e^2 \langle u^2 \rangle}{m_e \langle u^2 \nu_{ea} \rangle}; \quad k_e = \frac{5}{2} \frac{n_e k^2 T_e \langle u^2 \rangle}{m_e \langle u^2 \nu_{ea} \rangle}.$$

Как уже отмечалось выше, при повышении степени ионизации вместо частоты столкновений ν_{ea} следует выбирать частоту ν_e , которая определяется исходя из суммарного сечения столкновений электронов с тяжелыми частицами. При расчетах параметров дугового разряда транспортные сечения выбирали по табулированным данным [17].

Согласно приведенным выше зависимостям теплопроводность термической плазмы в двухтемпературной модели характеризуют несколько коэффициентов, которые отображают разные механизмы теплопроводности. С одной стороны, эти коэффициенты зависят от электронной или газовой температур, а с другой, между электронной и газовой температурами существует взаимосвязь, определяемая выражением (4). Таким образом, найдены необходимые для решения уравнения теплопереноса транспортные коэффициенты, а также соотношение между электронной и газовой температурами.

Модель дугового разряда. Рассмотрим плазму положительного столба сварочной дуги при условии его цилиндрической формы, наличии в нем локального термодинамического и ионизационного равновесия, постоянства давления по сечению разряда. Предполагая, что интенсивность тепловыделения пропорциональна локальной плотности тока, запишем уравнение переноса тепла в виде

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r \left(\kappa(T) \frac{dT}{dr} + (\kappa_e(T_e) + \kappa_p(T_e)) \frac{dT_e}{dr} \right) \right] + q(r) = 0, \quad (7)$$

где r — расстояние от оси разряда; $\kappa(T), \kappa_e(T_e), \kappa_p(T_e)$ — коэффициенты соответственно газовой, электронной теплопроводности и теплопроводности вследствие процесса ионизации-рекомбинации; $q(r) = j(r)E$ — мощность тепловыделения в единице объема; $j(r) = \sigma E$ — плотность электрического тока.

Уравнение (7) описывает перенос тепла по сечению разряда с учетом газовой и электронной теплопроводности. Поле температур в плазме дуги определяем из этого уравнения. Как и в работе [2], граничные условия выбираем следующим образом: температура в центре дуги $T(0) = T_0$; температуру стенки разрядной камеры T_R (без ограничения общности рассмотрения) принимаем равной некоторому постоянному значению (например, 300 К).

Следуя процедуре, изложенной в работе [2], для расчета параметров дугового разряда получаем следующую систему алгебраических уравнений:

$$T_e - T_0 = \left(\frac{E}{N} \right)^2 g(T_e); \quad (8a)$$

$$IE = \frac{\pi k T_e^2}{E_I} \left[16 k \zeta_T \left(\frac{1}{1 + (r_g/R)^2} \right) + 5(k_e + k_p) \right]; \quad (8b)$$



$$S = 0,215q_0r_0^2 \ln(R/r_0); \quad (8в)$$

$$p + \Delta p = NkT_0 + n_e kT_e; \quad (8г)$$

$$\frac{n_e^2}{n_a} = \frac{2g_i}{g_a} \left(\frac{2\pi m_e kT_e}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_I}{kT_e}\right); \quad (8д)$$

$$I = \sigma E \pi r_0^2. \quad (8е)$$

Здесь I — ток дуги; R — радиус стенки разрядной камеры; S — тепловая функция; $q_0 = \sigma E^2$; $\zeta_T = \frac{dT_0}{dT_e} = \left(1 - (T_e - T_0) \frac{d \ln g(T_e)}{dT_e}\right) \left(\frac{2T_e}{T_0} - 1\right)^{-1}$; r_0 — характерный радиус плазмы (радиус контракции), определяемый из соотношения $r_0^2 \approx 1,32r_g^2 + r_J^2$, где r_g и r_J — характерные радиусы контракции при доминировании соответственно газовой и электронной теплопроводности в процессе переноса тепла. Эти радиусы вычисляются из соотношений

$$r_g^2 = \frac{16kT_e^2 \zeta_T}{q_0 E_I}, \quad r_J^2 = \frac{11,6kT_e^2 (\kappa_e + \kappa_p)}{q_0 E_I}.$$

Отметим, что физический смысл радиуса контракции в данной модели состоит в том, что на таком расстоянии от оси разряда плотность тока уменьшается примерно в 15... 20 раз.

Дополнительными условиями к системе уравнений (8а)–(8е) являются квазинейтральность плазмы $n_e = n_i$, постоянство напряженности электрического поля $E = \text{const}$ и внешнего давления $p = \text{const}$.

Система уравнений (8а)–(8е) отличается от аналогичной системы, использованной в работе [2], тем, что в ней учитываются наличие в плазме дуги ионов и кулоновских столкновений, а также эффектов неидеальности низкотемпературной плазмы и влияния геометрического фактора на теплоперенос (8б).

Тепловая функция S определяется следующим образом:

$$S = \int_0^{T_e} (\kappa_e(T'_e) + \kappa_p(T'_e)) dT'_e + \int_0^{T_0} \kappa(T') dT'.$$

Для отдельных инертных газов, когда $k(T) \propto T^\gamma$, и при значениях газовой и электронной температур, принятых равными их значениям на оси разряда, имеем

$$S = (\kappa_e(T_e) + \kappa_p(T_e)) \frac{2\kappa T_e^2}{E_I} + k(T_0) \frac{T_0}{1 + \gamma}.$$

В случае смесей инертных газов, учитывая малую разницу между показателями степени γ , можно получить для тепловой функции следующее простое приближенное выражение:

$$S = (\kappa_e(T_e) + \kappa_p(T_e)) \frac{2\kappa T_e^2}{E_I} + k^*(T_0) T_0,$$

где $k^*(T_0)$ определяется для смеси двух инертных газов как

$$k^*(T_0) = \frac{\kappa_1}{(1 + A_{12} \frac{x_2}{x_1})(1 + \gamma_1)} + \frac{\kappa_2}{(1 + A_{21} \frac{x_1}{x_2})(1 + \gamma_2)}.$$

Таким образом, система уравнений (8а)–(8е) позволяет при заданных значениях тока дуги I и давления p вычислить E , T_e , T_0 , n_e , n_a , N , r_0 .

Результаты расчетов и их обсуждение. Полученная система уравнений представляет собой модель дугового разряда при условии, что тепло, выделяющееся в плазменном канале, переносится за счет теплопроводности на стенки разрядной камеры, где поддерживается определенная температура. Естественно, что сварочная дуга с вольфрамовым катодом не имеет стабилизирующей стенки. Ее роль играют внешние факторы — потоки защитного газа, вызванные внешним обдувом, конвекцией [1, 18, 19] или испарением поверхности анода [1, 18]. Отметим, что для открытой дуги за радиус стенки рекомендуется принимать радиус свечения разряда [19].

Эта модель описывает сварочную «длинную дугу», где тепловой поток отводится на стенки [18, 20]; в «короткой дуге» он отводится главным образом в электроды. Однако, исходя из результатов работы [21] для описания сварочной дуги с вольфрамовым катодом более уместно использовать модель «длинная дуга».

Известно, что характеристики дуги, в которой перенос тепла излучением пренебрежимо мал, описываются кривыми в переменных r/R (приведенный радиус), ER (приведенное напряжение) и I/R (приведенный ток) [22]. На рис. 1 представлены расчетные обобщенные вольт-амперные характеристики в переменных $ER - I/R$, а на рис. 2 — расчетные и экспериментальные кривые зависимости электронной температуры от приведенного тока I/R [19, 23]. При их сравнении можно сделать вывод, что если плотность тока в дуге составляет $j_0 < 1 \text{ кА/см}^2$, различие в результатах расчета и эксперимента не превышает 30%. При более вы-

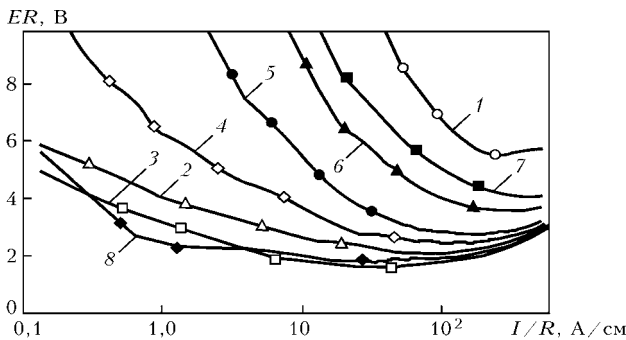


Рис. 1. Расчетные вольт-амперные характеристики ($ER - I/R$), полученные для дуговых разрядов при атмосферном давлении: 1 — гелий; 2 — аргон; 3 — ксенон; 4 — смесь гелий+аргон (10 об. %:90 об. %); 5 — то же (20 об. %:80 об. %); 6 — то же (50 об. %:50 об. %); 7 — то же (70 об. %:30 об. %); 8 — смесь аргон+ксенон (50 об. %:50 об. %)

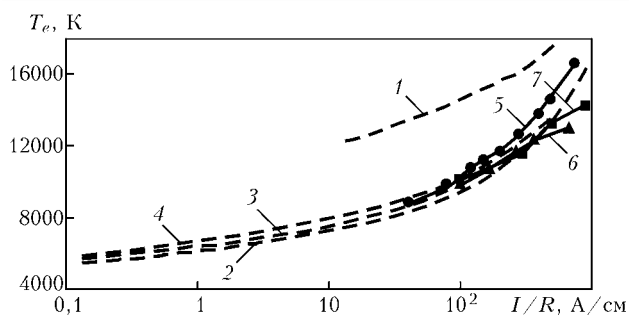


Рис. 2. Зависимость электронной температуры T_e в дуге атмосферного давления от приведенного тока I/R : 1 – гелий; 2 – аргон; 3 – гелий + аргон (30 об. %:70 об. %); 4 – то же (70 об. %:30 об. %); 5–7 – аргон; 5 – обобщение результатов экспериментов [21]; 6, 7 – результаты экспериментов соответственно при $R = 3$ и 2 мм [24]

сокой плотности тока расчетные данные оказываются завышенными, поскольку при этом не учитывается излучение как при переносе тепла, так и в ионизационном балансе плазмы [24]. Отметим, что для аргоновой дуги указанный диапазон плотности тока соответствует температуре ниже 11000 К, при которой излучением обычно пренебрегают [23].

Результаты расчетов параметров дуг при заданных значениях I представлены в таблице и на рис. 3. Полученные данные с учетом изложенных в работе [2], позволяют составить следующую картину контракции дуги в инертных газах и их смесях без учета излучения (рис. 4). Наиболее значительная контракция дугового разряда реализуется в условиях, когда перенос тепла осуществляется за счет газовой теплопроводности. Это соответствует режимам сварочной дуги с относительно малой электронной температурой, а значит, и малыми токами. При повышении тока и температуры электронов происходит увеличение области, занимаемой плазмой. Причем в газе, для которого имеет место эффект Рамзауэра, этот рост значительно более интенсивен, чем для газа, где этот эффект отсутствует (см. рис. 4, а и б, область А).

При дальнейшем увеличении тока дуга переходит в режим, когда доминирующей становится электронная теплопроводность, значение радиуса контракции стабилизируется (см. рис. 4, область В), причем электроны передают свою энергию главным образом при столкновениях с нейтральными

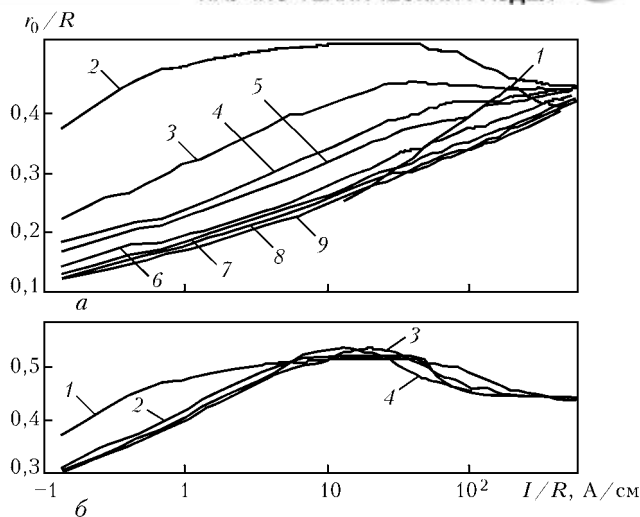


Рис. 3. Зависимость приведенного радиуса контракции дуги r_0/R от приведенного тока I/R в смесях аргон + гелий (а) и аргон + ксенон (б): 1 – гелий; 2 – аргон; 3, 4 – гелий + аргон соответственно 10 об. %:90 об. % и 20 об. %:80 об. %; а: 5, 6 – гелий + аргон соответственно 30 об. %:70 об. % и 50 об. %:50 об. %; 7–9 – гелий+аргон соответственно 70 об. %:30 об. %, 80 об. %:20 об. %, 90 об. %:10 об. %; б: 1 – аргон; 2 – ксенон; 3, 4 – аргон + ксенон соответственно 10 об. %:90 об. %, 20 об. %:80 об. %

атомами. В этом случае $r_0/R \approx \text{const}$, вследствие чего $r_0 \propto R$ [25].

Если ток дуги продолжает возрастать, то это приводит к повышению электронной температуры и степень ионизации газовой среды увеличивается. Усиливается влияние столкновений электронов с ионами, вследствие чего размеры разрядной области для дуги, стабилизированной стенками, начинают уменьшаться (ср. рис. 4, а и 4, б, область С). Отметим, что этот эффект использован для создания мощных дуговых источников света [26]. При еще более сильном токе размеры разрядной области стабилизируются (ср. рис. 4, а и 4, б, область D). Однако необходимо иметь в виду то, что при рассмотрении контракции дуги с доминирующими электрон-ионными столкновениями следует принимать во внимание влияние излучения как на теплоперенос, так и на ионизационные процессы в плазме. Влияние излучения существенно изменяет вид кривых в областях С и D (см. рис. 4).

Следует подчеркнуть, что аргон, криптон и ксенон относятся к газам с ярко выраженным эффектом Рамзауэра, который имеет квантовую при-

Параметры дуговых разрядов при атмосферном давлении и $R = 0,75$ см

Газ	I , А	r_0 , мм	E , В/см	T_0 , К	T_e , К	Q , Вт/см	q_0 , Вт/см ²	$\alpha \cdot 10^2$	ξ	η
Гелий	200	4,45	2,76	8150	10700	$1,7 \cdot 10^3$	$6,1 \cdot 10^3$	8,6	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^5$
Гелий+аргон (30 об. %:70 об. %)	100	3,10	4,17	9500	10520	$4,2 \cdot 10^2$	$1,7 \cdot 10^3$	2,9	$4,1 \cdot 10^{-1}$	$6,2 \cdot 10^3$
Гелий+аргон (70 об. %:30 об. %)	200	3,00	5,68	11470	12300	$1,1 \cdot 10^3$	$4,9 \cdot 10^3$	8,3	$4,3 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^3$
Аргон	100	3,70	2,90	8570	10200	$2,9 \cdot 10^2$	$8,1 \cdot 10^2$	2,4	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^4$
Аргон+ксенон (80 об. %:20 об. %)	100	3,52	2,93	9200	10200	$4,4 \cdot 10^2$	$1,3 \cdot 10^5$	9,4	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^5$
Аргон+ксенон (20 об. %:80 об. %)	100	3,45	2,63	8820	9330	$2,6 \cdot 10^2$	$7,8 \cdot 10^3$	8,8	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$3,6 \cdot 10^5$
Ксенон	100	3,44	2,54	8940	9360	$2,6 \cdot 10^2$	$7,3 \cdot 10^2$	1	$8 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^5$

Примечание. Q – мощность дуги; ξ – отношение газовой теплопроводности к электронной; η – параметр установленного локального термодинамического равновесия.

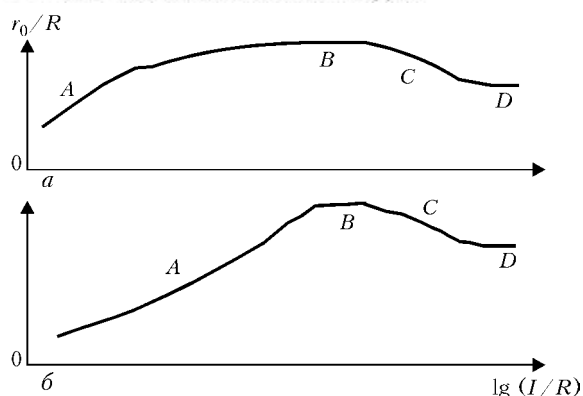


Рис. 4. Зависимость приведенного радиуса контракции дуги r_0/R от приведенного тока I/R для газа с наличием эффекта Рамзауэра (а) и без него (б) (объяснение см. в тексте)

роду и выражается наличием минимума сечения электрон-атомных столкновений для электронов с энергией несколько меньше 1 эВ. Это явление определяет «прозрачность» слабоионизированного газа для таких электронов, вызывает увеличение отрыва электронной температуры от газовой, что уменьшает сжатие дуги. Однако в газовых смесях влияние эффекта Рамзауэра может быть нейтрализовано. Так, добавление к аргону гелия, для которого указаный эффект не имеет места, существенно усиливает сжатие дуги (см. рис. 3, а). При этом заметное усиление контракции наблюдается при добавлении 20...30 об. % гелия к аргону. При дальнейшем возрастании объемной доли гелия в смеси относительное увеличение сжатия ослабляется. Поэтому с точки зрения контракции дуги и увеличения глубины проплавления наиболее эффективной для сварки вольфрамовым электродом представляется смесь с добавкой 20...50 об. % гелия к аргону. Заметим также, что дуговой разряд в смеси гелий + аргон может быть сильнее контрагирован, чем в чистом гелии. Это достигается при достаточном больших токах и содержании гелия в смеси более 50 об. %. В то же время качественного изменения характера контракции в смесях аргон + ксенон не происходит по сравнению с контракцией в чистых газах (см. рис. 3, б), поскольку для обоих случаев имеет место эффект Рамзауэра.

Следовательно, контракция дугового разряда в смесях инертных газов существенно зависит от соотношения концентраций компонент смеси. Изменение последней значительно влияет на теплофизические характеристики смеси и общие характеристики электрон-атомных столкновений, которыми определяются электрофизические параметры дуги при определенных условиях горения разряда.

Таким образом, контракция сварочной дуги с вольфрамовым катодом в смесях инертных газов в значительной степени зависит от соотношения концентраций компонент смеси. Это происходит вследствие того, что изменение концентрации компонент существенно влияет на теплофизические свойства смеси и общие характеристики электрон-атомных столкновений, которыми определяются электрофизические параметры дуги при определенных условиях ее горения.

Сжатие дугового разряда в конкретной смеси газов наиболее значительно, когда в процессе отвода тепла доминирует газовая теплопроводность.

Наличие эффекта Рамзауэра у газа, в котором горит дуга, увеличивает «прозрачность» газовой среды для электронов, что уменьшает сжатие дугового разряда в соответствующем диапазоне температур. Однако в газовых смесях влияние эффекта Рамзауэра может быть нейтрализовано благодаря подбору состава газовой смеси. Так, добавка к газу с наличием эффекта Рамзауэра определенного количества газа без него существенно уменьшит «прозрачность» газовой среды для электронов, что усиливает контракцию дуги. Такой подход открывает возможности для управления контракцией сварочной дуги путем изменения состава рабочей среды.

1. Контракция дуги флюсом при сварке вольфрамовым электродом в аргоне // Б. Е. Патон, В. Н. Замков, В. П. Прилуцкий, П. В. Порицкий // Автомат. сварка. — 2000. — № 1. — С. 3–9.
2. Poritsky P. V., Prilutsky V. P., Zamkov V. N. Effect of a shielding gas on a contraction of the tungsten-cathode welding arc // Paton Welding J. — 2004. — № 6. — Р. 2–9.
3. Шашков А. Г., Абраменко Т. Н. Теплопроводность газовых смесей. — М.: Энергия, 1970. — 288 с.
4. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. — Л.: Химия, 1982. — 592 с.
5. Жданов В. М. Явления переноса в многокомпонентной плазме. — М.: Энергоатомиздат, 1982. — 176 с.
6. Буждан Я. М. О плотности теплового потока и движущих силах диффузии в многокомпонентном идеальном газе // Теплофизика и аэромеханика. — 2002. — 9, № 11. — С. 133–141.
7. Синкевич О. А., Стаханов И. П. Физика плазмы. — М.: Высш. шк., 1991. — 191 с.
8. Eletskii A. V., Smirnov B. M. Nonuniform gas discharge plasma // Physics-Uspekhi. — 1996. — 39, № 11. — Р. 1137–1156.
9. Смирнов Б. М. Сжатие положительного столба дуги высокого давления // Теплофизика высоких температур. — 1997. — 5, № 1. — С. 14–18.
10. Елецкий А. В., Палкина Л. А., Смирнов Б. М. Явления переноса в слабоионизованной плазме. — М.: Атомиздат, 1975. — 336 с.
11. Смирнов Б. М. Кинетика электронов в газах и конденсированных системах // Усп. физ. наук. — 2002. — 172, № 12. — С. 1411–1447.
12. Griem H. R. High-density correction in plasma spectroscopy // Phys. Rev. — 1962. — 128. — Р. 997–999.
13. Фастовский В. Г., Ровинский А. Е., Петровский Ю. В. Инертные газы. — М.: Атомиздат, 1972. — 352 с.
14. Smirnov B. M. Cluster plasma // Physics-Uspekhi. — 2000. — 43, № 5. — Р. 453–491.
15. Радциг А. А. Диффузия заряженных частиц в газе в постоянном электрическом поле // Химия плазмы. — 1981. — 8. — С. 230–263.
16. Голаит В. Е., Жилинский А. П., Сахаров И. Е. Основы физики плазмы. — М.: Атомиздат, 1977. — 384 с.
17. Хаксли Л., Кромттон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах. — М.: Мир, 1977. — 672 с.
18. Жовтянский В. А., Патріюк В. М. Особливості тепловідведення від електричної дуги в парах міді // Укр. фіз. журн. — 2000. — 43, № 9. — С. 1059–1066.
19. Батенин В. М., Минаев П. В. О температуре на оси электрической дуги в аргоне // Теплофизика высоких температур. — 1969. — 7, № 2. — С. 208–212.
20. Жуков М. Ф., Коротеев А. С., Урюков Б. А. Прикладная динамика термической плазмы. — Новосибирск: Наука, 1975. — 298 с.
21. Ерошенко Л. Е., Замков В. Н., Прилуцкий В. П. Исследование свечения паров анода в дуге при сварке титана вольфрамовым электродом в аргоне по слою флюса // Автомат. сварка. — 1997. — № 11. — С. 11–13.
22. Десятков Г. А., Энгельшт В. С. Теория цилиндрического дугового разряда. — Фрунзе: Илим, 1985. — 147 с.



23. Асиновский Э. И., Кириллин А. В., Низовский В. Л. Стабилизированные электрические дуги и их применение в теплофизическом эксперименте. — М.: Наука, 1992. — 264 с.
24. Биберман Л. М., Воробьев В. С., Якубов И. Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. — М.: Наука, 1982. — 375 с.
25. Рахимов А. Т., Улинич Ф. Р. Контракция цилиндрического газового разряда // Докл. АН СССР. — 1969. — 187, № 1. — С. 72–74.
26. Вассерман А. Л. Ксеноновые трубчатые лампы и их применение. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 88 с.

Effect of physical characteristics of inert gas mixtures on contraction of the positive arc column has been studied. It is shown that variations in the concentration of the mixture components has a substantial influence on their thermal-physical properties and general characteristics of electron-atom collisions, which determine electric-physical parameters of the arc under its certain burning conditions. In this connection, contraction of the tungsten-cathode welding arc in the inert gas mixtures greatly depends upon the proportion of the mixture components. It has been found that contraction of the arc discharge in a specific gas mixture is most significant if the gas thermal conductivity is dominant during the heat removal process.

Поступила в редакцию 06.09.2004

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И ВЕРТИКАЛЬНЫХ ШВОВ В МОНТАЖНЫХ УСЛОВИЯХ

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана техника и технология автоматизированной сварки вертикальных и горизонтальных (на вертикальной плоскости) швов с принудительным (или в комбинации со свободным) формированием шва. Свариваемые толщины — 8...60 мм. Использование при сварке современных сварочных материалов — самозащитных и газозащитных порошковых проволок — обеспечивает качество сварных соединений, удовлетворяющее требованиям нормативной документации.

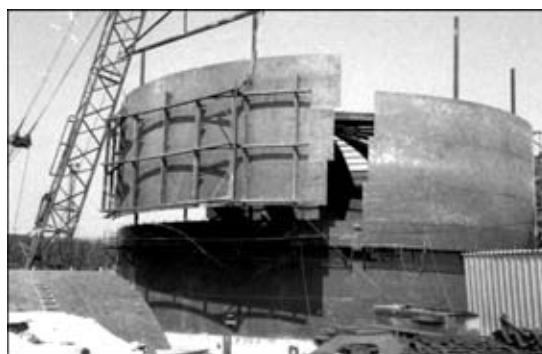
Применение оптимальных режимов сварки способствует повышению производительности процесса в 2...4 раза по сравнению с традиционными процессами механизированной и ручной сварки.

Для реализации данной технологии разработаны легкие монтажные сварочные аппараты блочно-модульной конструкции, перемещающиеся по рельсовому направляющему, закрепленному непосредственно на свариваемом изделии.

Предлагаемые технология и оборудование наряду с высокой производительностью обеспечивают требуемое качество сварных швов, не зависящее от квалификации сварщика, ручной или механизированной сварки, отличаются простотой и надежностью, существенно облегчают труд сварщиков, работающих в монтажных условиях.

Разработанные технология и оборудование предназначены для изготовления крупногабаритных сварных металлоконструкций в монтажных условиях с целью автоматизации сварки швов в различных пространственных положениях.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Отд. № 37, тел./факс: (38044) 287 24 66



Сварка на монтаже стенки резервуара



Выполнение сварки горизонтального шва



МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ И ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКЕ*

У. ЗЕММЛЕР, К. АЛАЛУСС, К.-Й. МАТТЕС (Ин-т технологий обраб. и сварки, Технолог. ун-т, г. Хемниц, Германия)

Изучен процесс плазменной наплавки дугой прямого действия (РТА) твердых износостойких сплавов V12 и V18 на основе ванадия на конструкционную сталь S35J0. Различия в термомеханических свойствах, локальных термопластических деформациях и фазовых превращениях материалов могут вызвать высокие остаточные напряжения и деформации. Сравниваются результаты моделирования с измерениями распределения температуры и деформаций. Проверенные и улучшенные модели на основе метода конечных элементов можно использовать для изучения влияния параметров сварки на деформации и остаточные напряжения в изделиях с целью оптимизации их качества.

Ключевые слова: плазменно-порошковая наплавка, конструкционная сталь, сплавы на основе ванадия, остаточные напряжения, деформации, моделирование, термомеханические параметры, экспериментальные измерения

Благодаря своей прочности в условиях высоких температур стеллит широко используется для наплавки формовочного инструмента, работающего при температуре свыше 600 °С. В работе [1] представлены данные о моделировании методом конечных элементов процесса плазменной наплавки дугой прямого действия (РТА) применительно к формовочному инструменту. Подробно рассмотрены модели на основе метода конечных элементов и приведены результаты численного моделирования, которые сравниваются с экспериментальными данными.

Помимо стеллитов, отличным материалом для износостойкой наплавки являются сплавы на основе железа со значительным (12... 18 мас. %) содержанием ванадия, имеющие высокую твердость. Поскольку они не отличаются прочностью в условиях высоких температур, то в основном применяются для изделий, работающих при низких или умеренных температурах, например, при изготовлении ножей длиной до 4 м для резки бумаги, переработки отходов промышленности, в частности костей. На рис. 1 представлена схема поперечного сечения заготовки такого ножа с канавкой. Поскольку режущие кромки ножа подвергаются значительному износу, канавку делают шириной 30 мм. При РТА она заполняется одним слоем материала (сплавом V12 или V18) на глубину 4 мм. Этот процесс исследовали экспериментальными методами и с использованием численного моделирования. При этом нас интересовали остаточные напряжения, являющиеся причиной зна-

чительной деформации как по толщине V_t , так и по ширине V_b режущей кромки ножа (рис. 2). Для ножей очень большой длины остаточная деформация по ширине V_b кромки может превышать 30 мм. В таких случаях наплавленный слой полностью снимается при повторной механической обработке.

Для получения наплавки с низкими деформацией и остаточными напряжениями необходимо знать размер сварочной ванны, а также теплофизические и механические характеристики металла в процессе наплавки, термообработки и конечной механической обработки. Эти характеристики и их взаимосвязь, а также процессы и свойства

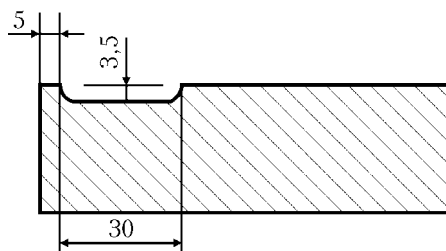


Рис. 1. Схема типичного поперечного сечения заготовки ножа с канавкой

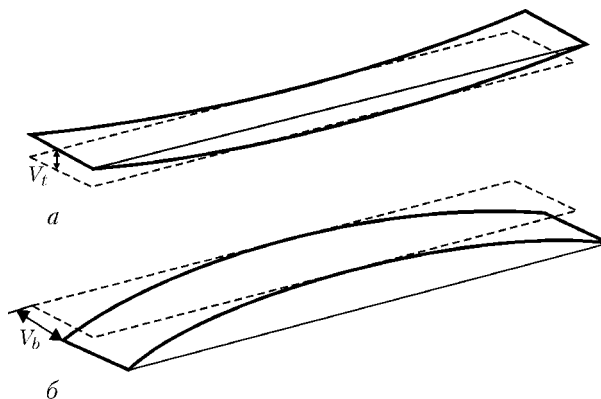


Рис. 2. Остаточные деформации по толщине V_t (а) и ширине V_b (б) кромки ножа

*По материалам Второй международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (13–17 сент. 2004 г., пос. Кацивели, Крым, Украина).



материалов в зависимости от температуры можно исследовать с помощью численного моделирования по методу конечных элементов. Для этого необходимо знать основные термомеханические и теплофизические процессы, происходящие при наплавке, и уметь их моделировать, учитывая существенные и не принимая во внимание несущественные физические взаимодействия, а также использовать соответствующие методы для расчета значимых параметров процессов с помощью моделей.

В настоящей работе представлены модели на основе метода конечных элементов, используемые для расчета деформаций и остаточных напряжений, возникающих при наплавке. Расчетные значения указанных величин сравниваются с результатами экспериментальных исследований. Целью некоторых экспериментов было уточнение неизвестных или недостаточно известных параметров моделей.

Моделирование процесса наплавки по методу конечных элементов. Термомеханическая модель. Распределение температуры описывается следующим нестационарным и нелинейным уравнением теплопроводности и конвекции:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) - \nabla(c\rho \vec{v} T) + q_{vol}. \quad (1)$$

Для ножей большой длины в случае, если конвекция в сварочной ванне (в уравнении выражена условием конвекции) не учитывается и тепловой источник движется прямолинейно с постоянной скоростью v_s , уравнение теплопроводности и конвекции можно записать в подвижной системе координат:

$$c_p \rho v_s \frac{\partial T}{\partial x} = \nabla(\lambda \nabla T) + q_{vol}. \quad (2)$$

Аналитические решения на основе уравнения (2) применяются для уточнения тепловых граничных условий [1]. Кроме того, сокращается трудоемкость вычислений с применением моделей на основе метода конечных элементов. Однако расчет распределения температуры с применением (2) требует решения задачи в подвижной системе координат, что затрудняет расчет реальных деформаций.

Поэтому все эксперименты с термомеханическими моделями выполняются с использованием (1) неподвижной системы координат без учета условий конвекции (конвекция в жидкой ванне приближенно моделируется с помощью искусственного повышения коэффициента теплопроводности).

Предположим, что все материалы считаются однородными, изотропными и их теплофизические параметры (λ и ρc) зависят от температуры. При этом рассматриваются следующие тепловые граничные условия.

1. Плазменную дугу моделируют как подвижный эллиптический источник с гауссовым распределением энергии (источник тепла Гольдака [2]). Поскольку наплавляемый слой имеет большую толщину, объемный источник тепла Гольдака в большей степени соответствует реальному процессу (низкая скорость наплавки предполагает одинаковое распределение тепла как в головной, так и в хвостовой части подвижного источника тепла):

$$q_{vol} = q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} \times \quad (3)$$

$$\times [\exp(-3x^2/a^2)] [\exp(-3y^2/b^2)] [\exp(-3z^2/c^2)].$$

В случае наплавки с поперечными колебаниями горелки последняя перемещается в направлении наплавки (по оси y) со скоростью $v_s \cong 1 \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$ и в поперечном направлении с максимальной скоростью $v_W = 7 \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$ при амплитуде колебаний $W = 28 \text{ мм}$. Периодическое перемещение при поперечных колебаниях составляет $x_W(t)$. Поскольку источник тепла колеблется со скоростью v_W , большей чем скорость наплавки v_s , в подвижной системе координат его можно считать стационарным. В этом случае он определяется путем усреднения за один период колебания маятника $1/f$:

$$q_{vol} = q(x, y, z) = \int_0^{1/f} q_{lin}(x + x_W(t), y, z) dt. \quad (4)$$

Как показано на рис. 3, плотность источника тепла является максимальной с обеих сторон шва, поскольку маятниковое движение горелки изменяет его направление в этих положениях; кроме того,

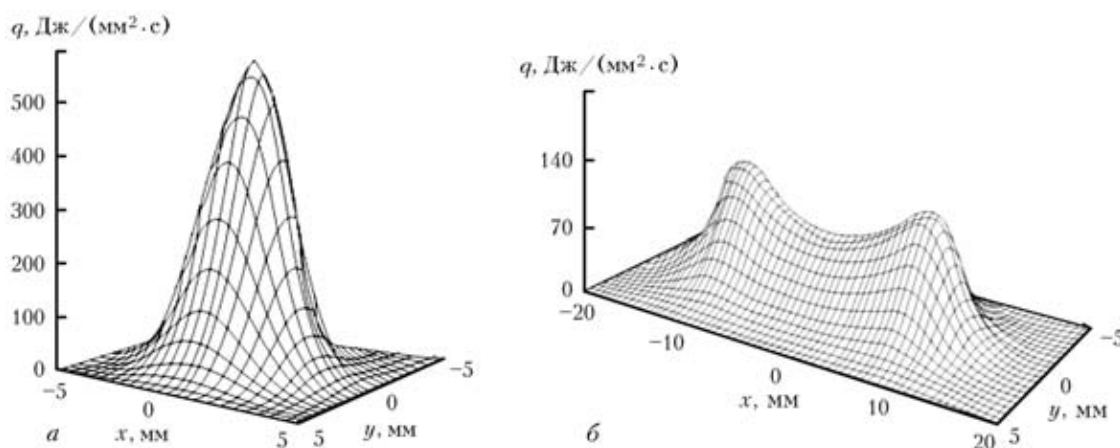


Рис. 3. Распределение тепловой мощности для наплавки линейной (а) и с поперечными колебаниями горелки (б) со скоростью 7 мм/с при $W = 28 \text{ мм}$, задержка во времени составляет 0,6 с



в этих точках наблюдается определенная задержка во времени.

2. Со всех сторон образца перенос тепла определяется излучением и конвекцией в окружающую среду:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_0) + \epsilon C_0(T - T_0)^4, \quad (5)$$

где излучение имеет значение только для верхней поверхности образца. Таким образом, значение коэффициента черноты ϵ на других границах устанавливаются равным нулю.

Суммарный тепловой поток Q определяют с помощью экспериментально измеренных значений тока сварки, напряжения на дуге и скорости сварки с учетом теплового КПД. Параметры материала в зависимости от температуры применяют в соответствии с работами [3, 4]. В качестве основного материала используют конструкционную сталь S355J0 следующего химического состава, мас. %: $\leq 0,2$ C; 1,14 Mn; 0,012 P; 0,007 S; остальное Fe. Химический состав присадочных материалов сплавов V12 и V18 представлен в таблице.

Присадочный материал	C	Cr	Mo	Ni	Si	V	HRC
V12	2,8	4,5	1,3	0,4	0,9	12,0	62
V18	4,0	4,5	1,3	0,4	0,9	18,0	64

Примечание. Основа железо.

Распределение температуры в образцах существенно зависит от коэффициента теплопередачи от образца к столу, на котором располагается сварочное оборудование. Контакт между этими двумя поверхностями является неполным, в литературе данные об этом отсутствуют. Поскольку выполнить измерения сложно, их результаты обычно бывают неточными. В связи с этим температуру измеряли с использованием термопары, а затем с помощью специально разработанной простой стационарной модели на основе метода конечных элементов, значения параметров Q и α уточняли по полученным значениям температуры [1].

Изменение временных тепловых упругопластических деформаций на всех этапах термического цикла вычисляли с учетом расчетных значений температуры и фазового состава металла в течение всего указанного временного интервала. Поскольку

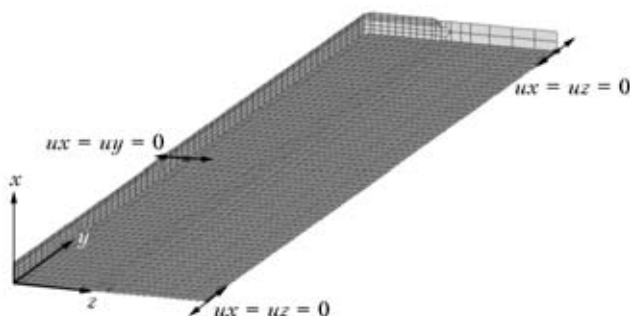


Рис. 4. Граничные условия устойчивости для численной модели

при экспериментах закрепление изделий было неполным, рассматривали только те граничные условия, которые обеспечивали устойчивость модели (при этом при использовании численной модели исключалось движение жесткозакрепленного тела) (рис. 4).

Общая деформация состоит из упругих, пластических, тепловых деформаций и деформаций, вызванных фазовыми превращениями:

$$d\epsilon_{ij}^{sum} = d\epsilon_{ij}^{el} + d\epsilon_{ij}^{pl} + d\epsilon_{ij}^{th} + d\epsilon_{ij}^{tr}. \quad (6)$$

Для расчета пластических деформаций применяется теория пластического течения с использованием изотропных многолинейных и зависящих от температуры кривых текучести, построенных для рассматриваемых материалов. В стали и присадочных материалах аустенитно-ферритные превращения сопровождаются объемными изменениями. Последние являются причиной дополнительных деформаций, из-за которых возникают дополнительные остаточные напряжения. Таким образом, для учета влияния структурных превращений в численную модель необходимо включить данные из термокинетических диаграмм. Термокинетическая диаграмма сварки для стали S355J0 взята из работы [5], для сплава V12 ее строили на основании результатов измерений (рис. 5). При любой скорости охлаждения температура начала мартенситного превращения составляет $M_s = 200$ °C. При температуре окружающей среды остаточное содержание аустенита равно приблизительно 30 мас. %.

Что касается данных о реальных теплофизических параметрах материалов, работающих в условиях высоких температур, близких к температуре плавления, то их едва ли можно найти в литературе и сложно получить путем измерений. Разные фазы материала могут иметь различные теплофизические и механические параметры. Исходя из этого для температуры, выше температуры плавления, нами выбрано очень низкое значение предела текучести.

Модель на основе метода конечных элементов и ее численная реализация. Сетка конечных элементов для заготовки ножа, предназначенного для вырезки отверстий, включая наплавленный слой, состоит приблизительно из 7900 восьмиузловых

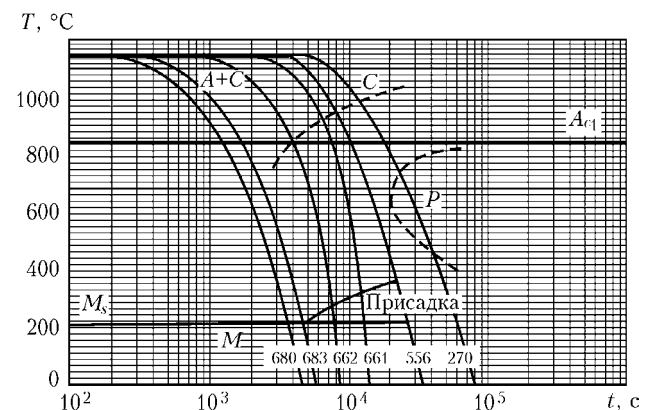


Рис. 5. Термокинетическая диаграмма, построенная на основании результатов измерений для присадочного материала сплава V12

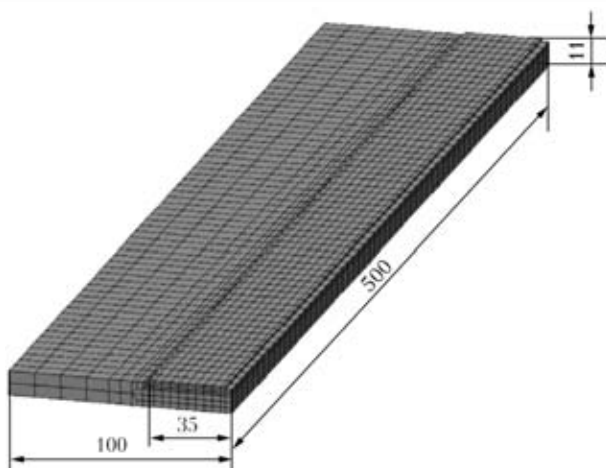


Рис. 6. Сетка конечных элементов, построенная для заготовки ножа размером 500×100×10 мм

элементов (рис. 6). Моделирование и расчеты выполняли с использованием программы FE Code SYSWELD™ [6].

Данная модель используется для исследования и оптимизации влияния распределения энергии горелки, скорости сварки, условий закрепления и теплового режима на остаточные деформации V_t и V_b ножей. Основное внимание в настоящей работе уделено исследованию влияния геометрии ножей (поперечное сечение и длина) на деформации. Для этого базовое сечение заготовки (100×10 мм) масштабировали по глубине (10, 15, 20 и 30 мм) и ширине (60, 100 и 160 мм). На рис. 7 показаны схемы сечения заготовки ножа, используемые в указанной модели. Количество элементов модели для поперечных сечений не менялось. Удлинение от 500 до 1000 и 2000 мм получали путем повторения сетки по оси и увеличения в 2 и 4 раза количества элементов модели.

В начале численной обработки рассматривали весь нестационарный металлургический цикл — от начала наплавки до конца охлаждения, а затем на основе расчетного распределения нестационарной температуры и фазового состава исследовали развитие тепловых упругопластических напряжений и деформаций. Появление нового материала в наплавленных слоях моделировали с помощью программы SYSWELD посредством активации элементов в процессе вычислений (использование так

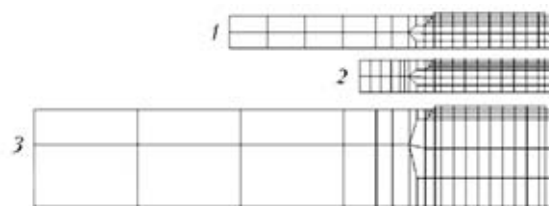


Рис. 7. Схемы сечения заготовки ножа, используемые в модели на основе метода конечных элементов: 1 — базовое (100×10 мм); 2 — минимальное (60×10 мм); 3 — максимальное (160×30 мм)

называемых элементов рождения и гибели). В расчетах учитывались происходящие структурные превращения (термокинетические диаграммы) и зависимость термомеханических свойств материала от его фазового состава.

Результаты численного моделирования. После кристаллизации наблюдается усадка наплавленного материала, появление растягивающих напряжений, что приводит к образованию вогнутости по толщине V_t и перпендикулярно ей V_b . В отличие от сплавов на основе хрома и никеля (например, стеллит и сплав Ni625), исследуемые присадочные материалы на основе ванадия подвержены мартенситным превращениям при температуре 200 °С (см. рис. 5) с объемным расширением приблизительно на 1 %. При численном моделировании учитывается кинетика этих превращений, которые вызывают расширение при охлаждении и приводят к образованию напряжений сжатия в наплавленных валиках. У ножей толщиной 10 мм (а частично и 15 мм) при охлаждении до температуры ниже температуры начала мартенситного превращения сжимающие напряжения вызывают изменение формы — из вогнутой в выпуклую. На рис. 8 показано распределение температуры и развитие деформаций при наплавке способом РТА через 150, 400, 500 (конец наплавки) и 2000 с (практически полное охлаждение до температуры окружающей среды).

Диапазон значений продольных напряжений находится в пределах от -328 (для максимальных сжимающих напряжений в шве) до 440 МПа (для максимальных растягивающих напряжений в зоне термического влияния) (рис. 9).

С помощью закрепления заготовки и правки можно относительно легко исключить появление

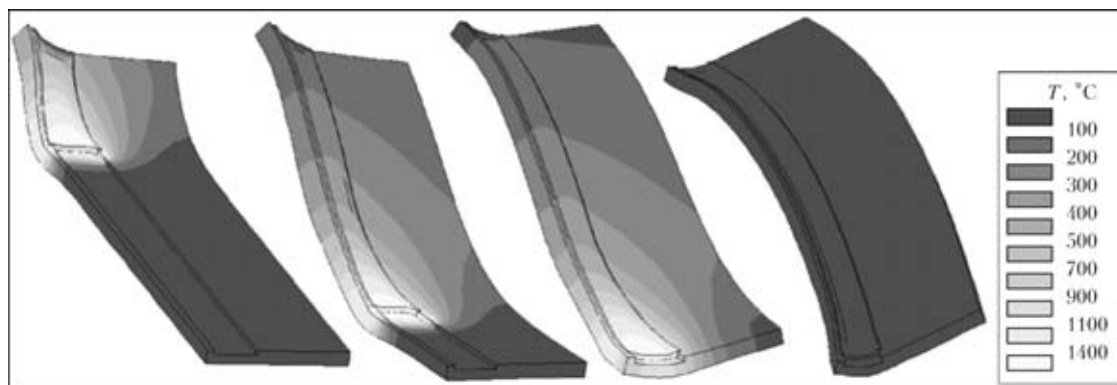


Рис. 8. Распределение температуры и развитие деформаций в ноже размером 500×100×10 мм при наплавке способом РТА и скорости 1 мм/с (×20)

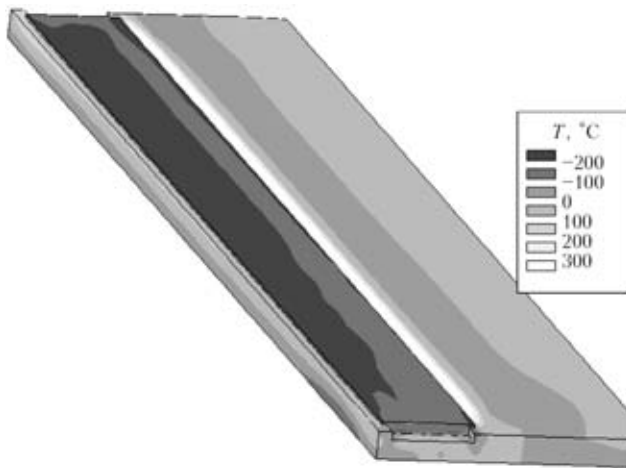


Рис. 9. Распределение остаточных продольных напряжений в заготовке ножа после полного охлаждения изделий

деформации по толщине V_t , однако деформацию по ширине V_b устранить гораздо сложнее. На рис. 10 сопоставляются экспериментальные и рассчитанные методом конечных элементов деформации V_b в изделиях длиной 500 мм. При этом используют два способа наплавки РТА — на постоянном и импульсном токе. При импульсном токе требуется меньшая затрата энергии на расплавление определенного количества наплавляемого материала. Образующиеся при этом деформации имеют меньшие значения. Источник питания, рассматриваемый в модели на основе метода конечных элементов, настраивают на импульсный режим. Результаты моделирования качественно согласуются с экспериментальными значениями деформаций, однако для определения количественных отклонений необходимы дальнейшие исследования.

В связи с возможной вероятностью образования деформаций более 30 мм обработка ножей может привести к полному исчезновению наплавленного валика, а следовательно, к отбраковке детали. Поэтому важно заранее определить ожидаемые значения деформаций V_b , зная которые можно обеспечить компенсацию деформаций за счет предварительного изгиба заготовки или путем наплавки криволинейного валика.

Время расчета на персональном компьютере при скорости срабатывания процессора составляет приблизительно 5 ч при использовании основной модели для ножа длиной 500 мм (7900 элементов) и до 3 дней для ножа длиной 2000 мм. Для ножей большей длины время расчета неприемлемо долгое. Используя экспериментальные и расчетные результаты для коротких образцов (например, длиной $l_0 = 500$ мм), можно рассчитать деформации для образцов большой длины ($l \gg l_0$), умножив их на коэффициент f . На рис. 11, а представлено изменение деформаций V_b для ножей разной длины с базовым сечением. Масштабирование длины ножей при коэффициенте $f_1 = l/l_0$ и деформаций при $f = (l/l_0)^{3/2}$ обеспечивает достаточно хорошее приближение ожидаемых значений деформаций (рис. 11, б).

Примеры практического применения и выводы. Практическое применение моделирования при

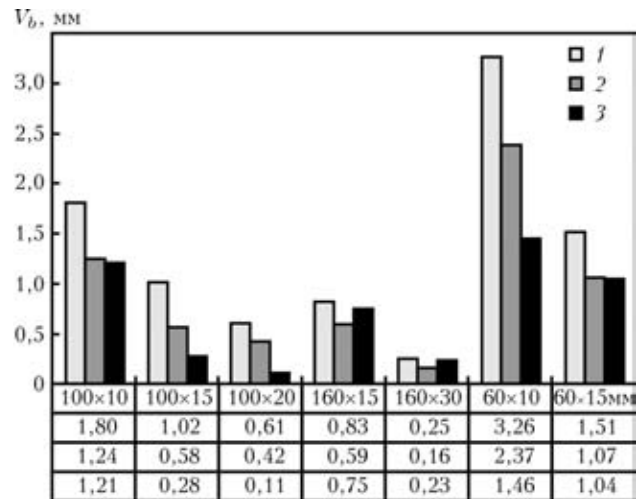


Рис. 10. Экспериментальные и расчетные деформации V_b (мм) по ширине ножа в сечениях различных размеров, полученные при наплавке способом РТА на постоянном (1), импульсном токе (2) и методом конечных элементов (3)

наплавке валков стана поперечной прокатки описано в работе [1]; еще один пример наплавки узких и длинных ножей представлен на рис. 12. Во втором случае моделируемые деформации качественно совпадают с экспериментальными результатами. Моделирование дает возможность исследовать влияние геометрических параметров сварки и ее различных режимов на деформацию изделия, а также оценить деформации, возникающие в изделиях большой длины, и при этом

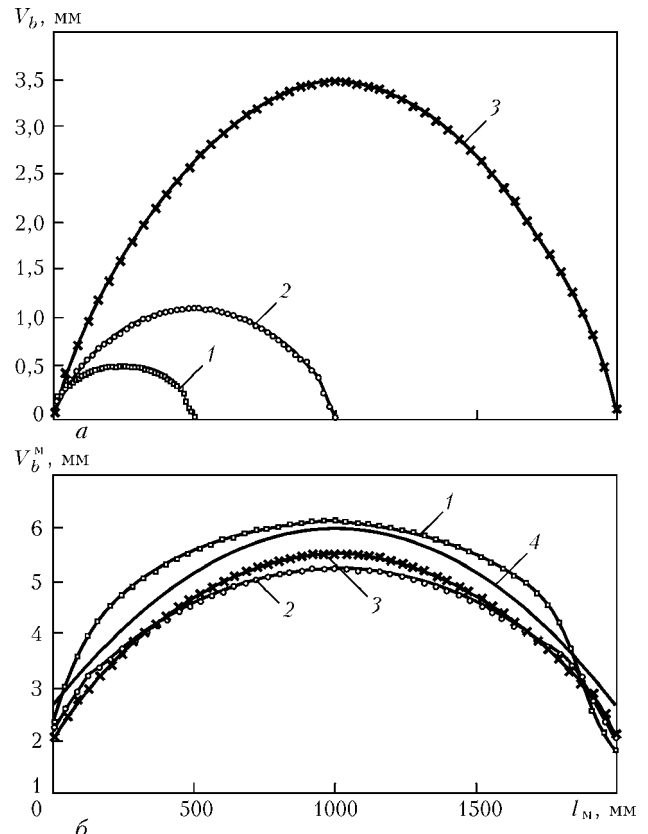


Рис. 11. Изменение расчетных деформаций V_b в сечениях ножей различной длины с базовым сечением размером 100×10 мм: а — реальные деформации; б — масштабированные; 1 — $l = 500$; 2 — 1000; 3 — 2000 мм; 4 — наилучшая круговая аппроксимация

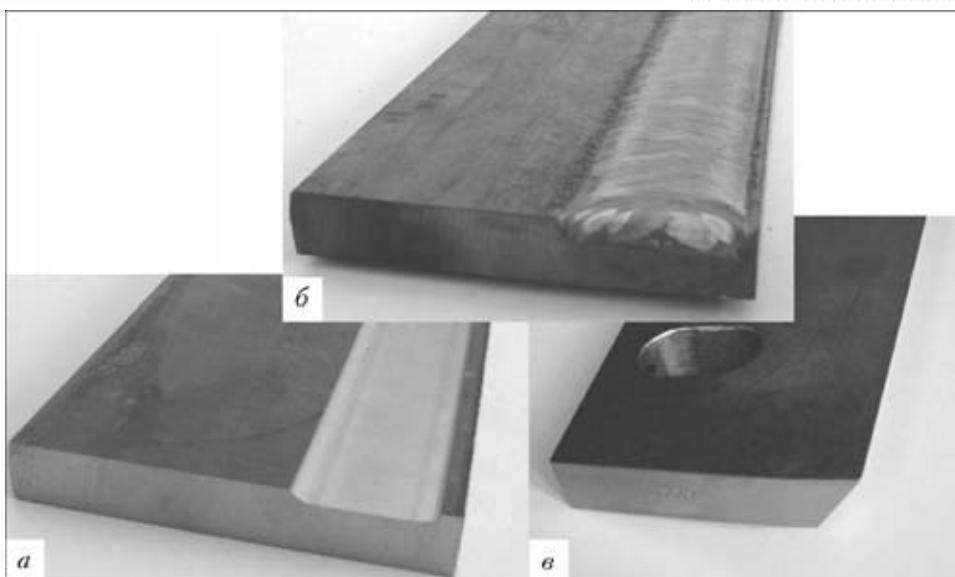


Рис. 12. Внешний вид заготовки ножа до наплавки (а), после наплавки (б) и механической обработки (в)

получить достоверные результаты для коротких ножей. На основании данных об ожидаемой деформации по ширине ножа большой длины можно предусмотреть выполнение криволинейного шва с тем, чтобы после понижения до температуры окружающей среды получить прямолинейный шов, что дает возможность сократить операцию по повторной механической обработке.

Причина остальных количественных отклонений в значениях деформаций заключается в недостатке данных о реальных характеристиках материалов таких, как кинетика фазовых превращений и зависимость параметров от фазового состава и температуры (близкой к температуре плавления или выше). Уменьшение этих отклонений будет целью дальнейших исследований.

Еще одним примером целесообразности моделирования методом конечных элементов процесса наплавки РТА является его использование при изготовлении матрицы для центробежной экструзии и клапанов больших дизельных двигателей.

Представленные теоретические и экспериментальные исследования проведены благодаря поддер-

жке Федерального Министерства экономики и труда Германии (проект AiF № 12793 BR), а также Научно-исследовательского общества Германии (программа специальных научных исследований № 283 «Последовательность выполнения технологических операций при объемной формовке»).

1. Semmler U., Alaluss K., Matthes K.-J. Finite element analysis of the PTA welding with applications to hardfacing // Proc. of 1st Intern. conf on mathematical modelling and information technologies in welding and related processes, Katsiveli, Crimea, Ukraine, Sept. 16–20, 2002. — Kiev: E. O. Paton Electric Welding Institute, 2002. — P. 243–248.
2. Goldak J., Chakravarti A., Bibby M. A new finite element model for welding heat sources // Metallurg. Transact. B. — 1984. — **15**. — P. 299–305.
3. Richter F. Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften von Stählen und ihre Temperaturabhängigkeit // Stahleisen Sonderberichte. — 1983. — **14**, № 10.
4. Touloukian Y. S. Thermophysical properties of materials. — New York, 1979. — Vol. 14.
5. Seyffarth P., Meyer B., Scharff A. Großer Atlas der Schweiß-ZTU-Schaubilder. — Dusseldorf: DVS-Verlag, 1992.
6. (2000-2004) SYSWELD™ Manuals. — <http://www.esi-group.com>.

The process of plasma transferred arc (PTA) surfacing of hard wear-resistant vanadium-based alloys V12 and V18 on base metal of structural steel S35J0 has been studied. Differences in thermomechanical properties, local thermoplastic deformations and phase transformations of materials can lead to high residual stresses and strains. Results of simulation with measurement of temperature and deformation distribution have been studied. Verified and improved models based on finite elements can be used to study the influence of welding parameters on deformations and residual stresses to optimize the welded products.

Поступила в редакцию 18.05.2005



МЕХАНИЗМЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГРАНИЦ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Ю. И. ФАДЕЕНКО, канд. физ.-мат. наук, Л. Д. ДОБРУШИН, д-р техн. наук, С. Ю. ИЛЛАРИОНОВ, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложена новая классификация режимов сварки взрывом и соответствующих им форм границы соединения по отношению инерционных сил к силам прочности в зоне формирования сварного соединения. С помощью этого отношения возможен учет динамических характеристик прочности свариваемых пар металлов при оптимизации режимов сварки взрывом и формы границ получаемого соединения.

Ключевые слова: сварка взрывом, область свариваемости, зона формирования соединения, инерционные силы, силы прочности, границы соединения

Сварка взрывом (СВ) осуществляется при косых соударениях металлических тел под малыми углами со скоростью в сотни метров в секунду. Опытным путем установлено, что главными параметрами, определяющими режим сварки, являются угол соударения γ и скорость перемещения точки контакта v_k . В плоскости параметров $\gamma-v_k$ определяется область возможности осуществления СВ — так называемое окно свариваемости (ОС) (рис. 1).

Течение металла, возникающее в зоне формирования соединения (ЗФС) при СВ, относится к тому же классу, что и течение с образованием кумулятивных струй. В плоскости $\gamma-v_k$ область сварки ОС граничит с областью кумуляции. При СВ так же, как и при кумуляции, имеет место концентрация кинетической энергии металла течения вблизи точки контакта соударяющихся поверхностей, хотя значения коэффициентов концентрации энергии и не столь велики. Прямые экспериментальные измерения подтверждают, что в ЗФС выделяется основная доля кинетической энергии метаемой пластины [1]. Образование прочного сварного соединения возможно, если избыточная кинетическая энергия будет удалена из ЗФС путем рассеяния ее в тепло за счет работы, затрачиваемой на пластическую деформацию металла, либо каким-то иным способом.

Целью настоящей работы являются анализ и физическое обоснование классификации диссипативных процессов, протекающих в ЗФС, на основании отношения инерционных сил к силам прочности.

Плотность кинетической энергии течения металла в ЗФС можно охарактеризовать величиной $\rho v_k^2/2$. Объемная плотность выделившейся тепловой энергии характеризуется произведением динамического предела текучести σ на среднее значение пластической деформации ϵ металла в ЗФС.

Безразмерная величина

$$B = \rho v_k^2 / 2\sigma\epsilon, \quad (1)$$

являющаяся отношением объемной плотности кинетической энергии и работы пластических деформаций, характеризует способность механизмов пластического деформирования рассеивать кинетическую энергию метаемой пластины. Для каждого фиксированного значения γ изменение v_k сопровождается определенным изменением $\sigma\epsilon$ и B . Поэтому ОС разбивается на области I–IV (рис. 1) с различной эффективностью поглощения энергии удара пластическим деформированием ЗФС.

На левом фланге ОС значения скорости v_k малы, поэтому $B < 1$. В этой области ОС толщина ЗФС минимальна и определяется той же зависимостью, что и толщина кумулятивной струи [2, 3]. В частности, при симметричном соударении двух пластин толщина кумулятивной струи и ЗФС равны

$$\delta_{к.с} = 2\delta[1 - \cos(\gamma/2)], \quad (2)$$

где δ — толщины каждой из соударяющихся пластин. Для обычно используемых при СВ малых углов соударения это выражение можно заменить упрощенным

$$\delta_{к.с} = \delta\gamma^2/4. \quad (3)$$

При малой v_k толщина пластин (2) и (3) оказывается вполне достаточной для диссипации кинетической энергии. Постепенное увеличение плотности кинетической энергии при возрастании v_k компенсируется повышением среднего значения

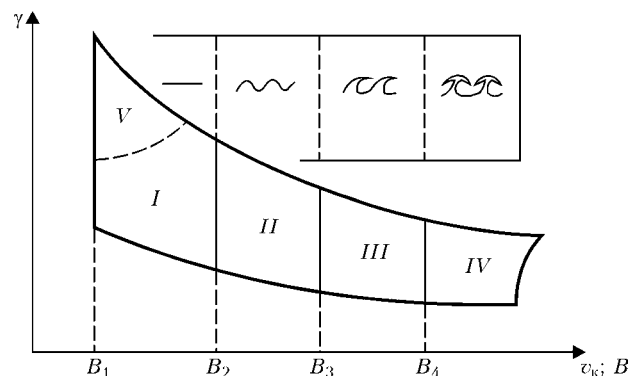


Рис. 1. Области различных диссипативных структур в ОС (сверху показаны формы контактных поверхностей, соответствующие областям I–IV)

пластической деформации ЗФС. В этом диапазоне значений v_k (рис. 1, I область) формируется соединение с гладкой (безволновой) границей. Однако способность ЗФС толщиной, определяемой (2) и (3), к диссипации кинетической энергии ограничена тем, что по мере возрастания деформации ϵ металл разогревается, и его сопротивление деформированию уменьшается. На правой границе I области могут выполняться соединения с очень большими (до сотен процентов) значениями ϵ , соответствующими нагреву практически до температуры плавления, падению сопротивления деформированию до нуля и образованию гладкой «затопленной струи» [4], движущейся вслед за точкой контакта. В работе [5] выдвигается предположение о потере устойчивости однородного поля скорости деформаций при СВ в I области и образовании значительно деформированной полосы, похожей на полосу адиабатического сдвига. Эта полоса образуется при некоторой критической скорости v_k , зависящей от размера зерна. Ее наличие рассматривается как условие получения прочного соединения.

За правой границей I области толщина ЗФС, определяемая (2) и (3), недостаточна для полной диссипации кинетической энергии. Избыточная кинетическая энергия расходуется на образование периодических волновых возмущений границы соединения, при этом его поверхность становится волнообразной. В результате толщина ЗФС возрастает на значение, равное удвоенной амплитуде волны 2a. В диапазоне волнообразных поверхностей соединения II области ОС увеличение v_k и сопутствующее ему возрастание плотности кинетической энергии компенсируется ростом a, а вместе с ним толщины ЗФС и средней деформации ϵ . Увеличение значений ϵ и температуры разогрева металла, так же, как и в предыдущем случае, приводит к качественным изменениям. Режим линейного возрастания правильных волновых возмущений границы (II область) сменяется режимом нелинейных волновых возмущений с образованием на гребнях волн «барашков» и завихрений и, наконец, участков расплава в III области (рис. 2, a).

С дальнейшим возрастанием v_k возможности увеличения интенсивности диссипации кинетической энергии за счет прочностных сил исчерпываются ($B \gg 1$). В IV области ОС избыточная кинетическая энергия сообщается коротким отрезкам кумулятивных струй, поочередно испускаемых одной из поверхностей и ударяющихся о противоположную поверхность соединения (рис. 2, б). Особенности режима образования соединения в IV области описаны в работе [6]. Угол ϕ поворота течения в отрезках кумулятивных струй в этом режиме (рис. 2, б) достигает 120° (угол 180° соответствовал бы идеальной кумуляции). Скорость, при которой происходит встреча головы отрезка струи с противоположной поверхностью соединения, превышает v_k и может достигать $4...5$ км/с. Основным механизмом рассеяния энергии в IV области становится возбуждение ударных волн при высокоскоростных соударениях; скорость выноса энергии

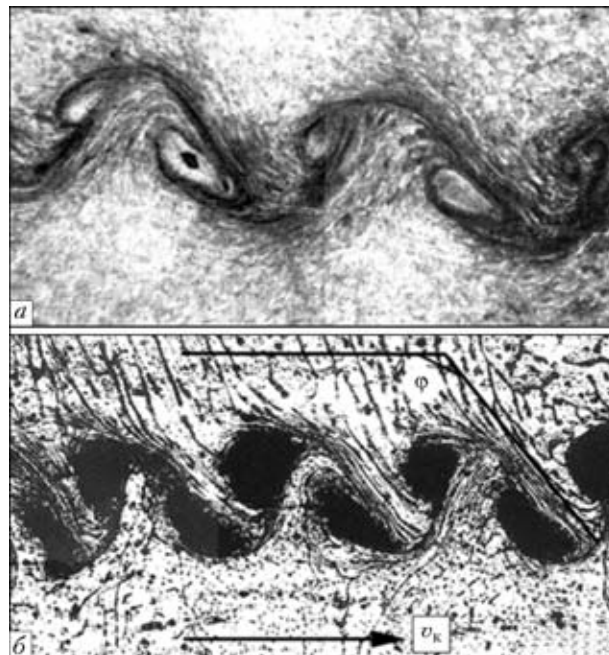


Рис. 2. Диссипативные структуры, формирующиеся на поверхности сварного соединения при $B > 1$: а – III область, X70; б – IV, X200 (см. рис. 1)

из ЗФС ударными волнами превышает скорости движения отрезков струй и звука в металле. Для этого режима типичны следующие параметры диссипационной зоны: толщина слоя начального энерговыделения — $20...100$ мкм; нормальный и тангенциальный компонент скорости соударения — до $3...4$ км/с; давление — до 100 ГПа (1 Мбар); температура до температуры плавления; скорость охлаждения — более $1 \cdot 10^8$ °C/с. Характер пластической деформации в этой зоне напоминает сдвиг под давлением в наковальнях Бриджмена. Однако в отличие от статических наковален Бриджмена при СВ скорость деформации очень велика. Этим условиям соответствуют характерные особенности микроскопических диссипативных структур, возникающих на субзеренном уровне (ячеистые структуры, микрозерна) [7–9].

Отдельного обсуждения заслуживает вопрос о достигаемых в ЗФС значениях динамического предела текучести металла. Известно, что предел текучести металлов возрастает с увеличением скорости деформирования $\dot{\epsilon}$. Зависимость $\sigma = \sigma(\dot{\epsilon})$ обычно истолковывают как проявление вязкостных сил

$$\sigma = \sigma_0 + \mu_{эф} \dot{\epsilon}, \quad (4)$$

где σ_0 — напряжение квазистатического деформирования; $\mu_{эф}$ — эффективная вязкость металла.

Характер зависимости $\mu_{эф} = f(\dot{\epsilon})$ в случае высокой скорости деформации изучен экспериментально, вплоть до $\dot{\epsilon} \cong 1 \cdot 10^4...1 \cdot 10^5$ с⁻¹. В работах Г. В. Степанова и его сотрудников [10, 11] установлена зависимость $\mu_{эф}$ от скорости деформации в сталях и алюминиевых сплавах. Выявлено существование трех характерных диапазонов скорос-



ти. При $\dot{\epsilon} < 30 \text{ с}^{-1}$ вклад вязкости в сопротивление деформированию почти не зависит от деформации и весьма мал. При $\dot{\epsilon} = 30$ и $3 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ вязкость увеличивается скачками, после чего плавно уменьшается (второй скачок связывается с переходом от подбарьерного режима скольжения дислокаций к надбарьерному). При $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ вклад вязкостных сил является преобладающим. В таком диапазоне скорости динамический предел текучести некоторых металлов может быть в несколько раз больше статического [12]. Согласно данным работы [11], при $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^2 \dots 1 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ значения $\mu_{\text{эф}}$ для сталей различной прочности уменьшаются примерно от 30 000 до 1500 Па·с. Ввиду отсутствия экспериментальных данных экстраполяция на еще большие значения $\dot{\epsilon}$ ненадежна. Однако нет сомнений в том, что сопротивление деформированию продолжает возрастать, вплоть до теоретического предела прочности $\sigma_{\text{теор}}$, по достижении которого сопротивление деформированию остается постоянным. Это может быть истолковано как отсутствие вязкости (если определить вязкость дифференциальным соотношением $\mu_{\text{диф}} = d\sigma/d\dot{\epsilon}$, то в области течения при теоретическом пределе прочности $\mu_{\text{диф}} = 0$).

При типичных технологических режимах СВ вблизи границы I и II областей ОС давление скоростного напора $\rho v_k^2/2$ имеет тот же порядок величины, что и $\sigma_{\text{теор}}$. Для сталей, например, границе I и II областей соответствует $v_k \cong 2,5 \text{ км/с}$. Давление скоростного напора $\rho v_k^2/2 \cong 25 \text{ ГПа}$ здесь имеет тот же порядок величины, что и $\sigma_{\text{теор}}$ для кристаллической решетки железа. Если при этом напряжения сопротивления деформированию оказываются способными нейтрализовать инерционные силы, то, следовательно, они имеют тот же порядок величины.

В ЗФС достигается весьма высокая скорость деформаций — приблизительно $\dot{\epsilon} = v_k/\delta_{\text{к.с}}$ (I области) и $\dot{\epsilon} = v_k/(\delta_{\text{к.с}} + 2a)$ (II области). При типичных технологических режимах СВ значения $\dot{\epsilon}$ могут превышать $1 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$. При такой скорости деформации $\dot{\epsilon}$ вязкое сопротивление $\mu_{\text{эф}}$ достигает теоретического предела прочности уже при значениях около сотен паскаль на секунду, что на порядок меньше измеренных в работах [11] при $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$.

Таким образом, течение металла в ЗФС в I и II областях осуществляется при напряжениях, стремящихся к $\sigma_{\text{теор}}$ и низких значениях эффективной вязкости $\mu_{\text{эф}}$. Диссипативные структуры, реализующиеся в III и IV областях, визуально напоминают течения идеальной невязкой жидкости [13]. Представляется вероятным, что в указанных областях деформирование ЗФС осуществляется при предельных напряжениях $\sigma_{\text{теор}}$, а также при $\mu_{\text{эф}} \rightarrow 0$ и $\mu_{\text{диф}} = 0$. (Более определенное утверждение невозможно, поскольку в области значительных дефор-

маций причиной гидродинамического характера течения может быть нагрев до высоких температур.)

Проведенные рассуждения обеспечивают простейшее физическое обоснование классификации диссипативных структур, возникающих в ЗФС, по значению только одного безразмерного параметра B . Реальное разнообразие наблюдаемых диссипативных структур [14] несколько сложнее рассмотренного в настоящей статье. Это означает, что процесс образования диссипативных структур зависит не только от параметра B . Вероятно существование некоторой зависимости и от других параметров, вследствие чего упрощенное представление границ областей ОС на рис. 1 прямыми линиями $B_i = \text{const}$ может быть усложнено. В пользу этого свидетельствует обнаружение особой области «аномальных волн» V в верхней части I области [14]. (V область выпадает из приведенного выше рассмотрения, так как в ней не выполняется условие малости углов γ и не оправдано отдельное от объема пластины рассмотрение процессов в ЗФС). Поэтому предложенное разбиение ОС следует рассматривать как первое приближение к физически обоснованной классификации диссипативных структур при СВ.

Выводы

1. Необходимое для образования прочного сварного соединения освобождение ЗФС от кинетической энергии может осуществляться либо рассеянием в тепло путем стационарного пластического деформирования поверхностных слоев металла, либо формированием периодических диссипативных структур. Возникновение последних приводит к интенсификации пластического деформирования ЗФС или к генерации ударных волн, уносящих энергию за пределы ЗФС.

2. В пределах области свариваемости существует последовательность диссипативных структур, перекрывающих разрыв между областью неупругого косоугольного соударения твердых тел и областью гидродинамической кумуляции. Каждой из диссипативных структур соответствует один из хорошо известных технологам вариантов формы границы сварного соединения — прямолинейная, волновая, волновая с частичным оплавлением, отрезки кумулятивных струй.

1. *Производство* металлических слоистых композиционных материалов / А. Г. Кобелев, В. И. Лысак, В. Н. Чернышев и др. — М.: Интермет Инжиниринг, 2002. — 495 с.
2. *Дерибас А. А.* Физика упрочнения и сварки взрывом. — 2-е изд. — Новосибирск: Наука, 1980. — 188 с.
3. *Кудинов В. М., Коротеев А. Я.* Сварка взрывом в металлургии. — М.: Металлургия, 1978. — 166 с.
4. *Суров В. С.* Косое соударение металлических пластин // Физика горения и взрыва. — 1988. — 24, № 6. — С. 115–120.
5. *Бондарь М. П.* Тип локализации пластической деформации на контактах, определяющий образование прочного соединения // Там же. — 1995. — № 5. — С. 122–128.
6. *Добрушин Л. Д., Фадеев Ю. И., Петушков В. Г.* Особый режим формирования соединения при сварке металлов ударной волной // Автомат. сварка. — 2002. — № 2. — С. 28–32.



7. Бондарь М. П. Особенности формирования структуры при больших высокоскоростных деформациях // Физ. мезомеханика. — 1998. — 1, № 1. — С. 37–55.
8. Бондарь М. П. Структурообразование и свойства материалов, создаваемых высокоскоростными методами // Там же. — 2000. — 3, № 6. — С. 75–87.
9. Бондарь М. П. Эволюция микроструктуры при динамическом нагружении металлов // Там же. — 2002. — 38, № 2. — С. 125–134.
10. Степанов Г. В. Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. — Киев: Наук. думка, 1991. — 288 с.
11. Зубов В. И., Степанов Г. В., Широков А. В. Влияние скорости деформации на предел текучести сталей различной прочности // Пробл. прочн. — 2003. — № 5. — С. 113–121.
12. Петушков В. Г., Кудинов В. М., Фадеенко Ю. И. Обработка взрывом сварных соединений металлоконструкций. — М.: Металлургия, 1993. — 161 с.
13. Стратифицированные следы за «точечными» импульсными источниками / С. И. Воропаев, С. Л. Смирнов, И. А. Филиппов и др. // Изв. Рос. АН. Физика атмосферы и океана. — 2002. — 38, № 3. — С. 402–410.
14. Анализ формирования соединения при сварке металлов взрывом / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Е. А. Чугунов, А. П. Пеев // Автомат. сварка. — 2000. — № 11. — С. 25–29.

New classification is offered for explosion welding conditions and corresponding shapes of joint boundaries, based on the ratio of inertia forces to strength forces within the welded joint formation zone. This indicator can be used to allow for dynamic characteristics of strength of the mating metal pairs with optimisation of the explosion welding conditions and shapes of the resulting joint boundaries.

Поступила в редакцию 24.03.2005

ПОДВИЖНОЕ РАБОЧЕЕ МЕСТО ОПЕРАТОРА-КОСМОНАВТА

Выполнение работ на внешних поверхностях космических объектов требует соответствующей организации рабочего места оператора, снаряженного в скафандр, в связи с его ограниченной подвижностью и условиями пониженной гравитации.

Для проведения технологических экспериментов с аппаратурой «Универсал» в ИЭС им. Е. О. Патона разработан комплекс вспомогательного оборудования, в состав которого входит подвижное рабочее место оператора. Оно содержит основание с поворотной площадкой и вертикальную стойку с рукоятками и клавишами управления перемещением и вращением, а также прижатием ног оператора к поворотной площадке. Для перемещения рабочего места вдоль направляющей на основании имеются подпружиненные ролики с тормозом; устройство, обеспечивающее поворот оператора вокруг своей оси, также снабжено тормозом.

Использование такого рабочего места с направляющей позволяет оператору, выбрав удобное положение и зафиксировав ноги, освободить обе руки для выполнения различных (в том числе и сварочных) технологических операций. Это имеет важное значение в «безопорных» условиях пониженной гравитации, поэтому применение такого рабочего места может быть эффективным при выполнении самых разнообразных работ в открытом космосе.

Контакты:

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Отд. № 35 Аснис Ефим Аркадьевич
Тел.: (38044) 287 10 77; факс: (38044) 289 91 15
E-mail: dep35pwi@g.com.ua



Рабочее место



Рабочая станция





ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ИОНИЗИРОВАННОГО ГАЗА С ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ ЧАСТИЦЕЙ В УСЛОВИЯХ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Ю. С. БОРИСОВ, д-р техн. наук, А. С. ЗАЦЕРКОВНЫЙ, инж., И. В. КРИВЦУН, д-р техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложен подход для расчета потоков энергии ионов и электронов плазмы на поверхность частицы дисперсного материала, находящейся в плазме инертного газа атмосферного давления, а также потерь энергии на испарение ее материала.

Ключевые слова: плазменное напыление, частица, плазма, тепловой поток, слой Кнудсена, испарение

Существует множество подходов и моделей для расчета теплового потока из плазмы в обтекаемую ею одиночную частицу, в которых учитываются различные механизмы теплообмена в рассматриваемой системе. Основные механизмы обмена энергией между потоком изотермической плазмы атмосферного давления и частицей дисперсного материала применительно к условиям плазменного напыления покрытий описаны в работе [1]. Там же предложено выражение для определения энергетического баланса поверхности сферической частицы, находящейся в потоке плазмы атомарного газа:

$$-\left(\chi_m \frac{\partial T_m}{\partial r}\right)_{r=a} = Q_c + Q_r + Q_i + Q_e - Q_v, \quad (1)$$

где χ_m — коэффициент теплопроводности материала частицы; a — радиус частицы; $T_m(r)$ — температурное поле в частице; Q_c — конвективно-кондуктивный тепловой поток из плазмы в частицу; Q_r — результирующий поток энергии теплового излучения; Q_i , Q_e — потоки энергии, переносимой на поверхность частицы соответственно ионами и электронами плазмы; e — заряд электрона; Q_v — поток энергии испарения, уносимой с поверхности частицы струей расширяющегося пара. В работе [1] проведен детальный анализ конвективно-кондуктивной и радиационной составляющих теплообмена в рассматриваемой системе. В частности, показано, что у алюминиевой частицы, обтекаемой аргоновой плазмой атмосферного давления, при температуре невозмущенного плазменного потока $T_p > 8000$ К величина Q_r вносит более существенный вклад в энергетический баланс поверхности частицы, чем его конвективно-кондуктивная составляющая Q_c .

Настоящая работа посвящена исследованию остальных составляющих энергетического баланса (1) в случае обтекания частицы потоком плазмы инертного газа при условии, что радиус частицы значительно больше характерной длины свободного пробега $\bar{\lambda}$ частиц окружающей плазмы. На-

ряду с радиационным теплообменом при высокой температуре, а следовательно, и степени ионизации плазменного потока важную роль в энергобалансе поверхности частицы могут играть электронная и ионная компоненты плазмы. Это связано с тем, что, кроме энергии теплового движения, которая учтена при вычислении Q_c , электроны, достигающие поверхности частицы, передают ей энергию своего направленного движения, а ионы передают как кинетическую энергию, приобретаемую ими в электрическом поле, формирующемся вблизи поверхности частицы, так и внутреннюю энергию, выделяющуюся при их поверхностной рекомбинации [2]. Следует особо отметить, что за счет испарения материала частицы при значениях температуры ее поверхности T_{ms} , близких к температуре кипения T_b , приповерхностная плазма может стать многокомпонентной, содержащей наряду с частицами плазмообразующего газа атомы и ионы испаренного материала.

Для описания этих процессов и анализа тепловых потоков Q_i , Q_e используем метод, подробно изложенный в работе [3], согласно которому плазма, окружающая частицу, условно делится на несколько зон (рис. 1). Первая зона, непосредственно

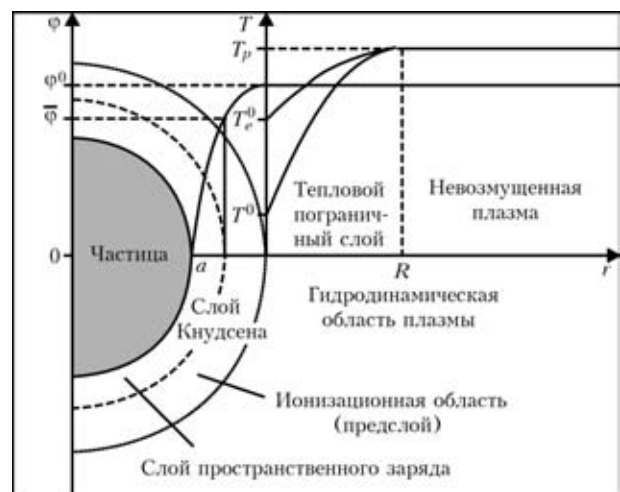


Рис. 1. Структура приповерхностной плазмы, распределение потенциала, температуры электронов и тяжелых частиц плазмы (см. обозначения в тексте)



примыкающая к поверхности частицы, — слой пространственного заряда, где нарушается условие квазинейтральности плазмы и возникает основное падение потенциала между плазмой и частицей. Этот слой можно считать бесстолкновительным, поскольку при рассматриваемых в данной работе условиях его толщина, соизмеримая с радиусом Дебая $r_D \leq 1 \cdot 10^{-1}$ мкм [3], оказывается существенно меньше характерной длины свободного пробега частиц плазмы $\bar{\lambda} \leq 10$ мкм (оценки проведены для аргоновой плазмы атмосферного давления при температуре 10000 К).

Вторая зона — ионизационная область неизо-термической квазинейтральной плазмы, или пред-слой, где происходит генерация заряженных частиц за счет ионизации электронами плазмы атомов газа, десорбирующихся с поверхности частицы, и испаряющихся атомов ее материала. Образующиеся здесь ионы ускоряются по направлению к поверхности частицы электрическим полем, создаваемым более подвижными электронами, и рекомбинируют вблизи указанной поверхности. Таким образом, в пределах данной области нарушаются условия локального ионизационного равновесия плазмы. Кроме того, здесь происходит заметное изменение потенциала плазмы, которое может быть соизме-римо с его падением в слое пространственного заряда [3].

На расстоянии от поверхности частицы, равном нескольким длинам свободного пробега частиц плазмы, проходит граница слоя Кнудсена (см. рис. 1), за которой начинается гидродинамическая область течения, где устанавливается локальное термодинамическое равновесие как по поступатель-ным, так и внутренним степеням свободы плаз-менных частиц. Поскольку предполагается, что толщина слоя Кнудсена меньше радиуса напыля-емой частицы, этот слой, а тем более слой про-странственного заряда, будем в дальнейшем считать плоскими.

В рамках описанного подхода плазма факти-чески состоит из двух основных областей — не-равновесной (слой Кнудсена) и равновесной (гид-родинамическая область течения), для которой пер-вая область играет роль поверхности разрыва [3]. Следует отметить, что гидродинамическая область плазмы так же, как и слой Кнудсена, может быть условно разделена на две зоны (см. рис. 1) — тепловой пограничный слой, в пределах которого происходит выравнивание температуры электронов T_e и тяжелых частиц T с температурой невоз-мущенного плазменного потока T_p , и область невоз-мущенной плазмы.

Для расчета величин Q_e , Q_i , входящих в баланс энергии (1), необходимо определить потоки энергии электронов и ионов на поверхность час-тицы при условии, что суммарная плотность элек-трического тока между плазмой и этой поверх-ностью равна нулю, поскольку частица имеет «пла-вающий» потенциал. Считая, что перенос тока в слое Кнудсена осуществляется только электронами и ионами, приходящими на поверхность частицы из плазмы (предполагается, что все ионы, понав-шие на поверхность, рекомбинируют там и воз-

вращаются назад в плазму в виде атомов, потоки электронов, эмитируемых материалом частицы, и электронов, отраженных от ее поверхности, от-сутствуют), это условие можно записать в виде

$$j_e - \sum_{\alpha = g, m} j_{i\alpha} = 0, \quad (2)$$

где j_e — плотность тока плазменных электронов, достигающих поверхности частицы; $j_{i\alpha} = e\bar{n}_{i\alpha}\bar{V}_{i\alpha}$ — плотность тока ионов сорта α ($\alpha = g$ соответствует ионам плазмообразующего газа, $\alpha = m$ — ионам материала частицы); $\bar{n}_{i\alpha}$, $\bar{V}_{i\alpha}$ — соответственно концентрация и скорость ионов на границе пред-слоя с бесстолкновительным слоем простран-ственного заряда.

При рассматриваемых условиях распределе-ние концентрации электронов в слое Кнудсена может быть принято больцмановским с температурой T_e^0 , постоянной по его толщине [3]. Кроме того, поскольку потенциал плазмы выше потенциала по-верхности частицы, электроны тормозятся элек-трическим полем вблизи указанной поверхности. В этом случае плотность тока электронов, дости-гающих поверхности частицы, может быть вычис-лена с помощью известного соотношения:

$$j_e = \frac{1}{4}en_e^0v_{T_e}^0 \exp\left(-\frac{e\varphi^0}{kT_e^0}\right), \quad (3)$$

где n_e^0 и $v_{T_e}^0 = \sqrt{8kT_e^0/\pi m_e}$ — соответственно кон-центрация и тепловая скорость электронов на внеш-ней границе слоя Кнудсена; k — постоянная Боль-цмана; $\varphi^0 > 0$ — потенциал плазмы относительно поверхности частицы (см. рис. 1); m_e — масса электрона.

Для вычисления значений ионных токов, те-кущих на поверхность частицы, необходимо рас-смотреть процессы в ионизационной области. С этой целью используем подход, предложенный в работе [4], который основывается на предполо-жении, что ионы в предслое плазмы интенсивно максвеллизируются и приобретают общую скорость направленного движения, значение которой на гра-нице ионизационной области и слоя простран-ственного заряда определяется следующим выра-жением [3]:

$$\bar{V}_{i\alpha} = \bar{V}_i = \sqrt{\frac{\sum_{\alpha = g, m} (1 + T^0/T_e^0)n_{i\alpha}^0}{kT_e^0} \frac{\sum_{\alpha = g, m} M_{\alpha}n_{i\alpha}^0}{\sum_{\alpha = g, m} M_{\alpha}n_{i\alpha}^0}}. \quad (4)$$

Здесь $n_{i\alpha}^0$ — концентрации ионов плазмы на внешней границе слоя Кнудсена (для ионов всех сортов); M_{α} — масса соответствующего иона (ато-ма); T^0 — температура тяжелых частиц плазмы, предполагаемая постоянной в пределах предслоя. В рамках используемого подхода концентрация заряженных частиц на внешней границе слоя про-странственного заряда (с учетом квазинейтральнос-



ти плазмы в ионизационной области) определяется следующим образом [3]:

$$\bar{n}_e = n_e^0 \exp\left(-\frac{1}{2}\right); \bar{n}_{i\alpha} = n_{i\alpha}^0 \exp\left(-\frac{1}{2}\right); \alpha = g, m. \quad (5)$$

Тогда, используя (4), (5), можно записать выражения для плотности ионных токов на поверхности частицы в виде

$$j_{i\alpha} = en_{i\alpha}^0 \exp\left(-\frac{1}{2}\right) \bar{V}_i, \quad \alpha = g, m. \quad (6)$$

Полученные выражения для $j_{i\alpha}$ отличаются от использованных в работе [2] тем, что позволяют учесть снижение концентрации ионов в пределах предлоя, а также то обстоятельство, что и скорость ионов на его внутренней границе должна удовлетворять критерию образования слоя пространственного заряда, т. е. критерию Бома [5].

Определив электронную и ионные составляющие электрического тока, текущего из плазмы на поверхность частицы, можно найти потенциал плазмы относительно этой поверхности. Подставляя (3) и (6) в условие (2) и учитывая квазинейтральность плазмы на внешней границе слоя Кнудсена, получаем

$$\phi^0 = \bar{\phi} + \frac{1}{2} \frac{kT_e^0}{e},$$

$$\text{где } \bar{\phi} = \frac{kT_e^0}{e} \ln \sqrt{\frac{\sum_{\alpha=g, m} M_{\alpha} n_{i\alpha}^0}{2\pi m_e \sum_{\alpha=g, m} (1 + T^0/T_e^0) n_{i\alpha}^0}} \quad -$$

значение потенциала на границе ионизационной области со слоем пространственного заряда (см. рис. 1).

Расчет величин j_e и $j_{i\alpha}$ требует знания температур T_e^0 , T^0 и концентраций n_e^0 , $n_{i\alpha}^0$ заряженных частиц плазмы на границе слоя Кнудсена с тепловым пограничным слоем. Поскольку предполагается, что плазма в гидродинамической области является ионизационно равновесной и может содержать, кроме атомов и ионов плазмообразующего газа, частицы испаренного материала, состав такой многокомпонентной плазмы можно определить, используя следующую систему уравнений [3]:

уравнения Саха

$$\frac{n_e^0 n_{i\alpha}^0}{n_{n\alpha}^0} = \left(\frac{m_e k T_e^0}{2\pi \hbar^2}\right)^{3/2} \frac{2\theta_{i\alpha}}{\theta_{n\alpha}} \exp\left[-\frac{e(U_{\alpha} - \Delta U)}{kT_e^0}\right], \quad \alpha = g, m, \quad (7)$$

где $n_{n\alpha}^0$ — концентрация атомов сорта α ; $\theta_{n\alpha}$, $\theta_{i\alpha}$ — статистические суммы атомов и ионов сорта α ; U_{α} — соответствующие значения потенциалов ионизации; $\Delta U = 2e/r_D$ — снижение потенциалов ионизации, обусловленное взаимодействием заряженных частиц в плазме; условие квазинейтральности плазмы

$$n_e^0 = \sum_{\alpha=g, m} n_{i\alpha}^0; \quad (8)$$

закон Дальтона

$$p = n_e^0 k T_e^0 + \sum_{\alpha=g, m} (n_{n\alpha}^0 + n_{i\alpha}^0) k T^0, \quad (9)$$

где p — газостатическое давление плазмы (с учетом электронного давления). В диффузионном режиме испарения материала частицы эта величина может быть принята равной внешнему (атмосферному) давлению p^0 . Для замыкания системы уравнений (7)–(9) необходимо еще одно условие, определяющее концентрацию частиц пара, которые присутствуют в приповерхностной плазме. Предполагая, что скорость диффузии пара мала, т. е. состояние пара близко к насыщению, в качестве такого условия можно выбрать равенство парциального давления тяжелых частиц испаренного материала на внешней границе слоя Кнудсена давлению насыщенного пара p_s над поверхностью частицы, имеющей температуру T_{ms} :

$$(n_{nm}^0 + n_{im}^0) k T^0 = p_s = p^0 \left(\frac{T_b}{T_{ms}}\right)^{1/2} \exp\left[\frac{\lambda_v}{k} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_{ms}}\right)\right], \quad (10)$$

где λ_v — работа выхода атома материала частицы, положив при этом $T^0 = T_{ms}$.

Значение температуры электронов T_e^0 на границе слоя Кнудсена можно определить путем совместного решения уравнения баланса энергии электронной компоненты плазмы в тепловом пограничном слое

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \chi_e \frac{\partial T_e}{\partial r} \right) - \beta (T_e - T) = 0 \quad (11)$$

и соответствующего уравнения для температуры тяжелых частиц

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \bar{\chi} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \beta (T_e - T) = 0. \quad (12)$$

Здесь χ_e — коэффициент электронной теплопроводности; $\bar{\chi}$ — коэффициент теплопроводности тяжелых частиц (атомов и ионов); β — коэффициент энергообмена электронов с тяжелой компонентой плазмы [6], при вычислении которого отношение концентрации частиц пара к полной концентрации всех тяжелых частиц плазмы в пределах теплового пограничного слоя будем приближенно считать постоянным, равным своему значению на границе слоя Кнудсена $\delta_m^0 = (n_{nm}^0 + n_{im}^0) / \sum_{\alpha=g, m} (n_{n\alpha}^0 + n_{i\alpha}^0)$. Еще одним прибли-

жением, принятым при записи уравнений (11), (12), является пренебрежение конвективным переносом энергии, что, как свидетельствует дальнейший численный анализ, допустимо при скорости набегающего потока плазмы относительно частицы $u < 250$ м/с.

Учитывая принятое ранее допущение о малости толщины слоя Кнудсена по сравнению с радиусом напыляемой частицы, будем решать данные уравнения в области $a \leq r \leq R$, где R — внешний радиус теплового пограничного слоя (см. рис. 1). Краевые условия на границе указанного слоя со

слоем Кнудсена могут быть заданы следующим образом:

$$\left(\chi_e \frac{\partial T_e}{\partial r}\right) \Big|_{r=a} = j_e \left(\phi^0 + \frac{2kT_e^0}{e}\right) + \sum_{\alpha=g,m} j_{i\alpha} \left(\frac{2kT_e^0}{2e} + U_\alpha\right); \quad T \Big|_{r=a} = T_{ms}. \quad (13)$$

Первое условие (13) представляет собой баланс энергии в ионизационной области плазмы. Член в левой части данного условия описывает энергию, переносимую в эту область плазменными электронами, первый член в правой части — энергию, уносимую электронами на поверхность частицы, а второй — энергию, затрачиваемую на ионизацию и ускорение ионов в пределах ионизационной области.

В качестве граничных условий при $r = R$ принимаются условия равенства температуры электронов и тяжелых частиц плазмы температуре невозмущенного потока:

$$T_e \Big|_{r=R} = T \Big|_{r=R} = T_p, \quad (14)$$

а само значение R выбирается таким, чтобы выполнялись условия гладкого сопряжения:

$$\frac{\partial T_e}{\partial r} \Big|_{r=R}; \quad \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} < \varepsilon,$$

где ε — некоторая малая величина. Расчеты показали, что у частицы радиусом $a = 30$ мкм, находящейся в аргоновой плазме атмосферного давления, эти условия достаточно хорошо выполняются при $R \geq 250$ мкм во всем рассматриваемом диапазоне значений T_p и T_{ms} .

Полученные при численном решении краевой задачи (11)–(14) распределения температур T_e и T по толщине теплового пограничного слоя вокруг алюминиевой частицы радиусом 30 мкм ($T_{ms} = 1800$ К), помещенной в аргоновую плазму ($T_p = 12000$ К), представлено на рис. 2 (необходимые температурные зависимости χ_e , $\bar{\chi}$ и β рассчитаны по методике, описанной в [7]). Как следует из приведенных на этом рисунке данных, температура электронов на внешней границе слоя Кнудсена T_e^0 оказывается значительно ниже температуры невозмущенной плазмы и при выбранных значениях параметров составляет приблизительно 8000 К. При указанном значении T_{ms} плазма вблизи поверхности практически не содержит атомов и ионов материала частицы ($\delta_m^0 \cong 0,001$), т. е. является однокомпонентной. На рис. 3 показана зависимость расчетных значений T_e^0 от T_p при различных значениях температуры поверхности частицы. Результаты расчетов свидетельствуют о существенном влиянии многокомпонентности приповерхностной плазмы, связанной с наличием в ней более легкоионизируемых атомов металлического пара (потенциал ионизации аргона и алюминия соответственно равен 15,76 и 5,98 эВ), на температуру электронов и степень ионизации такой плазмы. Так, например, с повышением температуры по-

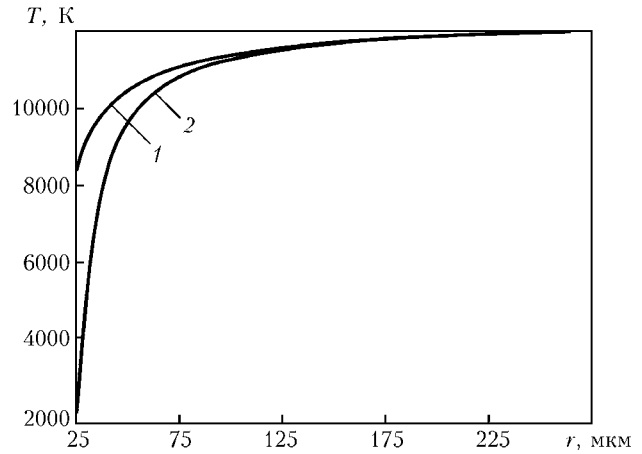


Рис. 2. Радиальные распределения температуры электронов T_e (1) и температуры тяжелой компоненты плазмы T (2) в пределах теплового пограничного слоя

верхности частицы T_{ms} и соответствующим увеличением согласно (10) концентрации частиц пара в окружающей плазме наблюдается все более заметное снижение температуры электронов на границе слоя Кнудсена по сравнению с соответствующим значением T_p (рис. 3), тогда как значение n_e^0 , наоборот, возрастает. Кроме того, увеличение δ_m^0 приводит к некоторому уменьшению потенциала плазмы ϕ^0 относительно поверхности частицы от 2,79 (при $T_{ms} = 2000$ К) до 2,21 В (при $T_{ms} = 2500$ К). В обоих случаях $T_p = 12000$ К.

Определив таким образом параметры плазмы на внешней границе слоя Кнудсена, необходимые для расчета электронного и ионного токов на поверхность частицы, можно найти соответствующие потоки энергии Q_e и Q_i . В частности, поток энергии, переносимой электронами плазмы, способными преодолеть потенциальный барьер ϕ^0 , может быть представлен в виде $j_e(\phi^0 + 2kT_e^0/e)$ (это выражение отличается от использованного в [2] наличием члена $j_e\phi^0$, который может давать существенный вклад в тепловой поток). Поскольку

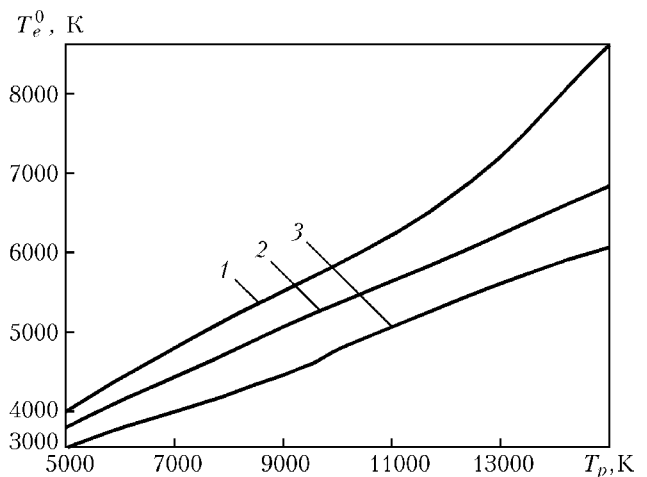


Рис. 3. Зависимость температуры электронов на внешней границе слоя Кнудсена от температуры невозмущенной аргоновой плазмы при различных значениях температуры поверхности алюминиевой частицы радиусом 30 мкм: 1 — $T_{ms} = 2000$ К ($\delta_m^0 = 0,009$); 2 — 2200 К (0,047); 3 — 2500 К (0,325)

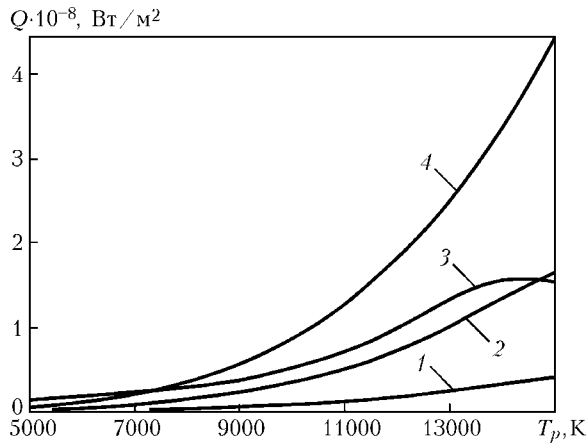


Рис. 4. Зависимость составляющих теплового потока Q на поверхность частицы от температуры невозмущенной аргоновой плазмы T_p : 1 – Q_e ; 2 – Q_i ; 3 – Q_c (при $u = 100$ м/с); 4 – Q_r

энергия теплового (хаотического) движения фактически учтена при вычислении Q_c , выражение для Q_e можем записать следующим образом:

$$Q_e = j_e(\varphi^0 + \varphi_m), \quad (15)$$

где φ_m – работа выхода электронов для данного материала частицы. В (15) предполагается, что все электроны, достигшие поверхности частицы, поглощаются ее материалом (с выделением работы выхода), а коэффициент аккомодации этой поверхностью кинетической энергии электронов равен единице.

Далее, учитывая энергию направленного движения ионов, приобретаемую ими в слое пространственного заряда, для Q_i можем записать

$$Q_i = \sum_{\alpha = g, m} j_{i\alpha}(\bar{\varphi} + U_{\alpha} - \varphi_m). \quad (16)$$

При записи выражения (16) предполагается, что коэффициент аккомодации энергии ионов поверхностью частицы также равен единице.

На рис. 4 представлена зависимость тепловых потоков энергии Q_i , Q_e на поверхность алюминиевой частицы ($a = 30$ мкм, $T_{ms} = 2000$ К) от температуры невозмущенного потока плазмы (аргоновая плазма атмосферного давления). Для сравнения здесь же показаны кривые Q_c , рассчитанные с помощью критериальной формулы [8], которая дает наилучшее совпадение с экспериментальными данными в случае обтекания частицы потоком аргоновой плазмы, и кривые Q_r , рассчитанные по методике, описанной в работе [1]. Приведенные на рис. 4 расчетные кривые свидетельствуют о том, что при высоких значениях температуры плазмы ($T_p > 10000$ К) ионная и электронная составляющие теплового потока могут вносить существенный вклад в суммарный поток тепла из плазмы на поверхность частицы.

Влияние многокомпонентности приповерхностной плазмы, обусловленной наличием в ней атомов и ионов испаренного материала, на рассматриваемые составляющие теплового потока, представлено на рис. 5, где приведены кривые $Q_i(T_p)$ и

$Q_e(T_p)$ при различных значениях температуры поверхности частицы. Кривые 2, 4 на этом рисунке соответствуют ионному и электронному тепловым потокам, вычисленным при $T_{ms} = 1800$ К. В этом случае приповерхностная плазма содержит пренебрежимо малое ($\delta_m^0 \approx 0,001$) количество частиц металла (алюминия) и указанные тепловые потоки формируются в основном за счет заряженных частиц плазмообразующего газа (аргона). При $T_{ms} = 2400$ К содержание пара в приповерхностной плазме намного выше ($\delta_m^0 = 0,180$), т. е. плазма становится существенно многокомпонентной, что при $T_p > 10000$ К приводит к более высоким значениям тепловых потоков Q_i и Q_e (ср. кривые 1–4 рис. 5). Это связано с тем, что несмотря на соответствующее снижение T_e^0 по отношению к T_p (см. рис. 2, 3) увеличение содержания в плазме легкоионизируемых атомов металла с ростом T_{ms} приводит к увеличению концентрации заряженных частиц, определяющих согласно (3), (6), (15), (16) указанные тепловые потоки.

Если температура поверхности частицы превышает температуру кипения ее материала (давление насыщенного пара становится больше атмосферного), начинается расширение пара, который оттесняет плазму внешнего газа, и диффузионный режим испарения сменяется конвективным. В результате приповерхностная плазма снова становится однокомпонентной, но при этом содержит только частицы испаренного материала. Состав такой плазмы можно рассчитать с помощью уравнений (7)–(9), положив в них $n_{ng} = n_{ig} = 0$ и дополнив эту систему уравнений соотношениями, определяющими концентрацию и температуру тяжелых частиц расширяющегося пара вблизи поверхности частицы. При конвективном режиме испарения для нахождения $n_{nm}^0 + n_{im}^0$ и T_0 будем использовать выражения, полученные в работе [9] применительно к случаю поверхностного испарения в среду с противодействием:

$$\frac{n_{nm}^0 + n_{im}^0}{n_{ms}} = \left\{ \left(\gamma_m^2 + \frac{1}{2} \right) \exp(\gamma_m^2) [1 - \Phi(\gamma_m)] - \frac{\gamma_m}{\sqrt{\pi}} \right\} \times \\ \times \sqrt{\frac{T_{ms}}{T^0}} + \frac{1}{2} \left\{ 1 - \gamma_m \sqrt{\pi} \exp(\gamma_m^2) [1 - \Phi(\gamma_m)] \right\} \frac{T_{ms}}{T^0}; \quad (17)$$

$$\frac{T^0}{T_{ms}} = 1 + \frac{\gamma_m^2 \pi}{32} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{64}{\gamma_m^2 \pi}} \right).$$

Здесь $n_{ms} = p_s / kT_{ms}$ – концентрация насыщенного пара, соответствующая данной температуре поверхности частицы;

$$\gamma_m = v^0 \left(\frac{M_m}{2kT^0} \right)^{1/2},$$

где v^0 – скорость разлета ионизированного пара на внешней границе слоя Кнудсена; M_m – масса атома металла; $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\xi^2) d\xi$ – интеграл вероятности. Следует отметить, что v^0 является

внешним параметром и определяется условиями расширения пара в гидродинамической области. Кроме того, согласно работе [9], указанная величина должна удовлетворять условию $M \leq 1$, где $M = \frac{v^0}{s^0}$ — число Маха; $s^0 = \sqrt{5kT^0/3M_m}$ — местная скорость звука. Для численной оценки v^0 будем приближенно считать, что в случае небольших значений числа Маха расширение ионизированного пара происходит в условиях, когда давление на границе слоя Кнудсена с тепловым пограничным слоем постоянно и равно внешнему давлению, т. е. при $n_e^0 k T_e^0 + (n_{nm}^0 + n_{im}^0) k T^0 = p^0$, где зависимость величин $n_{nm}^0 + n_{im}^0$, T^0 от безразмерной скорости γ_m определяются соотношениями (17).

Температура электронов, входящая в (7), (9), может быть определена путем решения уравнений баланса энергии электронов и тяжелой компоненты плазмы в пределах теплового пограничного слоя с учетом конвективного охлаждения приповерхностной плазмы потоком пара:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 n_e [\frac{5}{2} k T_e + e U_m] v) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \chi_e \frac{\partial T_e}{\partial r}) - \beta (T_e - T);$$

$$\frac{5}{2} k (n_{nm} + n_{im}) v \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \chi \frac{\partial T}{\partial r}) + \beta (T_e - T), \quad (18)$$

где скорость разлета и суммарная концентрация тяжелых частиц пара связаны уравнением непрерывности, что дает $(n_{nm} + n_{im})v = \frac{(n_{nm}^0 + n_{im}^0)v^0 a^2}{r^2}$.

Краевые условия для уравнений (18) на внешней границе теплового пограничного слоя (при $r = R$) сохраняют вид (14), тогда как условия на границе этого слоя со слоем Кнудсена несколько изменяются по сравнению с (13):

$$\left(\chi_e \frac{\partial T_e}{\partial r} \right) |_{r=a} = j_e \left(\phi^0 + \frac{2kT_e^0}{e} \right) + j_{im} \left(\frac{2kT_e^0}{e} + U_m \right) + n_e^0 \left(\frac{5}{2} k T_e^0 + e U_m \right) v^0; \quad T |_{r=a} = T^0.$$

Здесь первое условие, описывающее баланс энергии ионизационной области плазмы, записано с учетом энергии, уносимой из этой области электронной компонентой ионизированного пара при его расширении.

Численное решение уравнений (18) для алюминиевой частицы, находящейся в струе аргоновой плазмы, показывает, что результирующие значения температуры электронов на границе слоя Кнудсена при конвективном режиме испарения материала частицы оказываются существенно ниже, чем при диффузионном (ср. кривые 1–3 рис. 6), что связано с охлаждением плазмы потоком расширяющегося пара. В результате степень ионизации приповерхностной плазмы снижается настолько, что тепловые потоки Q_i и Q_e , пропорциональные концентрации заряженных частиц на границе слоя Кнудсена, становятся пренебрежимо малыми. Кроме того, при конвективном режиме испарения (за счет интенсивного выноса потоком пара тепловой

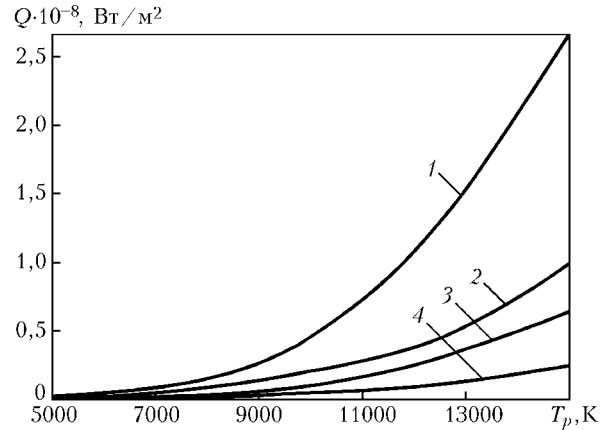


Рис. 5. Зависимость потоков энергии ионов (1, 2) и электронов (3, 4) на поверхность алюминиевой частицы радиусом 30 мкм от температуры невозмущенной плазмы T_p : 1, 3 — $T_{ms} = 2400$ К ($\delta_m = 0,180$); 2, 4 — 1800 К ($\delta_m = 0,001$)

энергии частиц плазмы из пограничного слоя) должен снижаться и конвективно-кондуктивный тепловой поток Q_c . Вместо них существенную роль в энергетическом балансе частицы начинает играть испарительное охлаждение ее поверхности. Зная концентрацию тяжелых частиц пара и скорость его разлета на внешней границе слоя Кнудсена, можно вычислить энергию, уносимую с единицы поверхности частицы потоком пара. Пренебрегая тепловой энергией частиц пара по сравнению с энергией испарения для расчета величины Q_v можем использовать следующее выражение [10]:

$$Q_v = (n_{nm}^0 + n_{im}^0) v^0 \lambda_v. \quad (19)$$

Отметим здесь, что, поскольку в режиме расширения пара значения концентрации ионов на внешней границе слоя Кнудсена ничтожно малы, значение n_{im}^0 в выражении (19) можно положить равным нулю.

Результаты расчетов теплового потока Q_v для алюминиевой частицы радиусом 30 мкм, находящейся в потоке аргоновой плазмы атмосферного давления и имеющей температуру поверхности $T_{ms} = 2800$ К ($T_b = 2720$ К), представлены на рис. 7

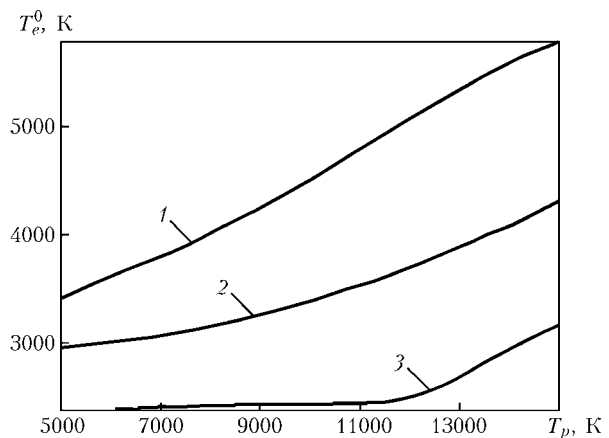


Рис. 6. Зависимость температуры электронов на внешней границе слоя Кнудсена от температуры невозмущенной аргоновой плазмы при различных значениях температуры поверхности алюминиевой частицы радиусом 30 мкм: 1 — $T_{ms} = 2700$ К (диффузионный режим испарения материала частицы); 2 — 2750 К ($M = 0,09$); 3 — 2800 К ($M = 0,26$)

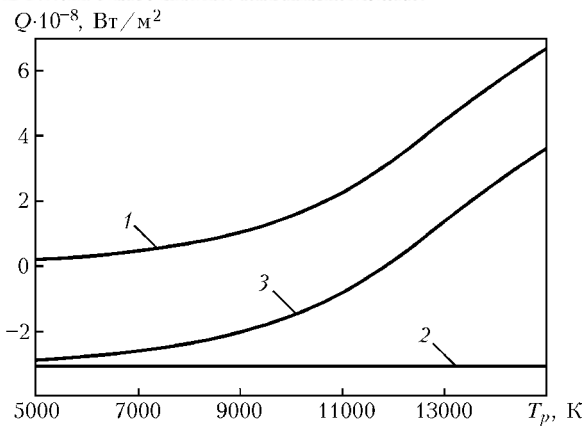


Рис. 7. Результирующий тепловой поток (3) и его составляющие (1 – Q_r , 2 – Q_v) при конвективном режиме испарения материала частицы

(поскольку указанный тепловой поток описывает потерю энергии частицей, он был взят со знаком минус). Здесь же приведены соответствующие кривые $Q_r(T_p)$ и результирующего теплового потока через поверхность частицы. Как следует из рисунка, влияние T_p на величину Q_v практически не проявляется (кривая 2, рис. 7), что, как уже было отмечено, связано с существенным снижением степени ионизации приповерхностной плазмы за счет ее охлаждения потоком расширяющегося пара. Величина Q_r , наоборот, заметно возрастает с увеличением T_p (1), что приводит к изменению знака результирующего теплового потока (3). В итоге при $T_p < 12500$ К данная частица охлаждается, а при более высоких значениях температуры окружающей плазмы – нагревается.

Расчетная зависимость всех составляющих и суммарного теплового потока на поверхность алюминиевой частицы, находящейся в аргоновой плазме, от T_{ms} показаны на рис. 8. Приведенные на этом рисунке данные позволяют проанализировать вклад каждой из составляющих теплообмена для рассматриваемой системы в полный энергетический баланс поверхности частицы, имеющей температуру, близкую к температуре кипения ее материала,

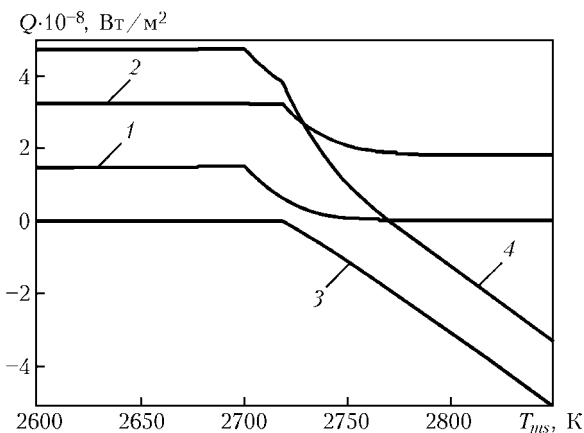


Рис. 8. Зависимость суммарного теплового потока через поверхность алюминиевой частицы ($a = 30$ мкм), находящейся в потоке аргоновой плазмы ($T_p = 12000$ К; $u = 300$ м/с), и его составляющих от T_{ms} : 1 – $Q_i + Q_e$; 2 – $Q_c + Q_r$; 3 – Q_v ; 4 – результирующий тепловой поток

и свидетельствуют о решающей роли испарительного охлаждения частицы при $T_{ms} > T_b$.

В целом, разработанная математическая модель позволяет проводить численный анализ как отдельных составляющих теплового баланса поверхности напыляемой частицы, так и результирующего теплового воздействия плазменной струи на частицу дисперсного материала в широком диапазоне значений температур плазмы и поверхности частицы, а также их относительной скорости, характерных для условий дозвукового плазменного напыления.

Выводы

1. Учет многокомпонентности приповерхностной плазмы, обусловленной наличием в ней испаренных атомов и ионов материала частицы, снижения температуры электронов на границе слоя Кнудсена по отношению к температуре невозмущенной плазмы и других факторов, определяющих упомянутые тепловые потоки, позволяет более корректно провести анализ нагрева частицы, движущейся в струе низкотемпературной плазмы при наличии испарения ее материала.

2. Проведенный численный анализ показал, что при высоких температурах плазменной струи потоки энергии электронной и ионной компонент плазмы могут играть заметную роль в полном энергетическом балансе напыляемой частицы. Так, например, при обтекании алюминиевой частицы потоком аргоновой плазмы атмосферного давления, имеющей температуру выше 10000 К, указанные потоки составляют 20... 50 % соответствующего значения конвективно-кондуктивного теплового потока на поверхность частицы и их необходимо учитывать при анализе нагрева частиц в рассматриваемых условиях.

3. Потоки энергии ионов и электронов плазмы на поверхность частицы существенно зависят от температуры указанной поверхности, что обусловлено многокомпонентностью приповерхностной плазмы, связанной с наличием в ней испаренных атомов и ионов материала частицы. В частности, при температуре поверхности алюминиевой частицы 2500 К эти потоки почти вдвое превышают соответствующие значения для частицы, имеющей температуру поверхности 1800 К.

4. Если температура поверхности напыляемой частицы превышает температуру кипения ее материала, то определяющим фактором в энергетическом балансе частицы является испарительное охлаждение, связанное с уносом энергии испарения атомов ее материала потоком расширяющегося пара. Расчеты показали, что, например, в случае алюминиевой частицы, помещенной в аргоновую плазму с температурой 12000 К, результирующий тепловой поток на поверхность частицы становится равным нулю при температуре ее поверхности 2770 К и при дальнейшем увеличении этой температуры нагрев частицы сменяется охлаждением.

1. Борисов Ю. С., Зацерковный А. С., Кривцун И. В. Конвективно-кондуктивный и радиационный теплообмен потока плазмы с частицами дисперсного материала в условиях плазменного напыления // Автомат. сварка. – 2005. – № 6. – С. 7–11.



2. *Shimanovich V. D., Smyaglikov I. P., Zolotovskiy A. I.* An effect of near-cathode region plasma of an argon arc on metal particles // Progress in plasma processing of materials 2003: Proc. of the 7th European conf. on thermal plasma processes, France, Strasbourg, June 18–21, 2003. — New York: Begell House Inc., 2003. — P. 257–262.
3. *Кривцун И. В.* Модель испарения металла при дуговой, лазерной и лазерно-дуговой сварке // Автомат. сварка. — 2001. — № 3. — С. 3–10.
4. *Зондовые измерения в низкотемпературной плотной плазме при высоких степенях ионизации / Ф. Г. Бакшт, Г. А. Дюжев, Н. К. Митрофанов и др. // Журн. техн. физики. — 1973. — 43, № 12. — С. 2574–2583.*
5. *Bohm D.* The characteristics of electrical discharges in magnetic fields / Ed. A. Guthrie, R. K. Wakerling. — New York: McGraw-Hill, 1949. — 77 p.
6. *Ждаиов В. М.* Явления переноса в многокомпонентной плазме. — М.: Энергоиздат, 1982. — 176 с.
7. *Моделирование процессов переноса в многокомпонентной плазме столба сварочной дуги / В. С. Гвоздецкий, В. Ф. Демченко, И. В. Кривцун и др. // Пробл. сварки и спец. электротехнологий. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 221–229.*
8. *Физика и техника низкотемпературной плазмы / С. В. Дресвин, А. В. Донской, В. М. Гольдфарб и др. — М.: Атомиздат, 1972. — 352 с.*
9. *Knight Ch. J.* Theoretical modeling of rapid surface vaporization with back pressure // AIAA J. — 1979. — 17, № 5. — P. 519–523.
10. *Воздействие лазерного излучения на материалы / Р. В. Арутюнян, В. Ю. Баранов, Л. А. Большов и др. — М.: Наука, 1989. — 367 с.*

Suggested is the procedure for calculation of the ion energy and plasma electron flows on the surface of a dispersed material particle in the atmospheric-pressure inert-gas plasma, as well as energy losses for evaporation of its material.

Поступила в редакцию 02.07.2004

БЛОК СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ДУГОЙ

Сварка под флюсом пульсирующей дугой — новая, прогрессивная, быстро развивающаяся технология. Импульсный характер горения дуги при сварке под флюсом оказывает существенное положительное влияние как на формирование микроструктуры металла шва, так и на служебные характеристики сварного соединения в целом. Для осуществления сварки под флюсом пульсирующей дугой в ИЭС им. Е. О. Патона создан блок синергетического управления, внешний вид которого показан на рисунке.

Блок разработан для стационарных и монтажных условий осуществления сварки. Он имеет два независимых канала управления. При необходимости количество каналов управления может быть увеличено. Длительность импульсов управления, вырабатываемых блоком для создания пульсаций сварочного тока и напряжения на дуге, изменяется в широких пределах. Наличие плавных электронных регулировок, а также повышенная нагрузочная способность блока с защитой выходов от коротких замыканий обеспечивает возможность его бесперебойной работы во всем диапазоне сварочных токов, напряжений и скоростей подающих механизмов. Питается блок от сети 220 В. В блоке имеется схема автоматического шунтирования выхода для защиты от перенапряжений.

Всесторонние испытания технологических возможностей блока и свойств сварных соединений, получаемых сваркой под флюсом с использованием блока в сочетании со стандартным источником питания ВДУ-1201 и сварочным трактором АДФ-1201 с зависимой скоростью подачи электродной проволоки, показали:



- увеличение производительности процесса сварки;
- уменьшение расхода электроэнергии на 20...25 %;
- снижение температуры или отказа от необходимости предварительного подогрева свариваемых конструкций из высокопрочных сталей;
- снижение уровня погонной энергии без уменьшения глубины проплавления;
- уменьшение в 2...3 раза размера участка крупного зерна в зоне термического влияния сварных соединений;
- повышение служебных характеристик металла шва и сварных соединений в целом, особенно стойкости против образования холодных трещин.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
 Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
 Отд. № 47, тел.: (38044) 261 52 31, 227 44 78
 E-mail: sheiko@paton.kiev.ua



ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРА С РАЗВИТЫМИ ЯРМОВЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОТОКАМИ РАССЕЯНИЯ

С. В. РЫМАР, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описана разработанная методика оптимизации однофазного трансформатора с развитыми ярмовыми магнитными потоками рассеяния, в которой используется модернизированная методика расчета индуктивности рассеяния.

Ключевые слова: трансформатор, ярмовые магнитные потоки рассеяния, оптимизация, индуктивность рассеяния, параметры, сварочная техника

Однофазные трансформаторы с развитыми ярмовыми магнитными потоками рассеяния (РЯМПР) находят широкое применение в сварочной технике, в частности в источниках питания для сварки штучными электродами.

Основы теории расчета трансформатора с РЯМПР и его индуктивностей рассеяния были заложены в Институте электросварки им. Е. О. Патона В. К. Лебедевым [1–4] и широко используются проектировщиками сварочного оборудования [5]. В публикациях, однако, отсутствует информация о методике оптимизации рассматриваемого трансформатора.

Целью данной работы является описание созданной в Институте электросварки им. Е. О. Патона методики оптимизации однофазного трансформатора с РЯМПР, базирующейся на модернизированной методике расчета индуктивностей рассеяния и дающей большую точность вычислений.

Повышенное значение индуктивности рассеяния в трансформаторе с РЯМПР обеспечивается благодаря намотке витков первичной и вторичной обмотки на разных стержнях магнитопровода с образованием нескомпенсированных витков обмоток. За счет этого уменьшается электромагнитная связь витков обмоток и возрастают потоки рассеяния, проходящие от ярма к ярму магнитопровода [1–4]. На рис. 1 дано схематическое изображение такого трансформатора, где a , b — толщина и ширина стержня и ярма магнитопровода; $h_{ок}$, $l_{ок}$ — высота и ширина окна магнитопровода; $h_{к1л}$, $C_{к1л}$ и $h_{к2п}$, $C_{к2п}$ — соответственно высота и толщина катушек с первичной и вторичной обмоткой на левом и правом стержне магнитопровода; $d_{1л.п}$, $d_{2п.л}$ — заданные расстояния между стержнями магнитопровода и первичной и вторичной обмотками с нескомпенсированными витками; l_k — заданное расстояние между боковыми поверхностями катушек в окне магнитопровода; Δh — заданная высота выступающих из катушек частей стержня магнитопровода.

Рассмотрим двухобмоточный трансформатор без дополнительных секций, обеспечивающих дискретное регулирование индуктивности рассеяния. Трансформатор питается от промышленной сети

с синусоидальным напряжением. Эффектом вытеснения тока к поверхности проводников обмоток пренебрегаем. При оптимизации будем рассматривать только активные материалы трансформатора — электротехническую сталь магнитопровода, медь или алюминий проводников его обмоток.

Запишем уравнения, связывающие электромагнитные и геометрические параметры трансформатора.

Вычислим активное поперечное сечение стержня и ярма магнитопровода [6]:

$$S_c = \sqrt{2} U_1 / (\omega \omega_1 B_m), \quad (1)$$

где U_1 — заданное действующее значение фазного напряжения на первичной обмотке трансформатора; ω — угловая частота напряжения питающей сети, рассчитываемая по заданному значению частоты сети f_c , равная $2\pi f_c$; ω_1 — количество витков первичной обмотки; B_m — заданное амплитудное значение магнитной индукции в магнитопроводе.

Толщина стержня и ярма магнитопровода равняется [6]

$$a = S_c / (k_c b), \quad (2)$$

где k_c — заданный коэффициент заполнения магнитопровода пластинами электротехнической стали.

Поперечные сечения активного материала первичной и вторичной обмотки в окне магнитопровода находим по формуле из работы [7]:

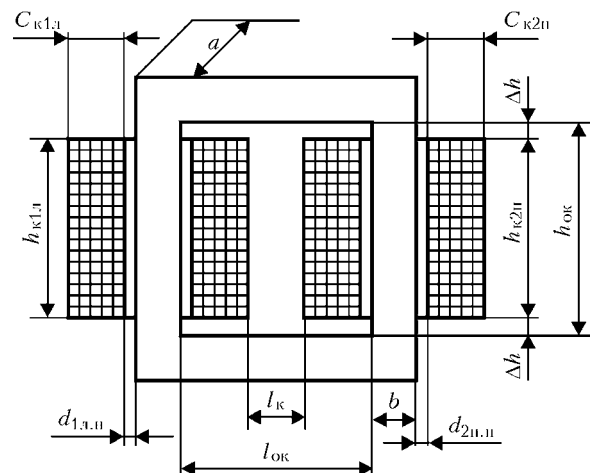


Рис. 1. Схема однофазного трансформатора с РЯМПР



$$S_{o1} = w_1 I_{1дл} / J_{1дл}; S_{o2} = w_1 I_{2дл} / (k_{тр} J_{2дл}), \quad (3)$$

где $I_{1дл}$, $I_{2дл}$ и $J_{1дл}$, $J_{2дл}$ — соответственно длительные действующие значения тока и заданной плотности тока в первичной и вторичной обмотках трансформатора; $k_{тр}$ — коэффициент трансформации ($k_{тр} \approx U_1 / U_2$); U_2 — заданное действующее значение напряжения на вторичной обмотке в режиме холостого хода. Длительные действующие значения токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора равны

$$I_{1дл} = I_1 \sqrt{X/100\%}; I_{2дл} = I_2 \sqrt{X/100\%}, \quad (4)$$

где I_1 , I_2 — действующие значения тока в первичной и вторичной обмотках трансформатора; X — заданная продолжительность включения трансформатора, %.

Действующее значение тока в первичной обмотке трансформатора I_1 определяется с некоторым избытком из выражения $I_1 \approx I_2 / k_{тр} + I_{х.х}$, где $I_{х.х}$ — действующее значение тока холостого хода трансформатора, уточняющееся на этапе оптимизации. Значение тока $I_{х.х}$ может быть рассчитано по методикам из работ [8, 9], а для приближенных расчетов им можно пренебречь. Для сварочных трансформаторов действующее значение тока во вторичной обмотке задается, а для других типов трансформаторов рассчитывается по формуле из работы [6]: $I_2 = S_2 / U_{2н}$, где S_2 — заданная мощность трансформатора; $U_{2н}$ — номинальное действующее значение напряжения на вторичной обмотке.

Примем, что высота катушек с первичной и вторичной обмоткой одинаковы:

$$h_{к1л} = h_{к2п} = (S_{o1} / k_{o1} + S_{o2} / k_{o2}) / C_{к\sigma}, \quad (5)$$

где k_{o1} и k_{o2} — коэффициенты заполнения обмоток проводниковым материалом (значения лежат в диапазоне 0,50...0,95); $C_{к\sigma}$ — суммарная ширина катушек с обмотками $C_{к\sigma} = C_{к1л} + C_{к1п}$.

Толщина катушек с первичной и вторичной обмотками следующая:

$$C_{к1л} = S_{o1} / (k_{o1} h_{к1л}); C_{к2п} = S_{o2} / (k_{o2} h_{к2п}). \quad (6)$$

Ширина окна магнитопровода определяется из выражения

$$l_{ок} = d_{1л.н} + C_{к1л} + l_k + C_{к2п} + d_{2п.н}, \quad (7)$$

а высота окна магнитопровода — из уравнения

$$h_{ок} = 2\Delta h + h_{к1л}. \quad (8)$$

Средняя длина витков первичной и вторичной обмотки составляет

$$\begin{aligned} l_{ср.в1} &= 2(a + b) + 2\pi(d_{1п.н} + C_{к1л}/2); \\ l_{ср.в2} &= 2(a + b) + 2\pi(d_{2п.н} + C_{к2п}/2). \end{aligned} \quad (9)$$

Средняя длина магнитной силовой линии в магнитопроводе следующая:

$$l_c = 2(h_{ок} + l_{ок}) + k_y b. \quad (10)$$

Здесь k_y — коэффициент, учитывающий тип магнитопровода, равный 4 и π при соответственно шихтованном и навитом магнитопроводах.

Объем, масса и стоимость активных материалов магнитопровода и обмоток следующие:

$$V_c = l_c S_c; M_c = \gamma_c V_c; C_c = c_c M_c; \quad (11)$$

$$V_o = l_{ср.в1} S_{o1} + l_{ср.в2} S_{o2}; M_o = \gamma_o V_o; C_o = c_o M_o, \quad (12)$$

где γ_c , γ_o — плотность активных материалов соответственно магнитопровода и обмоток; c_c , c_o — стоимость 1 кг активных материалов соответственно магнитопровода и обмоток.

Объем, масса и стоимость активных материалов трансформатора следующие:

$$V = V_c + V_o; M = M_c + M_o; C = C_c + C_o. \quad (13)$$

Оптимизационная функция трансформатора имеет вид [7]

$$F = M_c + k_g M_o, \quad (14)$$

где k_g — обобщенный весовой коэффициент, задающий соотношение между массами активного материала соответственно магнитопровода и обмоток.

Из анализа оптимизационной модели трансформатора (1)–(14) можно заключить, что независимыми переменными в ней являются величины w_1 , b и $C_{к\sigma}$, все остальные — заданные или зависимые. Независимые переменные определяются в результате оптимизации функции F . Минимальные значения оптимизационной функции могут быть найдены с помощью численных методов оптимизации, например метода Гаусса–Зейделя (покоординатного спуска) [10], при заданных начальных значениях независимых переменных w_1 , b и $C_{к\sigma}$. В результате оптимизации функции F определяются оптимальные значения переменных w_1 , b , $C_{к\sigma}$ и остальных величин, входящих в оптимизационную модель.

При $k_g = 1$ расчет трансформатора ведется на минимум массы активных материалов, в случае $k_g = \gamma_c / \gamma_o$ — на минимум объема, а при $k_g = c_o / c_c$ — на минимум стоимости активных материалов. В общем случае коэффициент k_g может принимать и любые другие значения [7].

После расчета оптимальных геометрических размеров трансформатор должен обеспечивать заданный уровень индуктивности рассеяния, достигаемого путем перераспределения витков обмоток. Если индуктивность рассеяния больше заданной, то для трансформатора нужно часть витков первичной обмотки намотать со вторичной обмоткой и такую же часть приведенных к первичной обмотке витков вторичной обмотки намотать с первичной обмоткой. Однако это не всегда технологично. Как правило, перебрасывают только часть витков первичной обмотки (это связано с удобством намотки проводов меньшего поперечного сечения), получая при этом квазиоптимальный трансформатор, лишь незначительно отличающийся от оптимального. При этом витки первичной обмотки и такое же количество приведенных витков вторичной обмот-

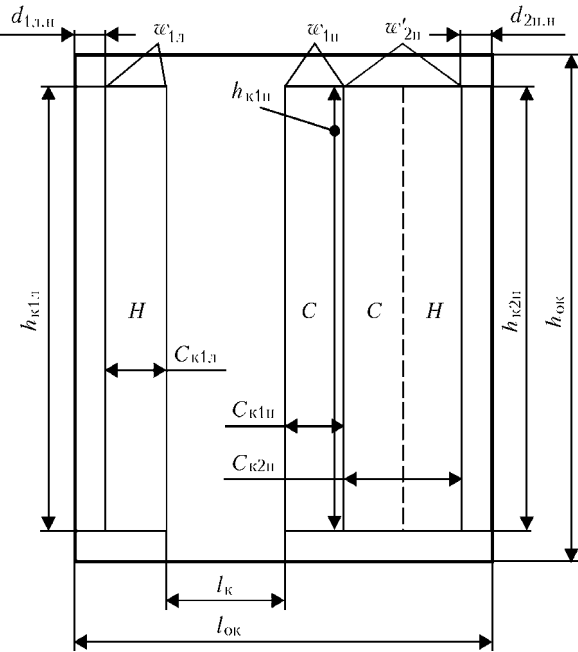


Рис. 2. Схема обмотки окна магнитопровода трансформатора

ки на разных стержнях будут нескомпенсированными, а на одном стержне — скомпенсированными из-за большей и меньшей электромагнитной связи между витками. Если индуктивность рассеяния меньше заданной, то вокруг яра радиально домотывается дополнительная обмотка дросселя, включаемая последовательно и согласно с одной из обмоток (обычно первичной).

Как видно из рис. 2, первичная обмотка w_1 витков имеет на левом стержне $w_{1л}$ витков. На правом стержне расположена вторичная обмотка с $w'_{2п} = w_1$ витков, приведенных к первичной обмотке (реально $w_{2п} = w_1/k_{тр}$). На вторичную обмотку намотана часть витков первичной обмотки с $w_{1п}$ витками. Количество витков первичной обмотки $w_{1п}$ на правом стержне компенсирует такое же количество приведенных витков вторичной обмотки. На рис. 2 области со скомпенсированными витками обозначены буквой С. Оставшиеся части витков обмоток на стержнях являются не скомпенсированными и обозначены буквой Н. Для трансформатора выполняются следующие соотношения:

$$w_1 = w_{1л} + w_{1п}; w'_2 = w'_{2п}$$

На рис. 2 $h_{к1п}$, $C_{к1п}$ — высота и толщина катушек с частями первичной обмотки на правом стержне магнитопровода; $d_{1л.п}$, $d_{2п.л}$ — расстояния между стержнями и частями обмоток с нескомпенсированными витками. Остальные обозначения совпадают с рис. 1.

Индуктивность рассеяния L_k рассматриваемого трансформатора можно условно разделить на три составляющие [11]: $L_{с.ок}$ — индуктивность рассеяния, обусловленная вертикальными потоками рассеяния в окне магнитопровода; $L_{с.с.в}$ — индуктивность рассеяния, вызванная потоками рассеяния от скомпенсированных витков обмоток вне окна магнитопровода; $L_{с.я-л}$ — индуктивность рас-

сеяния, обусловленная потоками рассеяния всех граней ярм и лобовых частей обмоток:

$$L_k = L_{с.ок} + L_{с.с.в} + L_{с.я-л}$$

Индуктивность рассеяния в окне магнитопровода [11, 12]:

$$L_{с.ок} = \mu_0 k_R \frac{a + 2d_{ср}}{h_k} \left(k_L l_k + \frac{C_{к1л} + C_{к1п} + C_{к2п}}{3} \right) w_1^2$$

где k_R — коэффициент Роговского [12], равный

$$k_R = 1 - \sigma[1 - \exp(-1/\sigma)], \quad (15)$$

коэффициент $\sigma = (C_{к1л} + C_{к1п} + l_k + C_{к2п})/(\pi h_k)$; $d_{ср} = (d_{1л.п} + d_{2п.л})/2$ — усредненное расстояние между стержнями магнитопровода и обмотками с нескомпенсированными витками; $h_k = (h_{к1л} + h_{к2п})/2$ — усредненная высота катушек с первичной и вторичной обмотками, при учете, что высоты катушек $h_{к1п} \approx h_{к1л} \approx h_{к2п}$; $k_L = (w_{1л}/w_1)^2$ является коэффициентом.

Индуктивность рассеяния части обмоток со скомпенсированными витками вне окна магнитопровода [12] следующая:

$$L_{с.с.в} = \mu_0 k_R \frac{a + 2[b - d_{2п.п} + \pi(C_{к2п} + d_{2п.п})]}{h_k} \frac{2C_{к1п}}{3} w_1^2$$

Здесь коэффициент Роговского k_R для частей обмоток со скомпенсированными витками вычисляется по формуле (15) при $\sigma = 2C_{к1п}/(\pi h_k)$.

Индуктивность рассеяния между ярмами с учетом рассеяния между лобовыми частями обмоток трансформатора определяется из выражения [11]:

$$L_{с.я-л} = k_l \mu_0 g w_1^2$$

где k_l — коэффициент, учитывающий индуктивность лобовых частей обмоток, вычисляется по эмпирической формуле $k_l = 1,1937[\exp(-k) - 0,05]$; k — коэффициент, равный $(C_{к1л} + C_{к2п} - C_{к1п} + 2d_{ср})/(5a + 0,2h_k)$; g — геометрическая проводимость между пятью парами симметрично расположенных граней ярм магнитопровода [11]

$$g = g_{гр}(a, l_y) + 2[g_{гр}(b, l_y) + g_{гр}(a, b)];$$

$g_{гр}(a, l_y)$ — геометрическая проводимость между верхней и нижней гранями ярм; $l_y = l_{ок} + 2b$ — длина ярма; $g_{гр}(b, l_y)$ — геометрическая проводимость между верхней и нижней фронтальными гранями ярм; $g_{гр}(a, b)$ — геометрическая проводимость между верхней и нижней боковыми гранями ярм. Геометрическая проводимость $g_{гр}$ в виде функции от размеров сторон прямоугольной пластины x и y определяется по аппроксимационной формуле [11]

$$g_{гр}(x, y) = \frac{\sqrt{xy}}{4} \left[2,4 + 1,14 \left(\frac{x+y}{\sqrt{xy}} \right)^{0,858} \right]$$

По сравнению с опытными данными, погрешность расчетов индуктивностей рассеяния L_k не превышает 10 % [11].



Если индуктивность рассеяния после оптимизационного расчета получилась больше заданной $L_{к.з}$, то начальное значение количества витков первичной обмотки на стержнях можно определить по формуле

$$w_{1л} \approx w_1 \sqrt{L_{к.з}/L_{к.}}; \quad w_{1п} = w_1 - w_{1л}$$

Если индуктивность рассеяния получилась меньше заданной, начальное значение количества витков дополнительного дросселя на ярме магнитопровода, включаемого последовательно и согласно с первичной обмоткой, будет следующим:

$$w_{1др} \approx w_1 (\sqrt{L_{к.з}/(\mu_0 g w_{1л}^2)} - 1) / k_M,$$

где $k_M = 0,75...0,85$ — коэффициент магнитной связи обмотки дросселя с ярмовыми потоками рассеяния трансформатора.

После определения начальных значений витков, перераспределяя далее витки первичной обмотки, нужно добиться, чтобы значение индуктивности рассеяния трансформатора как можно ближе приблизилось к заданному уровню.

Разработанную методику расчета применяли для проектирования трансформаторов ряда сварочных источников питания, созданных в Институте электросварки им. Е. О. Патона и успешно работающих в Украине, Российской Федерации и Литве.

Таким образом, разработанная методика расчета однофазного трансформатора с РЯМПП дает возможность рассчитывать трансформаторы, оптимальные по объему, массе и стоимости, а также

A procedure is described for optimization of a single-phase transformer with developed yoke magnetic leakage fluxes, which uses an upgraded procedure of calculation of leakage inductance.

достичь погрешности расчета индуктивности рассеяния, не превышающей 10 %, по сравнению с опытными данными.

1. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Элементы расчетов цепей и аппаратов переменного тока для дуговой сварки. — Киев: Изд-во АН УССР, 1953. — 146 с.
2. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. — М.: Машиностроение, 1966. — 360 с.
3. Лебедев В. К. К расчету сопротивления короткого замыкания сварочного трансформатора с ярмовым рассеянием // Автомат. сварка. — 1958. — № 4. — С. 37–43.
4. Лебедев В. К., Троицкий В. А., Белый Н. Г. Трансформатор с ярмовым рассеянием, регулируемым сварочным кабелем // Там же. — 1968. — № 6. — С. 61–65.
5. Кобозев В. А., Коваленко В. В. Сварочные трансформаторы. — Ставрополь, 1998. — 227 с.
6. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 528 с.
7. Пентегов И. В., Рымар С. В., Стежковский Е. П. Оптимизационная математическая модель трехфазного трансформатора и выбор его расчетного варианта при многокритериальной оптимизации // Техн. электродинамика. — 2002. — № 1. — С. 22–28.
8. Пентегов И. В., Рымар С. В. Метод определения потерь в стали трансформатора, ориентированный на использование в САПР // Техн. электродинамика. — 1995. — № 6. — С. 35–40.
9. Пентегов И. В., Рымар С. В. Метод расчета тока холостого хода трансформатора, ориентированный на использование в САПР // Там же. — 1996. — № 1. — С. 39–45.
10. Корячко В. П., Курейчик В. М., Норецков И. П. Теоретические основы САПР. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 400 с.
11. Пентегов И. В., Рымар С. В. Особенности расчета индуктивностей рассеяния трансформаторов с развитыми магнитными потоками рассеяния // Электротехника и электромеханика. — 2004. — № 2. — С. 38–45.
12. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. — Л.: Энергия, 1970. — 432 с.

Поступила в редакцию 08.10.2004

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ

Объявляет ежегодный набор в

ДОКТОРАНТУРУ по специальностям:

- ✓ сварка и родственные технологии
- ✓ автоматизация технологических процессов
- ✓ металловедение и термическая обработка металлов
- ✓ металлургия высококачественных металлов и специальных сплавов

АСПИРАНТУРУ по специальностям:

- ✓ сварка и родственные технологии
- ✓ автоматизация технологических процессов
- ✓ металловедение и термическая обработка металлов
- ✓ металлургия высококачественных металлов и специальных сплавов

Прием в аспирантуру проводится в сентябре.

Контактный телефон: 289-84-11

Подробная информация на сайте института (раздел аспирантура): www.paton.kiev.ua
 Документы направлять по адресу: 03680, Украина, Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 11
 Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ученому секретарю



ЦИРКОНИЙ: СПЛАВЫ, СВАРКА, ПРИМЕНЕНИЕ (Обзор)

В. Е. БЛАЩУК, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описаны достоинства циркония и его сплавов по сравнению с другими конструкционными материалами, способы производства и применения их в промышленности, а также особенности сварки. Отмечены области применения циркония и его сплавов, а также перспективы их использования.

Ключевые слова: сварка, цирконий и его сплавы, производство, применение

Прогресс науки и техники во многих отраслях (энергетике, металлургии, машиностроении, авиационном и ракетостроении) напрямую связан с применением принципиально новых материалов с их неизвестными ранее свойствами. Так, благодаря развитию атомной энергетики, связанному с расширением использования материалов с низким сечением захвата тепловых нейтронов и сочетающих это свойство с достаточной прочностью и коррозионной стойкостью в воде и водяном паре при повышенных температурах, созданы предпосылки для освоения производства циркония в промышленных масштабах. Были разработаны технологии производства циркония и его сплавов необходимой для атомной промышленности чистоты, в частности, для материалов оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) в различных типах ядерных реакторов. Расширение производства циркония и его сплавов, а также некоторое сокращение их использования в атомной энергетике создали условия для их применения при изготовлении химического оборудования.

Цирконий считается редким элементом. Однако по распространенности на Земле он входит в первую треть всех известных элементов. Неизменным спутником циркония является гафний. Оба элемента присутствуют в одном минерале — цирконе (гафний в 50...60 раз в меньших количествах, чем цирконий). В Украине цирконий встречается и добывается из россыпей вместе с титановыми минералами. Издавна известны 11 комплексных титаноциркониевых месторождений, запасы которых Украина обеспечена на значительный период и является монополистом в СНГ. Добыча титаноциркониевых руд в Украине составляет 20 % мировой [1].

Цирконий открыт в 1789 г. М. Г. Клапротом¹ в минерале цирконе. Происхождение этого названия объясняют по-разному: от арабского слова «заркун» — минерал или от двух персидских слов «цар» — золото и «гуп» — цвет (из-за золотистой окраски драгоценной разновидности циркона — ги-

ацинта). Металлический цирконий впервые получен Й. Я. Берцелиусом² путем восстановления фторцирконата калия металлическим натрием. Чистый пластичный цирконий получен в 1925 г. путем термической диссоциации йодида циркония (так называемый йодидный цирконий). Этот способ, разработанный голландскими учеными А. ван Аркелом и И. де Буром, получил сначала некоторое распространение, однако высокая стоимость полученного циркония существенно ограничила области его применения. Следующим этапом в разработке более дешевого способа стал усовершенствованный метод Кролля. Схема этого производства предусматривает две основные стадии — хлорирование диоксида циркония и восстановление полученного четыреххлористого циркония металлическим магнием (магнийтермический) или кальцием (кальцийтермический цирконий) под слоем расплавленного металла. Конечный продукт — циркониевая губка, которая переплавляется в компактный металл дуговой вакуумной плавкой или электронно-лучевой плавкой в вакууме [2–4].

Цирконий относится к переходным металлам IVA группы периодической системы (титан, цирконий, гафний). Все металлы этой группы полиморфны, имеют гексагональную решетку для низкотемпературной (α) и объемно центрированную для высокотемпературной (β) модификации. Они мало отличаются по значениям атомных радиусов и способны со многими элементами образовывать твердые растворы. Непрерывные твердые растворы образуются с металлами, имеющими изоморфную структуру.

При взаимодействии титана, циркония и гафния друг с другом образуются непрерывные твердые растворы с обеими модификациями. Тройная система Ti–Zr–Hf является пока единственной известной системой, в которой сочетается два вида непрерывных твердых растворов двух (α - и β -) модификаций. Это создает хорошие предпосылки для непосредственной сварки циркония с титаном даже при наличии в сплаве циркония добавок гафния. β -Zr образует с ниобием, танталом и ураном непрерывные твердые растворы [5].

Цирконий является металлом повышенной стойкости в ряде агрессивных химических сред [6–9]. По этой причине он является уникальным конструкционным материалом для изготовления узлов химического оборудования, находящихся в кон-

¹ Мартин Генрих Клапрот [01.12.1743 (Вернигероде) – 01.01.1817 (Берлин)] — немецкий химик и естествоиспытатель.

² Йенс Якоб Берцелиус [20.08.1779 (Веверсунда) – 07.08.1848 (Стокгольм)] — известный шведский химик и минеролог.

такте поочередно то с горячими сильными кислотами, то с горячими едкими щелочами.

Цирконий, имеющий наименьшее по сравнению с другими конструкционными материалами эффективное поперечное сечение захвата тепловых нейтронов ($S = 0,18 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$), является идеальным материалом для установок по выработке ядерной энергии. Однако это свойство характерно для циркония, не содержащего даже малых примесей гафния ($S = 115 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$). Поскольку многие физико-химические свойства гафния и циркония близки, получение высокочистого циркония, не содержащего гафния, представляет определенное затруднение. Промышленность в массовых количествах выпускает два вида сырьевого циркония — реакторный (не содержащий гафния) и общего потребления (содержащий до 4,5 % Hf). В таких количествах гафний практически не влияет на коррозионную стойкость циркония в агрессивных средах, а отсутствие рафинирования для удаления гафния приводит к значительному снижению стоимости полуфабрикатов из циркония. С точки зрения инженера-конструктора химического оборудования, не связанного с реакторостроением, любые сплавы циркония являются подходящим материалом в тех случаях, когда необходима особая коррозионная стойкость, характерная для данного металла.

Цирконий практически не подвержен действию горячей воды и водяного пара. Однако при повышенных температурах (около 380...400 °С) под влиянием длительного воздействия перегретой воды наблюдается охрупчивание циркония, что объясняется постепенным окислением металла и растворением в нем водорода, образующегося из воды [10].

Незначительные количества вредных примесей (газов) резко ухудшают свойства циркония. Одной из наиболее вредных примесей является азот [11]. Цирконий активно взаимодействует с азотом и кислородом, образуя соединения ZrN и ZrO₂, характеризующиеся тугоплавкостью и высокой твердостью, увеличение содержания азота в цирконии резко ухудшает коррозионную стойкость. Влияние азота проявляется тем резче, чем выше температура

испытаний (при эксплуатации в воде). Вредное влияние азота может быть уменьшено легированием циркония оловом. Из элементов внедрения в цирконии лишь кислород рассматривается не только как вредная примесь, но и как легирующий элемент [12]. Под воздействием кислорода наблюдается упрочнение, увеличение сопротивления ползучести, относительно слабое влияние на коррозионную стойкость циркония и некоторых его сплавов.

При температуре 300...1000 °С цирконий быстро адсорбирует водород, при этом он становится хрупким, более твердым, магнитная восприимчивость при насыщении водородом снижается. При температурах, выше температуры эвтектоидного превращения, стабилизаторы α -фазы (олово, сурьма, алюминий, торий, кадмий, кислород, азот, редкоземельные элементы) увеличивают растворимость водорода, а β -стабилизаторы уменьшают. При более низких температурах эффект незначителен. Растворимость водорода в β -Zr уменьшается по мере повышения содержания кислорода. Растворенный в цирконии водород меньше влияет на коррозионную стойкость, чем азот, но приводит к разрушению по механизму замедленного гидридного растрескивания. Вредное действие гидридных пластин заканчивается при 200 °С. При 1200...1300 °С в условиях высокого вакуума водород может быть удален [13, 14].

При взаимодействии циркония с углекислым газом образуются оксиды и карбиды циркония, при реакции с парами воды ($t \approx 300 \text{ °С}$) — оксиды и гидриды. Углерод ускоряет коррозию в воде и паре. Кроме того, влияние оказывают также примеси алюминия, бериллия, кальция, кадмия, магния, свинца. Примеси железа, кремния и др. повышают коррозионную стойкость, блокируя действие вредных примесей. Оказывает влияние не только абсолютное количество примесей, но и изменение соотношения положительно (железо, хром, никель) и отрицательно (азот, водород, алюминий) влияющих примесей. Все это определяет общее коррозионное поведение сплавов циркония [2–6].

Наибольшее применение цирконий и его сплавы нашли в экономичной атомной энергетике в ка-

Таблица 1. Сплавы на основе циркония, применяемые в атомной энергетике

Марка сплава	Содержание основных легирующих элементов, %					Тип реактора	Страна разработчик (год разработки)
	Nb	Sn	Fe	O	другие		
Э110	1,0	—	—	< 0,16	—	ВВЭР; РБМК	СССР (1958)
Э125	2,5	—	—	—	—	ВВЭР; РБМК; CANDU	»»
Э635	1,0	1,0...1,5	0,3...0,5	—	—	ВВЭР; РБМК; PWR; BWR; CANDU	СССР (1971)
Zry-2	—	1,2...1,8	0,07...0,2	—	≤ 0,08 Ni 0,05...0,15 Cr	BWR	США (1952)
Zry-4	—	1,2...1,8	0,18...0,24	—	0,07...0,13 Cr	PWR	»»
ZIRLO	1,0	1,0	0,1	—	—	PWR	США (1990)
M4	—	0,5	0,6	0,12	0,3 V	PWR	Франция (1997)
M5	1,0	—	—	0,12	—	PWR	»»
NDA	0,1	1,0	0,27	—	0,16 Cr	BWR	Япония (1990)
MDA	0,5	0,8	0,2	—	0,1 Cr	PWR	»»



Таблица 2. Сплавы циркония по классификации ASTM

Материал	Коммерческое название	Марка по ASTM (UNSNnumber)	Массовая доля элементов, %*				
			Zr + Hf	Sn	Nb	Fe + Cr	[O] _{max}
Цирконий технической чистоты	Zircadine 702	R60702**	99,2	—	—	≤ 0,2	0,16
		R60001***					
Сплавы	Zircadine 704	R60704**	97,5	1,0...2,0	—	0,2...0,4	0,18
	Zircaloy-2	R60802***					
	Zircadine 705	R60705**	95,5	—	2,0...3,0	≤ 0,2	0,18
	Zircadine 706	R60706**	95,5	—	2,0...3,0	≤ 0,2	0,16
	Zr-2,5Nb	R60901***					

*Максимальное содержание газов: 0,0005 % [H], 0,025 % [N], 0,05 % [C]. **Сплав общего назначения (максимальное содержание гафния 4,5 %). ***Сплав для атомной энергетики (максимальное содержание гафния 0,010 %).

честве оболочек твэлов, канальных труб и других конструктивных узлов активной зоны энергетических реакторов [8, 9, 15–17]. В табл. 1 приведены составы циркониевых сплавов, используемых в активных зонах реакторов. Основным легирующим элементом как для бинарных, так и многокомпонентных сплавов является ниобий. В табл. 2 приведены составы сплавов циркония по классификации ASTM. Цирконий технической чистоты (табл. 2) не нашел применения ни в отечественной (Э100), ни в зарубежной атомной энергетике.

В Украине разработаны сплавы циркония реакторной чистоты марок КТЦ-100 (аналог Э100), КТЦ-110 (Э110) и КТЦ-125 (Э125) на базе кальцийтермического циркония (КТЦ) с дополнительным рафинированием. Применение электронно-лучевого переплава позволяет очищать сплавы КТЦ от шлаковых включений и примесей более летучих чем цирконий [18].

Сплавы Э110 и Э635 нашли применение в состоянии, близком к рекристаллизованному. В исходном состоянии это обеспечивает их более высокую пластичность. В результате легирования ниобием они поглощают существенно меньшее количество водорода, что выгодно отличает их от сплавов типа циркалай. Разработанные процессы их передела обеспечивают оптимальную текстуру, исключаящую неблагоприятную ориентацию гидридов. Сплавы Э110 и Э635 обладают высоким сопротивлением коррозии при эксплуатации в воде под давлением в результате образования на поверхности изделий тонких оксидных пленок. Однако по сопротивлению коррозии в кипящей воде сплавы Э110 и Э635 существенно различаются. При наличии поверхностного или объемного кипения на изделиях из сплава Э110 наблюдается «нодульная» коррозия, которая отсутствует на ана-

логичных из сплава Э635. Это связано с отличием химических составов α -твердого раствора, составляющего основу сплавов. Обогащение α -твердого раствора в сплаве Э635 железом увеличивает его сопротивление коррозии в результате диффузионного растворения интерметаллидных частиц под действием нейтронного облучения. Этим же объясняется его более высокое сопротивление ползучести. Сплав Э635 обладает высоким сопротивлением радиационному росту в результате особой дислокационной структуры, а также высокой стойкостью к так называемому замедленному гидридому растрескиванию. В табл. 3 приведены типичные механические свойства некоторых сплавов циркония.

Наряду с указанными разработан еще ряд сплавов циркония, которые пока не нашли практического применения. Разработана также группа жаропрочных сплавов (например, сплав Zr-3,2Sn-1,1Mo-1,1Nb и другие, имеющие, однако, низкую коррозионную стойкость [8, 9]).

Для циркония и его сплавов нашли применение следующие способы сварки: электронно-лучевая (ЭЛС), плазменная (ПС) и микроплазменная (МПС), неплавящимся электродом в инертных газах с местной защитой (ТИГ) и в камерах с контролируемой атмосферой, контактная и в твердой фазе [8, 9, 19–27].

Перед сваркой кромки соединяемых изделий подвергаются механической обработке с двух сторон по обе стороны от стыка (зачистка на ширину 20...30 мм от стыка наждачным кругом, шабером с последующим обезжириванием). С целью уменьшения возможности насыщения поверхностных слоев металла водородом целесообразно избегать травления кромок перед сваркой. Однако в отдельных случаях допускается химическая очистка кромок при тщательном соблюдении всех требований технологических инструкций [23].

ЭЛС в вакууме не хуже $1,33 \cdot 10^{-3}$

Па является одним из самых перспективных способов сварки плавлением циркония и его сплавов, так как при этом создаются хорошие условия по чистоте атмосферы. При этом целесообразно применять системы откачки, обеспечивающие получение высокого безмасляного

Таблица 3. Механические свойства циркония и его сплавов при различных температурах испытаний

Материал	σ_b , МПа		$\sigma_{0,2}$, МПа		δ , %	
	20 °C	300 °C	20 °C	300 °C	20 °C	300 °C
Цирконий нидийный, дугового переплава	220	120	80	45	45	55
Zircaloy-2	480	200	310	100	22	35
Э110 (Н-1)	350	200	200	120	30	33
Э125 (Н-2,5)	450	300	280	200	25	23

вакуума. При ЭЛС пластин из сплавов Э110 и Э125 обеспечивается кратковременная прочность сварных соединений, составляющая не менее 0,9 такого же показателя основного металла (ОМ), в диапазоне температур испытаний 20...300 °С. При ЭЛС существенно снижается содержание кислорода в металле шва в результате вакуумной экстракции, что изменяет эксплуатационные характеристики сварного соединения.

Основной проблемой при ЭЛС сплавов циркония является пористость сварных швов, выявляемая рентгенографическим контролем. Исследования показали, что главной причиной такой пористости являются микрозагрязнения органическими материалами свариваемых поверхностей. Предупредить пористость можно комплексом мер по поддержанию культуры производства и максимальной дегазацией стыка во время сварки с помощью технологических режимов ЭЛС и конструкции деталей в зоне соединения [24].

При сварке плавлением в металле шва сплавов Э110 и Э125 образуется неравновесная α' -фаза переменного состава — пересыщенный твердый раствор ниобия в α -Zr. При этом наряду с α' -фазой в металле ЗТВ присутствует остаточная нераспавшаяся в процессе охлаждения высокотемпературная β -фаза циркония — твердый раствор ниобия в β -Zr также переменного состава. Наличие в металле шва и ЗТВ неравновесных α' и β -фаз снижает коррозионную стойкость сварного соединения. Отжиг в ($\alpha + \beta$)-Nb-области диаграммы состояния системы Zr-Nb обеспечивает более высокую коррозионную стойкость, чем отжиг в ($\alpha + \beta$)-Zr-области. Однако при этом требуются большие выдержки (50...100 ч), что является неудобным и неэкономичным.

В настоящее время для соединения циркония и его сплавов наиболее широкое применение в химическом машиностроении нашли сварка неплавящимся (ТИГ) и плавящимся (МИГ) электродами в инертных газах — аргоне, гелии и их смесях [22]. При сварке циркония (и титана) в зависимости от размеров и конфигурации свариваемых изделий применяются следующие методы защиты зоны сварки и остывающих участков сварного соединения инертными газами:

общая защита свариваемого изделия в камере с контролируемой атмосферой. Применение таких камер обеспечивает наиболее надежную и стабильную защиту зоны сварки и остывающих участков сварного соединения с лицевой и обратной стороны. Перед заполнением камеры инертным газом в ней создается вакуум не хуже $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па. При сварке циркония для заполнения камер используется гелий или смесь (об. %): 75He + 25Ar. При заполнении камер аргонem повышается склонность к порообразованию. Используемый газ перед подачей в камеру подвергается дополнительной очистке и осушению. Применение в случае такой сварки бинарных смесей с кислородом и азотом позволяет легировать швы циркония из газовой фазы с целью повышения прочности металла шва. При этом легирование кислородом металла шва на сплаве Э125

в диапазоне концентраций 0,05...0,15 мас. % повышает прочность сварного соединения после термической обработки на 20 % без заметного снижения пластичности и ударной вязкости. Однако при достаточной протяженности сварного шва в нем невозможно добиться равномерного содержания легирующих газов;

местная защита зоны сварки с использованием местных камер. Нашла применение в основном при сварке поворотных и неповоротных стыков трубопроводов;

местная, струйная защита зоны сварки и остывающих участков сварного соединения с помощью перемещающегося сопла горелки с закрепленной на ней удлиненной насадкой для обдува остывающих участков, а также обратной стороны сварного соединения с помощью обдувочных приспособлений различной конструкции.

Наибольшее применение для соединения сплавов циркония получили автоматическая и ручная сварка неплавящимся электродом со струйной защитой инертным газом зоны сварки и остывающих участков сварного соединения с подачей и без подачи присадочной проволоки.

В отечественной практике при сварке циркониевых сплавов применяются присадочные проволоки различных диаметров из сплавов Э100, Э110 и Э125 (ТУ 952118-90), в зарубежной (в соответствии с AWS A5-90) марки ERZr2 — для циркония коммерческой чистоты (сплав UNS R60702), ERZr3 — для сварки сплава Zr-1,5Sn (сплав UNS R60704) и марки ERZr4 — для сварки сплава Zr-2,5Nb (сплавы UNS R60705 и R60706). Проволоки из циркониевых сплавов выпускаются только «реакторной» чистоты, т. е. с очень малым содержанием гафния и примесей внедрения.

Защитные приспособления, используемые при сварке титана, не обеспечивают необходимого качества защиты, оцениваемого по цвету побежалости. Поэтому требуется увеличение их геометрических размеров с целью расширения зоны защиты, а также использование различных приспособлений (например, снабженных водяным охлаждением) для увеличения интенсивности отвода тепла от зоны сварки. При сварке циркония зависимость качества защиты от скорости сварки и времени нахождения горячих участков в зоне защиты инертным газом выражена более отчетливо, чем при сварке титана. Использование при сварке циркония в качестве защитного газа гелия позволяет в 2 раза (по сравнению с аргонem) увеличить скорость охлаждения зоны сварки. Это ограничивает развитие химической неоднородности в сварном соединении и приводит к улучшению его свойств. Однако применение сварки в гелии ограничивается его высокой стоимостью по сравнению с аргонem.

При сварке листов малых толщин из циркония нашел применение импульсный процесс сварки ТИГ, обладающий широким диапазоном регулирования теплового воздействия дуги на металл. К достоинствам такой сварки следует отнести большие допуски на подготовку кромок, установку подкладок и фиксирующих приспособлений, а также



уменьшение коробления свариваемых листов. Эти факторы позволяют снизить затраты на сварочные работы в связи с уменьшением времени сварки и резким сокращением количества дефектов.

С целью ускорения процесса установления равновесного состояния в металле сварного соединения при послесварочной термической обработке сплавов циркония нашел применение предварительный наклеп. Холодная пластическая деформация, а также проведение термоциклической обработки для создания предварительного наклепа способствуют более быстрому и полному распаду α -фазы в сварном соединении при последующей термообработке. Кроме того, размеры возникающих частиц β -Nb (сплавы системы Zr-Nb) уменьшаются, а их распределение в матрице становится равномерным.

Сплавы циркония хорошо соединяются всеми способами контактной сварки — точечной, шовной, стыковой, оплавлением. Высокое сопротивление в сочетании с низкой теплопроводностью облегчают этот процесс. Режимы точечной сварки циркония по плотности тока превышают режимы при сварке сплавов титана тех же толщин в 1,6...1,7 раза. Шовная сварка выполняется с дополнительной защитой аргоном [25].

Сплавы циркония соединяются диффузионной сваркой в вакууме не хуже $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па при температурах 750...950 °С и времени сварки 20 мин.

Для соединения трубопроводов из циркония, кроме уже указанных способов, нашли применение магнитно-импульсная сварка и сварка трением. Исследования сварных соединений труб из сплавов циркония показали, что прочность сварных соединений трубчатых образцов при переменных нагрузках зависит от способа сварки и конструкции сварного соединения. На статическую прочность указанные факторы не влияют. При этом выносливость соединений, выполненных магнитно-импульсной и контактно-стыковой сваркой, в 2,5...3 раза ниже такого же показателя для труб, выполненных ЭЛС. Поэтому указанные способы сварки нашли ограниченное применение для соединения труб из сплавов циркония при всей простоте их выполнения.

Сварка трением труб из сплавов циркония производится в твердом состоянии с подачей аргона в зону стыка и позволяет получить достаточно надежные сварные соединения в том случае, если в процессе сварки температура металла, формирующего сварное соединение, не будет превышать температуры полиморфного превращения сплава, а стык подвергается термообработке в ($\alpha+\beta$)-области диаграммы состояния системы Zr-Nb. В этом случае металл, разогретый до высоких температур на стадии проковки, выдавливается в грат и удаляется. Оставшийся в сварном соединении металл имеет мелкозернистую структуру с малой степенью структурной и химической неоднородности. При испытании на малоцикловую усталость показатели долговечности сварных соединений, выполненных ЭЛС и сваркой трением, равноценны [26].

При сварке плавлением циркония с другими металлами большое значение имеет правильный выбор способа и техники сварки. В связи с высокой стоимостью циркония часто является экономически целесообразным изготовление комбинированных Ti-Zr-сварных конструкций [21]. При автоматической сварке ТИГ технического титана ВТ1-0 со сплавами Э110 и Э125 для увеличения объемной доли более тугоплавкого металла (циркония) в металле шва вольфрамовый электрод смещается в его сторону на 1,5...2 мм. При смещении вольфрамового электрода в сторону стыка проплавление циркония ухудшается и при этом получаются непровары и образуются наплывы. При сварке сплавов ВТ1-0+Э110 в металле шва образуется α' -фаза с ППУ-решеткой, а при сварке ВТ1-0+Э125 — малое количество β -Zr-фазы. При этом термообработка в α -области (вакуум не хуже $0,2 \cdot 10^{-2}$ Па) не приводит к образованию в металле шва равновесной β -Zr-фазы. В нем сохраняется структура мартенситного типа α' -фазы. В структуре металла ЗТВ со стороны Ti- и Zr-сплавов существенных изменений не наблюдается. В то же время при термообработке в β -области наблюдается полная перекристаллизация металлов шва и ОМ. Происходит частичная гомогенизация твердого раствора и снижение микрохимической неоднородности, а также интенсивный рост зерен в ОМ и металле ЗТВ. В металле шва размер первичных β -зерен практически не изменяется. Замедленное охлаждение приводит к образованию в металле шва и ОМ грубой крупноглычатой структуры α -фазы, характерной для двухфазных Zr + Ti-сплавов, охлаждаемых с малой скоростью из β -области. Структура ОМ (ВТ1-0) и металла ЗТВ представляет собой крупнопластинчатую α -фазу. Однако несмотря на то, что титан и цирконий расположены в одной группе периодической системы и являются металлами-аналогами, образующими непрерывный ряд твердых растворов, их металл шва имеет сравнительно низкие показатели пластичности и ударной вязкости. Все это еще больше усугубляется при сварке сплавов циркония с высокопрочными $\alpha + \beta$ -титановыми сплавами. Для соединения таких листовых сплавов (например, Э-125+ВТ3-1) находит применение точечная ЭЛС без присадки с использованием проплавления точки с помощью повторного прохода со стороны сплава циркония таким образом, чтобы проплавить интерметаллидную прослойку для улучшения пластических свойств сварного соединения.

Сварка взрывом нашла применение для получения биметалла цирконий-сталь, а также выполнения нахлесточного соединения труба из сплава Э125 с трубой из нержавеющей стали. При этом наличие дисперсионных интерметаллидов в зоне контакта не ухудшает механические свойства сварного соединения, отличающегося высокой термической стабильностью при температуре 400 °С. Проведены также успешные эксперименты по холодной сварке образцов циркония и нержавеющей стали. При испытании таких соединений на ма-

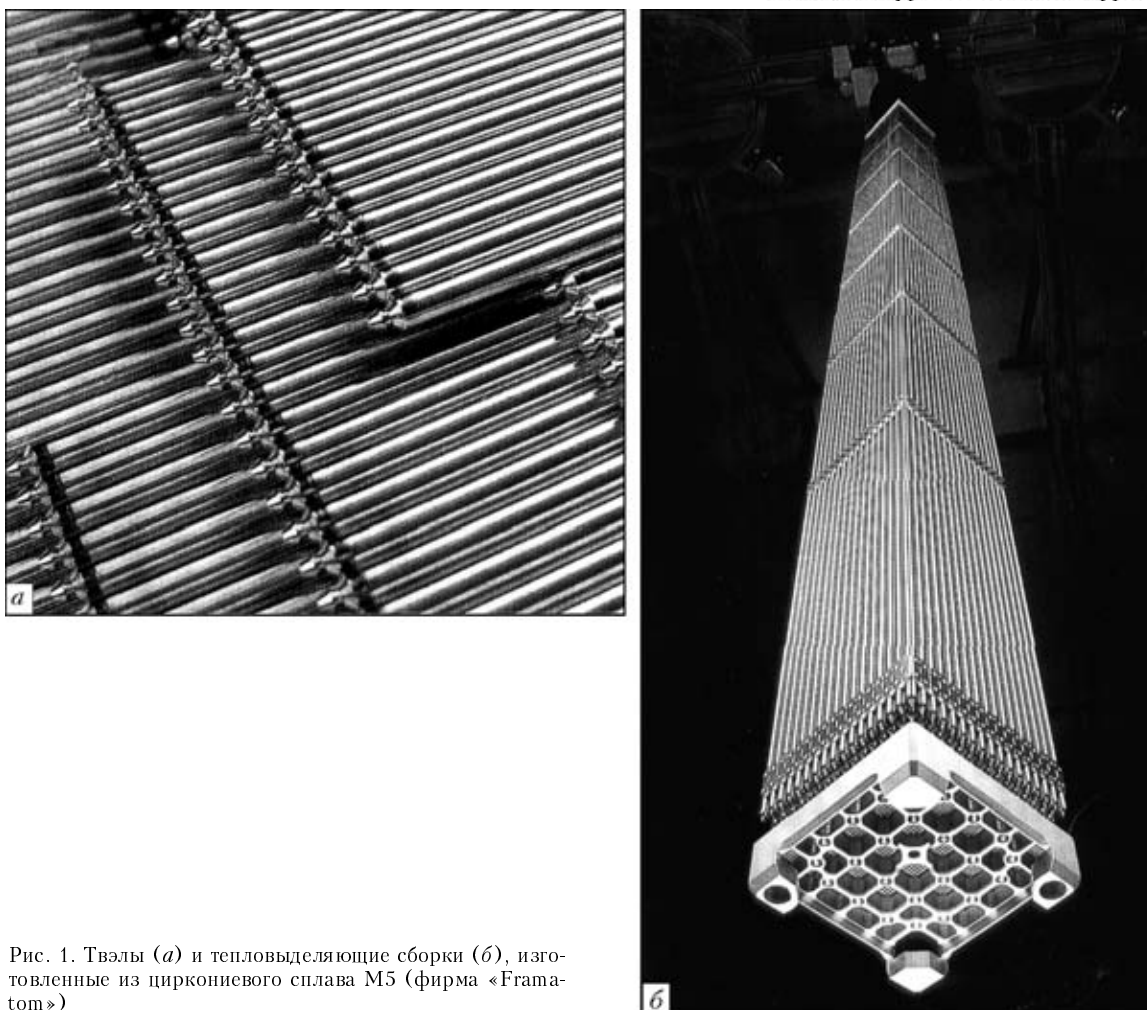


Рис. 1. Твэлы (а) и тепловыделяющие сборки (б), изготовленные из циркониевого сплава М5 (фирма «Framatom»)

лоцикловую усталость разрушение происходит по цирконию [8, 9, 19].

Технологические процессы изготовления сварных изделий из сплава Э125 обязательно включают послесварочный отжиг. Последний в вакууме или инертных газах крупногабаритных изделий или их отдельных узлов связан с определенными трудностями — отсутствием необходимого оборудования, значительным увеличением стоимости и др. При отжиге на воздухе происходит интенсивное взаимодействие циркония с активными газами. В то же время при температуре отжига 470... 480 °С (длительность 2 ч) происходит повышение пластичности металла сварного соединения в результате частичного распада мартенсита. Охрупчивающее влияние поглощенных газов из атмосферы проявляется мало. В процессе такого отжига на поверхности циркония образуется пленка черного цвета, обладающая хорошим сцеплением с подложкой. Она представляет собой твердый раствор циркония в диоксиде циркония с небольшим количеством нитрида циркония. Такое окисление сварных соединений в результате отжига на воздухе повышает их коррозионную стойкость и препятствует наводороживанию. При сварке сплавов Э100 и Э110 отжиг необязателен, так как в исходном состоянии сплавы обладают достаточно большими запасами пластичности и ударной вязкости.

Сплавы системы Zr–Nb и их сварные соединения имеют высокую коррозионную стойкость и не склонны к коррозионному растрескиванию под напряжением во многих высокоагрессивных технологических средах химической промышленности. Для повышения сопротивляемости сварных соединений и конструкций из сплавов циркония преждевременному разрушению в агрессивных средах необходимо применение рациональных конструкций и технологий сварки [6–10, 15–21, 23, 27].

Первым потребителем металлического циркония являлась черная металлургия. Цирконий оказался хорошим раскислителем, превосходящим марганец и титан. Одновременно он уменьшает содержание газов и серы в сталях. Значительное количество циркония потребляет и цветная металлургия. Кроме того, он используется для легирования титана, алюминия, молибдена и др., повышая коррозионную стойкость и механические свойства сплавов.

Главной отраслью применения циркония и его сплавов является атомная энергетика. Первой крупной конструкцией из циркония был реактор, установленный на первой американской атомной подводной лодке «Наутилус». Позже выяснилось, что выгоднее изготавливать из циркония оболочки твэлов и тепловыделяющие сборки (рис. 1), а не стационарные детали активной зоны реактора.



Рис. 2. Сварной транспортно-технологический контейнер из сплава Э110 вместимостью 20 л

Химическая промышленность становится все более крупным потребителем изделий из циркония



Рис. 3. Сварной трубный теплообменник-подогреватель из сплава Э125

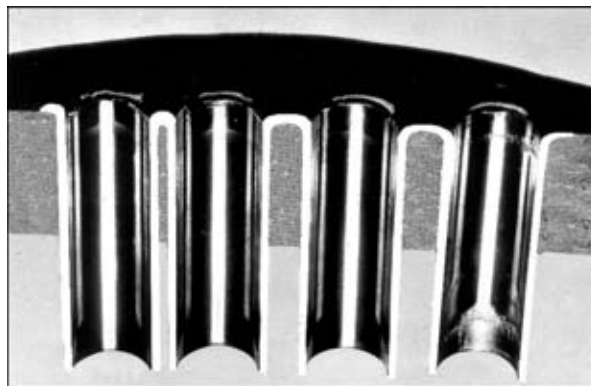


Рис. 4. Макрошлиф сварных соединений трубной решетки (BT1-0) с трубками (Э125)

и его сплавов. Высокая коррозионная стойкость и сравнительно высокая температура плавления (1865 °С) создают благоприятные условия для его широкого использования. Цирконий нашел применение и в текстильной промышленности для изготовления фильер при производстве искусственных волокон; при изготовлении химического оборудования, эксплуатируемого в условиях повышенных температур и агрессивных сред (насосов, деталей горячей запорной арматуры, теплообменников, фильтров, реакторов, емкостей, лабораторного и медицинского оборудования), а также при производстве уксусной кислоты. Более широкое применение циркония сдерживается его высокой стоимостью. В качестве альтернативы нашла применение внутренняя облицовка титанового оборудования полотнищами из сплавов циркония. Для защиты колонны (основной металл корпуса — титановый сплав BT1-0) деполяризации паральдегида была изготовлена свободно прилегающая футеровка из сплава Э125 толщиной 2 мм. Колонна успешно эксплуатируется в производственных условиях [8].

В транспортно-технологическом контейнере (рис. 2) все детали, контактирующие с агрессивной жидкостью (четырёххлористый кремний или четыреххлористый германий особой чистоты), изготовлены из листового сплава Э110 толщиной 2 мм. При изготовлении контейнера использовали как ручную, так и автоматическую сварку ТИГ. Для изготовления вспомогательных деталей, не контактирующих с агрессивной средой, использован титан марки BT1-0 толщиной 2 мм. Детали приваривали к корпусу транспортно-технологического контейнера через вставки из Э110. Проведенные исследования показали, что качество транспортируемых сред (допустимое содержание металлических и водородсодержащих примесей) практически не отличается от исходного по истечении трех месяцев (гарантийного срока хранения). Благодаря использованию транспортно-технологических контейнеров, изготовленных из циркония, устраняется проблема утилизации ранее применявшихся одноразовых флаконов малой вместимости из специального стекла или фторопласта [21].

Сварной трубный теплообменник-подогреватель для нагрева предгидролизного раствора при производстве TiO_2 (рис. 3) представляет собой шес-

тисекционную трубную конструкцию с площадью рабочей поверхности 36 м² (диаметр 3200 мм, высота 2650 мм). Несущие трубы диаметром 70×3,5 мм и трубы регистров диаметром 50×3 мм изготовлены из сплава Э125. Для сварки использована ручная ТИГ с присадкой из сплава Э110 [21]. Теплообменники такого типа успешно эксплуатируются в титановой промышленности.

При изготовлении теплообменника для процесса обезжиривания уксусной кислоты трубную решетку изготавливали из титанового сплава ВТ1-0 толщиной 80 мм, а трубки — из циркониевого сплава Э125 (рис. 4). Трубки с трубной решеткой соединяли ручной ТИГ без присадки путем оплавления торцов трубок, выступающих на 2...2,5 мм над поверхностью решетки. Обследование теплообменника через 15 тыс. ч эксплуатации подтвердило возможность и перспективность изготовления таких аппаратов.

Благодаря высокой коррозионной стойкости цирконий нашел применение для изготовления различного хирургического инструмента. Установлено, что чистый цирконий не вызывает каких-либо реакций и изменений в мышечных тканях, костях и мозге человека. Из него делают кровоостанавливающие зажимы, черепные пластины и даже нити для наложения швов при операциях на мозге.

1. Атлас «Геологія і корисні копалини України» / За ред. Л. С. Галецького. — К.: УЦТП «Геос-XXI століття», 2001. — 168 с.
2. Тугоплавкие материалы в машиностроении: Справочник / Под ред. А. Т. Гуманова, К. И. Портного. — М.: Машиностроение, 1967. — 392 с.
3. Дуглас Д. Металловедение циркония: Пер. с англ. — М.: Атомиздат, 1975. — 360 с.
4. Электроно-лучевая плавка / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.
5. Металлохимические свойства элементов периодической системы / Под ред. И. И. Корнилова. — М.: Наука, 1966. — 351 с.
6. Томашов Н. Д., Чернова Г. П. Теория коррозии и коррозионностойкие конструкционные сплавы. — М.: Металлургия, 1986. — 359 с.
7. Коррозия конструкционных материалов: Справочник / Под ред. В. В. Батракова. — В 2 кн. — М.: Металлургия, 1990. — Кн.1 — 344 с., Кн.2. — 320 с.
8. Blaszczuk V. E. Corrosion of zirconium alloy welding joints. — 1999. — 11. — 84 p. — (Welding and Surfacing Reviews).
9. Tubielewicz K., Blaszczuk W., Melechov R. Technologiczne właściwości cynku. — Czestochowa: Politechnika Czestochowska, 2001. — 83 S.
10. Равномерная и «нодульная» коррозия сплавов циркония в условиях эксплуатации / В. И. Перехожев, Л. П. Синельников, А. Н. Тимохин и др. // Металловед. и терм. обработка мет. — 2003. — № 10. — С. 26–31.
11. Григоренко Г. М., Помарин Ю. М., Орловский В. Ю. Кинетика взаимодействия азота с жидкими цирконием и титаном // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2001. — № 2. — С. 32–37.
12. Черняева Г. П., Стукалов А. И., Грицына В. М. Поведение кислорода в цирконии // ВАНТ. Тр. конференции: Проблемы циркония и гафния в атомной энергетике, 14–19 июня 1999 г., Алушта. — С. 94–99.
13. Власов Н. М., Федик И. И. Водородное охрупчивание сплавов циркония // Металловед. и терм. обработка мет. — 2003. — № 8. — С. 48–51.
14. Иванова С. В., Шиков А. К., Боцаров О. В. Наводороживание циркониевых изделий в процессе изготовления и эксплуатации — фактор, ограничивающий ресурс их работы в реакторах ВВЭР и РБМК // Там же. — 2003. — № 8. — С. 40–47.
15. Соловьев Ю. В., Булатов Г. С., Гедговд К. Н. Механические свойства и коррозионное растрескивание под напряжением циркониевых сплавов // Материаловедение. — 2000. — № 4. — С. 19–27.
16. Новые конструкционные материалы активных зон ядерных энергетических установок / М. И. Солонин, Ф. Р. Решетников, А. Г. Иолтуховский, А. В. Никулина // Физ. и хим. обраб. материалов. — 2001. — № 4. — С. 17–27.
17. Никулина А. В. Цирконийниобиевые сплавы для элементов активных зон реакторов с водой под давлением // Металловед. и терм. обработка мет. — 2003. — № 8. — С. 7–13.
18. Зеленский В. Ф. К истории становления и развития атомного материаловедения в Украине // Прогрессивные материалы и технологии. — Т. 1. — Киев: Академперіодика, 2003. — С. 382–419.
19. Гуревич С. М. Справочник по сварке цветных металлов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Киев: Наук. думка, 1990. — 512 с.
20. Welding of refractory metals / E. A. Asnis, A. B. Goncharov, M. M. Nerodenko, E. P. Polishchuk. — 1995. — 5. — 83 p. — (Welding and Surfacing Reviews).
21. Блащук В. Е., Шеленков Г. М., Трояновский В. Э. Сварка циркониевых сплавов Э110 и Э125 // Автомат. сварка. — 1997. — № 12. — С. 31–34.
22. American Welding Society, Welding Handbook / 8th Ed. — Miami, Florida: AWS, 1998. — Vol. 4. — 621 p.
23. Влияние условий защиты при сварке и качества подготовки поверхности на коррозионную стойкость сварных соединений циркония / М. И. Плышевский, Н. С. Рассошкина, А. Н. Семенов, В. Н. Тюрин // Свароч. пр-во. — 2001. — № 1. — С. 45–48.
24. О причинах образования дефектов в швах из сплава Э110, выполненных ЭЛС, и методы борьбы с ним / В. И. Васильков, А. А. Кислицкий, Н. В. Онучин и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 5. — С. 41–43.
25. Герметизация ТВЭлов для ядерных реакторов методом контактной стыковой сварки / Л. Т. Бабкин, К. К. Сухов, Д. В. Санников и др. // Свароч. пр-во. — 1999. — № 8. — С. 35–38.
26. Сварка трением труб из сплавов Zr–2,5 Nb / М. И. Плышевский, Н. С. Рассошкина, А. Н. Семенов, В. Н. Тюрин // Там же. — 2000. — № 1. — С. 9–12.
27. Блащук В. Е., Поляков С. Г. Коррозионное растрескивание сварных соединений циркониевого сплава Э125 // Автомат. сварка. — 1997. — № 4. — С. 30–33.

The paper describes the advantages of zirconium and its alloys compared to other structural materials, methods of their production and application in industry, as well as welding features. Applications of zirconium and its alloys, as well as prospects for their use are mentioned.

Поступила в редакцию 02.02.2005



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОЦЕССОВ ИМПУЛЬСНОЙ ДВУХДУГОВОЙ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ (Обзор)

Н. М. ВОРОПАЙ, д-р техн. наук, **В. М. ИЛЮШЕНКО**, канд. техн. наук, **В. А. МИШЕНКОВ**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Импульсная двухдуговая сварка отличается отдельной подачей импульсов тока на электрически изолированные плавящиеся электроды, дуги которых образуют общую сварочную ванну. В результате обеспечиваются относительно большой (до 30 кг/ч) коэффициент расплавления электродных проволок, высокая (до 120 м/ч) скорость сварки и благоприятное формирование стыковых и угловых швов. Показаны перспективы дальнейшего развития тандем-процессов дуговой сварки.

Ключевые слова: двухдуговая сварка, импульсы тока, синергетическое управление, защитные газы, источники питания, режимы сварки, формирование швов, свойства сварных соединений

С целью повышения производительности дуговых способов соединения используют многоэлектродную и многодуговую сварку под флюсом [1]. При первом способе сварки электроды подключены к одному источнику питания, при втором — каждый из электродов подсоединен к отдельному источнику питания и электроды электрически изолированы друг от друга. Многодуговая сварка под флюсом широко применяется для получения продольных швов на трубах повышенного диаметра [2–5]. Для улучшения формирования швов при дуговой сварке под флюсом с повышенной скоростью сварочные трансформаторы подключают по схеме, обеспечивающей сдвиг фаз дуговых токов на 120° [4]. Предпринимались попытки достичь стабильности процесса двухэлектродной сварки за счет защиты дуг углекислым газом и питания их от одного источника [6, 7]. Однако из-за электромагнитного взаимодействия между дугами и интенсивного разбрызгивания электродного металла такой способ сварки широкого распространения не получил.

В случае синергетического управления параметрами режимов импульсной двухдуговой сварки для любой скорости подачи электродной проволоки амплитуда и длительность импульсов тока и пауз, а также значения базового тока строго соответствуют скорости плавления электрода [8]. При этом имеет место мелкокапельный перенос электродного металла и минимальное его разбрызгивание. Для реализации этого процесса используют инверторные источники питания. Благодаря синергетическому управлению существенно сокращается время, необходимое для выбора оптимальных режимов сварки. Отметим, что параметры импульсов тока предварительно запрограммированы не только с учетом диаметра и марки проволоки, но и состава защитного газа.

В настоящей работе на основании обобщенных литературных данных и результатов собственных

исследований рассмотрены особенности и технологические возможности процессов импульсной двухдуговой сварки в защитных газах.

Схемы процессов двухэлектродной и двухдуговой сварки в инертных и активных газах и их смесях представлены на рис. 1. В первом случае (рис. 1, а) обе электродные проволоки соединены общим токоподводом и питаются от одного источника; а во втором (рис. 1, б) — электродные проволоки 1 и 2 имеют отдельный токоподвод и питаются от двух самостоятельных источников с устройством для синхронизации их работы. Основой импульсных двухдуговых процессов, разработанных в последние годы [9–15], являются универсальные инверторные источники питания, базирующиеся на микропроцессорном управлении параметрами импульсов тока и скоростью подачи электродных проволок; последние располагаются в общем газозащитном сопле.

В современном оборудовании для импульсной двухдуговой сварки предусмотрен прецизионный

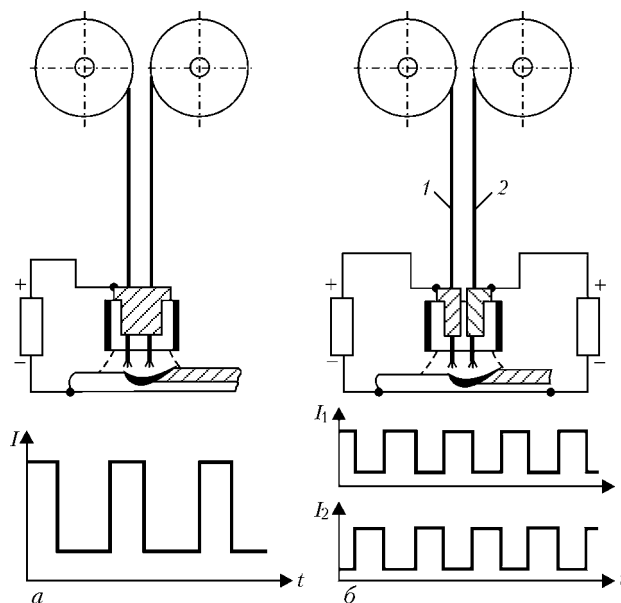


Рис. 1. Схема импульсных процессов сварки расщепленным электродом (а) и двумя дугами (б): 1, 2 — см. объяснения в тексте

принцип поджига обеих дуг [9–14]. Сначала импульс тока подают на один электрод. Возбуждение второй дуги происходит позже. При необходимости процесс сварки может начинаться двумя дугами, горящими одновременно. Такие же технологические возможности имеются и при прекращении сварки. Параметры режимов сварки с момента поджига дуг до окончания процесса непрерывно контролируют и записывают. Управление основными блоками оборудования производят по тридцати и более программам. Инверторные источники питания при двухдуговой сварке и продолжительности включения ПВ = 100 % обеспечивают номинальный сварочный ток до 1000 А. Скорость подачи электродных проволок достигает 800 м/ч.

Коэффициент расплавления электродных проволок $K_{р,э}$ при двухдуговой сварке под флюсом равен 20...23 кг/ч на токах 800...1000 А (рис. 2, область 1) [15]. В случае импульсной двухдуговой сварки в защитных газах он достигает 25 кг/ч и более при токах 800 А (рис. 2, область 2). Существенно меньшие значения коэффициентов расплавления электродных проволок сплошного сечения и порошковых имеют место при однодуговой сварке в защитных газах (рис. 2, области 3 и 4). Так, $K_{р,э}$ для проволоки сплошного сечения составляет 10...15 кг/ч при токах 300...500 А. При таком же значении $K_{р,э}$ для порошковых проволок требуется меньший сварочный ток [15].

За счет продольного расположения электродных проволок (рис. 3, а) уменьшается ширина швов и увеличивается глубина проплавления основного металла [14]. Противоположные результаты получены в случае поперечного расположения электродных проволок (рис. 3, в). При расположении электродных проволок под углом 45° к оси шва (рис. 3, б) получают швы средней ширины и глубины проплавления, кроме того, уменьшается вероятность образования прожогов в стыковых и нахлесточных соединениях.

Фирма «Клосс» (Германия) разработала горелку для сварки плавящимся электродом в инертном и активном газах двумя проволоками [16]. Сварочный ток подают от источника GLC 853 с компьютерной системой управления на импульсном и постоянном режимах (соответственно $I_{св} \leq 1500$ и $I_{св} \leq 850$ А). Скорость подачи обеих проволок регулируют отдельно. Скорость сварки металла толщиной 2...3 мм достигает 360 м/ч. На металле большей толщины при производительности расплавления 24 кг/ч возможно выполнение углового шва катетом 8 мм в один проход со скоростью 48 м/ч.

Система фирмы «Кука» (Германия) для дуговой роботизированной сварки в активном газе двумя электродными проволоками позволяет в 2 раза увеличить скорость сварки [17]. При этом одна из используемых проволок должна быть большего диаметра.

Эффективность дуговой сварки плавящимся электродом в инертном и активном газах авторы [18] связывают с использованием двух расщепленных электродных проволок. Их одновременное расплавление увеличивает производительность сва-

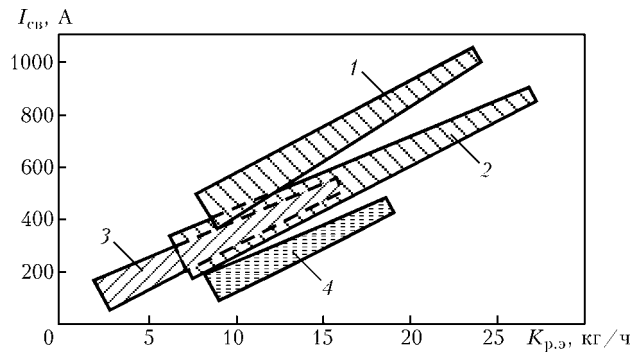


Рис. 2. Зависимости коэффициента расплавления электродных проволок $K_{р,э}$ от сварочного тока: 1, 2 — двухдуговая сварка под флюсом (1) и в защитных газах (2); 3, 4 — однодуговая сварка в защитных газах соответственно проволокой сплошного сечения и порошковой

рочного процесса в 2 раза. Однако при этом возникает ряд серьезных проблем. Если вместо двухэлектродной сварки применить двухдуговую от двух отдельных источников тока, то разбрызгивание металла уменьшается. Кроме того, при высокой скорости сварки можно улучшить внешний вид соединений. В качестве источников питания рекомендуют два инвертора TPS 450 (сварочный ток составляет 900 А при ПВ = 100 %).

Для импульсной двухдуговой сварки плавящимися электродами в защитных газах создана установка на базе источника питания ОИ-126, состоящая из сварочного трансформатора, тиристорного силового блока, блока управления, панелей переключения режимов работы и распределения импульсов тока [19]. Электрическая схема установки позволяет осуществлять отдельную подачу по заданной программе одно- и разнополярных импульсов тока на оба электрода и обеспечивает плавное нарастание и снижение сварочного тока. Подачу электродных проволок диаметром 1,2...2,0 мм выполняют с помощью отдельных приводов. По сравнению с традиционными тех-

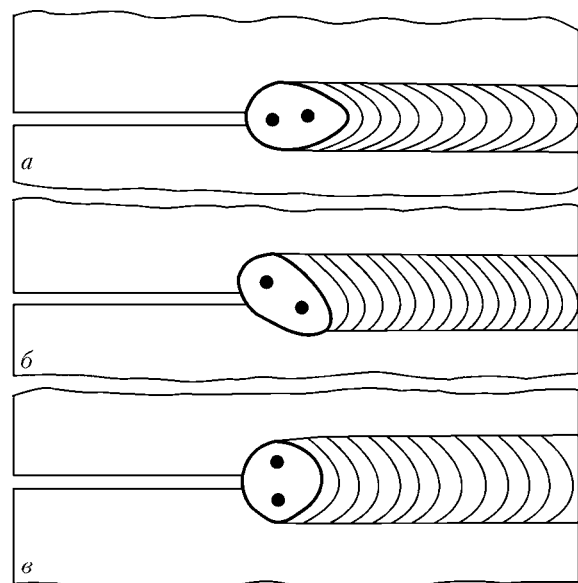


Рис. 3. Схема расположения электродных проволок при двухдуговой сварке: а — продольное; б — под углом 45°; в — поперечное



нологиями выявлены следующие преимущества рассматриваемого процесса сварки: полное исключение электромагнитного взаимодействия между дугами, образующими общую ванну; уменьшение ширины зоны термического влияния (ЗТВ); качественное формирование швов без технологических подкладок; повышение хладостойкости металла сварных соединений низколегированных сталей повышенной прочности.

Технологические особенности двухдуговой сварки алюминиевых сплавов плавящимися электродами с применением двух импульсных источников питания TPS 2700 и TPS 450 производства австрийской фирмы «Фрониус» описаны в работе [20]. Показано, что при одинаковом сварочном токе на каждом из электродов двухдуговая сварка алюминиевых сплавов по сравнению с обычной однодуговой позволяет повысить глубину проплавления металла и уменьшить высоту выпуклости шва. По мнению авторов, двухдуговую импульсную сварку следует применять с целью предотвращения прожогов тонколистового металла при скоростной автоматизированной однопроходной сварке стыковых и замковых соединений. Этот способ сварки приемлем также для выполнения тавровых и нахлесточных соединений, когда необходимо получить большие катеты швов и требуется глубокое проплавление металла.

Импульсная двухдуговая сварка алюминиевых сплавов имеет следующие технологические особенности [20]: расход защитного газа-аргона до 15 л/мин; диаметр электродных проволок 1,2 мм; расстояние между проволоками 8...10 мм; частота импульсов тока 45...200 Гц; их длительность 1...3 мс и амплитуда 380...520 А; скорость подачи проволоки 780 м/ч.

Для сварки и наплавки литейных алюминиевых сплавов используют одновременно проволоки двух разных марок — СвАК5 и Св-1201.

Трехдуговую сварку в защитных газах одним расщепленным вертикальным и одним наклонным электродами выполняли от двух отдельных источников питания (рис. 4). Такой процесс целесообразно применять при сварке стыковых швов для уменьшения глубины провара при выполнении первого слоя или наплавочных работ. Минимальное расстояние между дугами определяет длину и ши-

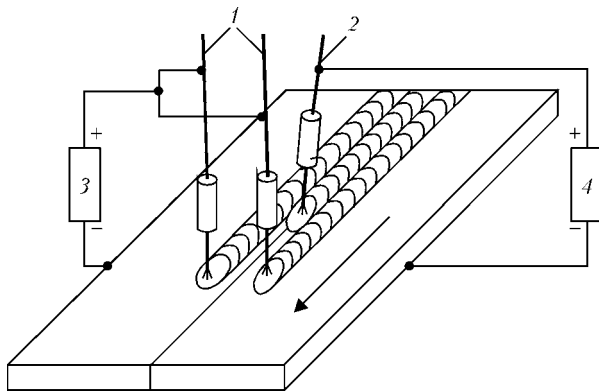


Рис. 4. Схема комбинированного процесса сварки в смеси газов $Ar + 20\% CO_2$ расщепленным (1) и наклонным (2) электродами от двух источников питания (3, 4)

рину сварочной ванны, а максимальное — качество формирования швов и наплавленного металла. Различают две разновидности трехдуговой сварки — в общую сварочную ванну и в отдельные ванны. В последнем случае соседняя дуга расплавляет уже закристаллизовавшийся слой, полученный с помощью предыдущей дуги.

Для повышения экономических показателей при строительстве нефте- и газопроводов в условиях севера Научно-техническим центром сварки Кренфильдского университета в Англии использована импульсная двухдуговая сварка плавящимся электродом в защитных газах [21]. Специалисты университета в качестве сварочного оборудования для данных целей выбрали систему, разработанную фирмой «Фрониус». Она включает источники питания TPS-4000R, устройства для подачи проволоки VR1500 и специальные сварочные программы. Сварочные источники обеспечиваются питанием от дизель-генератора. Каждая сварочная установка оснащена двумя горелками с дугами, последовательно расположенными и находящимися друг от друга на расстоянии 70 мм. Сварка с использованием двух пар дуг позволяет выполнять кольцевые швы на скорости до 20 м/ч, в частности, при строительстве Аляскинского трубопровода. Для осуществления традиционной технологии однодуговой сварки требовалось 19 сварочных станций. Для выполнения двухдуговой сварки с использованием оборудования фирмы «Фрониус» необходимо только четыре станции, что обеспечивает экономию в 150 млн дол. США.

Сущность комбинированного плазменно-дугового процесса, предложенного в работе [22], состоит в том, что при подключении дополнительной дуги между плазмой и плавящимся электродом происходит перераспределение тока от источника питания плавящегося электрода, в результате чего увеличивается ток в плавящемся электроде, уменьшается тепловложение в основной металл и происходит более интенсивное расплавление электродной проволоки. При наличии дежурной дуги повышается стабильность горения промежуточной дуги между плазмотроном и проволокой. Однако для указанного процесса характерны нестабильная скорость плавления электродной проволоки, повышенное разбрызгивание металла и неблагоприятное формирование швов.

Перечисленных недостатков лишен процесс точечной плазменно-дуговой сварки с отдельным регулированием проплавления изделия и заварки кратера [23]. Установлено [24], что оптимальные параметры режима сварки (сварочный ток, напряжение на дуге, расход плазмообразующего газа, время горения плазмы и дуги) должны быть заранее запрограммированы в зависимости от толщины свариваемого металла, диаметра электродной проволоки, расхода и типа защитного газа. Качественные нахлесточные соединения металла толщиной до 5 мм можно получить в результате сквозного проплавления верхнего листа плазмой и последующего сплавления его с нижним элементом за счет использования дуги с плавящимся электродом.

тродом. Длительность чередующихся импульсов тока плазмы и дуги составляет 3...12 с.

В Германии разработана специализированная установка PSW-500 для точечной плазменной и дуговой сварки без использования присадочной проволоки [25]. Установка имеет существенные преимущества по сравнению с оборудованием для контактной точечной и лазерной сварки — меньшая стоимость оборудования и возможность одностороннего подхода к свариваемому изделию. Точечные швы получают за счет расплавления верхнего и нижнего элементов нахлесточного соединения. Плазменная дуга расплавляет деталь чередующимися импульсами тока. Специальная фокусировка дуги позволяет уменьшить ширину ЗТВ. Установка пригодна для сварки углеродистых и легированных сталей, алюминия, меди и их сплавов толщиной до 2,5 мм. Сварку можно производить вручную, автоматами и роботами. Роботизированная установка с устройством для точечной плазменной сварки успешно применяется при серийном изготовлении металлоконструкций, состоящих из полых гнутых и штампованных элементов [26].

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан комбинированный способ двухдуговой сварки и наплавки, предусматривающий поочередное и раздельное формирование дуг при неплавящемся и плавящемся электродах с образованием общей ванны расплавленного металла [27]. Дугу с неплавящимся (вольфрамовым) электродом питают импульсами тока разной полярности с преобладанием составляющей прямой полярности. Роль дуги на неплавящемся электроде сводится к проплавлению основного металла на заданную глубину. Под действием импульсов тока обратной полярности происходит расплавление плавящегося электрода и катодная очистка поверхности металла от оксидных плен. Отработана технология импульсной двухдуговой наплавки поршней из алюминиевых сплавов различных систем легирования, применяемых в автомобильных и тракторных двигателях внутреннего сгорания [28]. Легирование наплавленного металла обеспечивает существенное увеличение его износостойкости. Моторесурс наплавленных поршней повышается в 2,0...2,5 раза в сравнении с неупрочненными поршнями.

Предложен также оригинальный способ микроплазменной сварки разнополярными импульсами тока [29]. Он заключается в том, что с целью катодного разрушения оксидных плен на свариваемом металле на сопло плазмотрона подают положительные относительно изделия импульсы напряжения. В промежутке между ними на вольфрамовый электрод поступают отрицательные импульсы, под действием которых между электродом и изделием формируется плазменная дуга прямой полярности. Плазмообразующий газ (аргон) подают в кольцевой зазор между вольфрамовым электродом и соплом; защитный газ (как правило, гелий) — в зазор между плазмообразующим и защитным соплом. Данный способ применяют при сварке алюминиевых сплавов малой толщины. Эффективной оказалась технология высокопроизвод-

ительной широкоослойной наплавки несколькими электродными проволоками и лентами [30].

Перечисленными примерами далеко не ограничиваются технологические возможности и сферы использования импульсной двухдуговой сварки. В перспективе следует ожидать новых разработок в области высокоэффективных тандем-процессов сварки и средств их реализации.

Выводы

1. Особенности процессов импульсной двухдуговой сварки плавящимися электродами в инертных газах и смесях газов определяются независимым и поочередным питанием дуг импульсами тока регулируемой амплитуды, длительности и частоты. Предусмотрена раздельная подача электродных проволок и горение дуг в общей сварочной ванне при продольном, наклонном либо поперечном расположении электродов.

2. Основой процессов импульсной двухдуговой сварки являются инверторные источники питания с синергетической системой управления параметрами режимов и двухэлектродной горелкой. Последнее позволяет плавно регулировать расстояние между осями токоподводящих мундштуков. Оптимальные режимы двухдуговой сварки заранее запрограммированы с учетом марки и диаметра электродной проволоки, расхода и состава защитного газа. Синергетическое управление в настоящее время реализовано только для импульсно-дуговой сварки плавящимися электродами в инертных газах и их смесях без коротких замыканий дугового промежутка.

3. Применительно к углеродистым и легированным сталям выявлены следующие технологические преимущества импульсной двухдуговой сварки: увеличение глубины проплавления основного металла; уменьшение ширины ЗТВ; улучшение формирования швов на больших скоростях; повышение механических свойств сварных соединений. Недостатком импульсной двухдуговой сварки в защитных газах является повышенная излучательная способность дуг, а также более высокая стоимость сварочного оборудования и значительные затраты на его эксплуатацию и ремонт.

1. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
2. *Мандельберг С. Л.* Многодуговая сварка на повышенных скоростях с колебанием электрода поперек шва // *Автомат. сварка.* — 1965. — № 2. — С. 8–13.
3. *Мандельберг С. Л.* Магнитное взаимодействие дуг при двухдуговой сварке с повышенной скоростью // *Там же.* — 1966. — № 4. — С. 30–36.
4. *Патон Б. Е., Мандельберг С. Л., Сидоренко Б. Г.* Некоторые особенности формирования швов при сварке с повышенной скоростью // *Там же.* — 1971. — № 8. — С. 1–6.
5. *Сидоренко Б. Г., Мандельберг С. Л.* Выбор оптимального числа электродов при многодуговой сварке с повышенной скоростью // *Там же.* — 1988. — № 2. — С. 53–55.
6. *Мандельберг С. Л., Богачек Ю. Л.* Двухдуговая сварка в углекислом газе // *Там же.* — 1968. — № 9. — С. 72–73.
7. *Файнберг Л. И., Рыбаков А. А., Мандельберг С. Л.* Двухдуговая сварка в углекислом газе с повышенной скоростью // *Там же.* — 1975. — № 2. — С. 35–38.
8. *Воропай Н. М., Илюшенко В. М., Ланкин Ю. Н.* Особенности импульсно-дуговой сварки с синергетическим уп-

- равлением параметрами режимов (Обзор) // Там же. — 1999. — № 6. — С. 26–32.
9. *TIME TWIN* — высокопроизводительный способ сварки // Там же. — 2003. — № 4. — С. 39–42.
 10. *Новый* технологический процесс фирмы «Фрониус» // Там же. — 1988. — № 2. — С. 69–70.
 11. *MIG/MAG* — Hochleistungsschweißen mit TANDEM Technik // Schweiss. und Prüftechnik. — 1996. — № 9. — С. 150.
 12. *Hackl H.* TIME TWIN — Schneller MSG — Schweißen mit zwei Drahtelektroden // Ibid. — 1997. — № 5. — С. 71–73.
 13. *Технологические* возможности процесса сварки алюминиевых сплавов встречными дугами / А. Я. Ищенко, Н. М. Воропай, В. П. Будник, В. А. Мищенко // Автомат. сварка. — 2000. — № 1. — С. 43–45.
 14. *Killing R.* Das MAG — Mehrdrahtschweißen // Praktiker. — 1997. — № 6. — С. 243–245.
 15. *Andersson I., Tolf I., Hedegard I.* Tandem MIG-MAG Vaxsig starkare // Svetsen. — 2004. — № 2. — P. 7–11.
 16. *Soldadura MIG/MAG con doble hilo* // Met. y elec. — 1996. — № 60, № 6. — P. 44–45.
 17. *Kuka two-wire MAG welding system doubles welding speeds* // Ind. Robot. — 1996. — № 23, № 6. — P. 42.
 18. *Bessere* Schweißqualität // Stahlmarkt. — 1997. — № 47, № 7. — S. 52.
 19. *Воропай Н. М., Проценко П. П.* Особенности формирования швов в ЗТВ при импульсной двухдуговой сварке в защитных газах низколегированных сталей повышенной прочности // Автомат. сварка. — 2000. — № 8. — С. 41–47.
 20. *Ищенко А. Я., Машиш В. С., Пащуля М. П.* Технологические особенности двухдуговой импульсной сварки плавящимися электродами алюминиевых сплавов // Там же. — 2005. — № 1. — С. 14–18.
 21. *Автоматизированная* сварка трубопроводов // Там же. — 2005. — № 1. — С. 52–56.
 22. *Zhang M., Jiang M., Lu W.* Double electrodes improve GMAW heat input control // Welding J. — 2004. — № 11. — P. 39–41.
 23. *Воропай Н. М.* Особенности процессов дуговой точечной сварки в защитных газах (Обзор) // Автомат. сварка. — 2004. — № 7. — С. 28–33.
 24. *Воропай Н. М., Илюшенко В. М., Мищенко В. А.* Комбинированный процесс точечной плазменно-дуговой сварки // Сварщик. — 2004. — № 4. — С. 26, 27, 29.
 25. *Plasmapunktschweißen* mit dem Plasma Spot Welder // Schweiss. und Schneid. — 2003. — № 5. — S. 224–225.
 26. *Plasmapunktschweißen* im Serieneinsatz // Ibid. — 2004. — № 12. — S. 642–643.
 27. *Воропай Н. М., Лесных В. В., Мищенко В. А.* Двухдуговая наплавка алюминиевых поршней комбинированным неплавящимся и плавящимся электродом // Автомат. сварка. — 1996. — № 6. — С. 21–25.
 28. *Воропай Н. М., Лесных В. В., Мищенко В. А.* Комбинированный процесс двухдуговой сварки и наплавки неплавящимся и плавящимся электродами // Там же. — 1994. — № 4. — С. 56–57.
 29. *Патон В. Е., Воропай Н. М., Гвоздецкий В. С.* Комплекс оборудования для механизированной микроплазменной сварки сотовых алюминиевых металлоконструкций // Там же. — 2002. — № 3. — С. 36–40.
 30. *Рябцев И. А.* Высокопроизводительная широкослойная наплавка электродными проволоками и лентами (Обзор) // Там же. — 2005. — № 6. — С. 36–40.

The paper deals with the features of gas-shielded pulsed twin-arc welding processes, which consist in separate feed of current pulses on electrically insulated electrode, the arcs of which form a common weld pool. These processes ensure a high coefficient of electrode wire melting, high welding speed, and favourable weld formation. The processes are based on inverter power sources with a synergic control of mode parameters. Longitudinal arrangement of electrode wires leads to narrower welds and deeper penetration. Opposite results have been achieved at transverse arrangement of electrode wires. Examples are given of practical application of different processes of gas-shielded pulsed twin-arc welding processes.

Поступила в редакцию 22.03.2005

ВЫСОКОПРОЧНАЯ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННАЯ СТАЛЬ ДЛЯ МОСТОВЫХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В течение ряда лет ИЭС им. Е. О. Патона, Украинский НИИ конструкционных материалов, ОАО «Азовсталь» совместно проводят работу по созданию новой стали для мостовых и других строительных металлоконструкций. С учетом возможности сырьевых ресурсов Украины разработанная безникелевая сталь должна была обеспечить отечественное мостостроение материалом высокой прочности, быть конкурентоспособной на мировом рынке, а также гарантировать показатели на уровне требований зарубежных стандартов.

Комплекс исследований по отработке оптимального химического состава стали позволил понизить в ней содержание углерода (не более 0,09%), ограничить содержание серы и фосфора (в сумме не более 0,03%) и компенсировать отсутствие никеля введением микродобавок карбидо- и нитридообразующих элементов.

В разработанной стали достигнуто сочетание высокой прочности и ударной вязкости, а также хорошей свариваемости за счет ограничения содержания углерода и серы, микролегирувания ниобием, ванадием и молибденом в оптимальном соотношении, модифицирующей обработки кальцийсодержащими реагентами, максимального фрагментирования структуры при термоулучшении или термической обработке.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
 Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
 Отд. № 48, Ковтуненко В. А.
 Тел./факс: (38044) 287 62 13, 529 06 07
 E-mail: paton48@paton.kiev.ua

ОСОБЕННОСТИ СБОРКИ И МНОГОПРОХОДНОЙ СВАРКИ КОЛЬЦЕВЫХ СТЫКОВ ТОЛСТОСТЕННЫХ ОБЕЧАЕК

И. А. ТАРАРЫЧКИН, канд. техн. наук (Восточноукр. нац. ун-т, г. Луганск)

Рассмотрены особенности образования систематических отклонений геометрии разделки кромок при наличии погрешностей сборки под сварку кольцевых стыков толстостенных обечаек. Компенсацию наблюдаемых по периметру стыка отклонений предлагается осуществлять путем программного изменения скорости подачи электродной проволоки в процессе многопроходной сварки. Установлены закономерности, в соответствии с которыми следует изменять скорость подачи проволоки для соединений различных типов.

Ключевые слова: автоматическая сварка, толстостенная обечайка, многопроходный шов, разделка кромок, погрешности сборки, дефекты, параметры режима, алгоритм заполнения разделки

При изготовлении химических аппаратов, теплообменников, парогенераторов возникает необходимость сварки кольцевых стыков толстостенных обечаек [1, 2]. В работе [3] отмечается, что при сварке крупногабаритных толстостенных стыков качество сварных соединений обуславливается точностью сборки изделий, а главным препятствием автоматизации многопроходной сварки толстого металла в условиях значительных колебаний по точности сборки и геометрических параметров разделки является отсутствие алгоритмов и программ заполнения разделки.

Точность сборки кольцевых стыков под сварку характеризуется углом φ , который образуют между собой их продольные оси (рис. 1). Наличие погрешностей сборки приводит к тому, что при сварке на режимах, не изменяемых в пределах одного оборота обечайки, в первую очередь будет заполнено сечение разделки с минимальной площадью. При этом противоположное сечение заполняется лишь частично. Например, для кольцевого стыка обечайки с толщиной стенки 120 мм (рис. 2) поле допуска сборочного зазора составляет 3 мм. Если в одном из сечений зазор отсутствует, а в противоположном составляет 3 мм, то изменение геометрии разделки кромок по периметру стыка приведет к тому, что после полного заполнения сечения с нулевым зазором в противоположном сечении уровень заполнения разделки составит 104,5 мм.

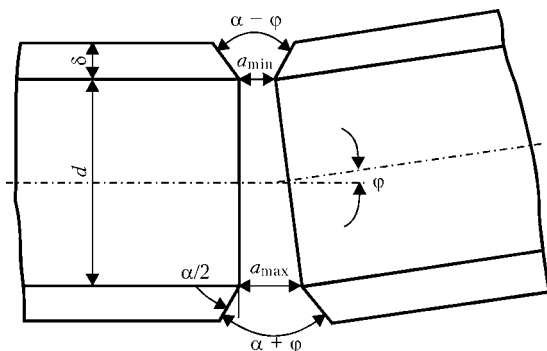


Рис. 1. Схема сборки под сварку кольцевого стыка обечайки

© И. А. Тарарычкин, 2005

Если высота отдельного слоя около 4 мм, то для заполнения оставшейся части разделки потребуется наплавить еще четыре слоя. Многократное прерывание и возобновление сварочного процесса в этом случае может сопровождаться образованием технологических дефектов в сварном шве.

Таким образом, обеспечение постоянного по периметру стыка уровня заполнения разделки, несмотря на наличие погрешностей сборки, является необходимым условием получения бездефектных кольцевых сварных соединений.

Постоянный уровень слоя в разделке можно обеспечить в том случае, если изменение площади наплавки отдельных валиков по периметру кольцевого стыка компенсирует наблюдаемое изменение площади поперечного сечения слоя. Такого рода схема заполнения разделки в дальнейшем рассматривается как компенсационная, а для ее реализации следует установить основные закономерности образования систематических отклонений геометрии разделки, возникающих при сборке и сварке кольцевых швов.

Целью настоящей работы является анализ особенностей образования систематических отклонений геометрии разделки кромок, обусловленных погрешностью сборки кольцевых стыков толстостенных обечаек, и разработка алгоритма их компенсации при автоматической многопроходной дуговой сварке.

Положение текущего поперечного сечения разделки кромок в процессе сварки можно характе-

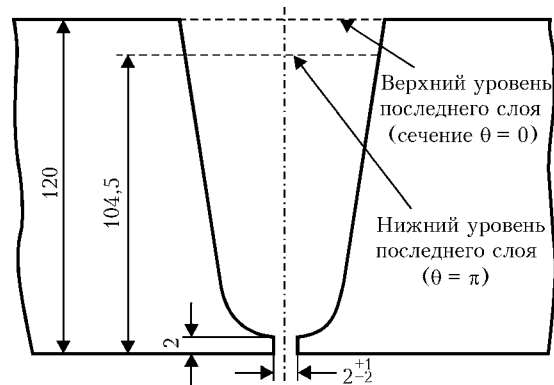


Рис. 2. Схема образования неравномерного по высоте разделки уровня слоя в результате погрешностей сборки



Таблица 1. Допускаемые значения характеристик геометрии разделки кромок для стыковых соединений различных типов

Тип соединения	δ , мм	a_{\max} , мм	a_{\min} , мм	Поле допуска для зазора в стыке, мм	$\alpha/2$, град
С 19, С 20	20...30	6,5	3,5	3	25 ± 3
С 34	40...60	2	0	2	10 ± 1
С 35	40...50	2	0	2	10 ± 2
С 36	До 60	3	1	2	13 ± 2
С 37	До 60	2	0	2	13 ± 2

Таблица 2. Допускаемые значения угла ϕ (град) для стыковых соединений различных типов

Тип соединения	d , м		
	0,5	1	2
С 19, С 20	0,34	0,17	0,09
С 34, С 35, С 36, С 37	0,23	0,11	0,06

ризовать углом θ , если за начало отсчета принять сечение, для которого сборочный зазор в стыке оказывается минимальным ($\theta = 0$). Тогда положение сечения с максимальной площадью разделки определяется как $\theta = \pi$.

Вращение обечайки, собранной под сварку, будет сопровождаться не только систематическим изменением сборочного зазора в стыке от a_{\min} до a_{\max} для сечений $\theta = 0$ и $\theta = \pi$, но и изменением угла раскрытия разделки в диапазоне от $\alpha - \phi$ до $\alpha + \phi$ (рис. 1). В табл. 1 приведены данные полей допусков для сборочных зазоров и углов раскрытия разделки кромок применительно к односторонним сварным соединениям в соответствии с требова-

ниями ГОСТ 8713-79. Для диапазона значений внутренних диаметров обечайки $d = 0,5 \dots 2$ м допускаемые значения угла ϕ приведены в табл. 2. Наибольшее значение угла $\phi/2$, приходящегося на одну кромку, составляет $0,17^\circ$, что характерно для соединений типа С 19, С 20 и оказывается пренебрежительно малым по сравнению с полем допуска на угол $\alpha/2 = 25 \pm 3^\circ$ (табл. 1).

Таким образом, изменение угла раскрытия разделки по периметру стыка в результате погрешностей сборки в дальнейшем можно не учитывать, а в качестве расчетной схемы, описывающей особенности изменения геометрии разделки при ее заполнении слоями постоянной высоты, можно использовать данные, приведенные на рис. 3. Изменение площади отдельного слоя по периметру разделки можно оценить, рассмотрев два противоположных сечения: $\theta = 0$ и $\theta = \pi$ (рис. 3). Если высота каждого слоя остается постоянной ($h = \text{const}$), то для k -го слоя отношение максимальной площади F_k^+ к минимальной F_k^- имеет вид

$$W_k = \frac{F_k^+}{F_k^-} = \frac{a_{\max} + h(2k-1)\text{tg} \frac{\alpha}{2}}{a_{\min} + h(2k-1)\text{tg} \frac{\alpha}{2}}$$

Как видно из табл. 3, для соединений типа С 19, С 20 наибольшее значение W_k достигает в первом слое ($W_1 = 1,57$). Это означает, что технологическое оборудование для сварки такого стыка должно обеспечивать возможность увеличения площади наплавки не менее чем на 60 %.

С помощью расчетной схемы, представленной на рис. 4, можно показать, что величина зазора в стыке при вращении обечайки изменяется по гармоническому закону

$$a(\theta) = a_{\min} + 0,5 (a_{\max} - a_{\min})(1 - \cos \theta).$$

Зависимость $W_k(\theta)$ для разделок различной формы позволяет установить закон изменения площади наплавки отдельных валиков при последовательном заполнении кольцевой разделки многопроходным швом. Для разделки кромок, представленной на рис. 3, это соотношение имеет вид

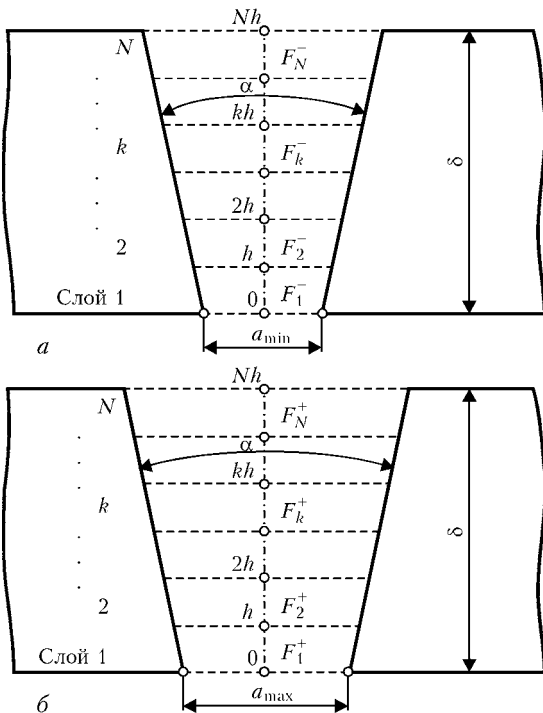


Рис. 3. Расчетная схема для определения соотношения площади слоя в различных поперечных сечениях разделки кромок: а — сечение $\theta = 0$; б — π

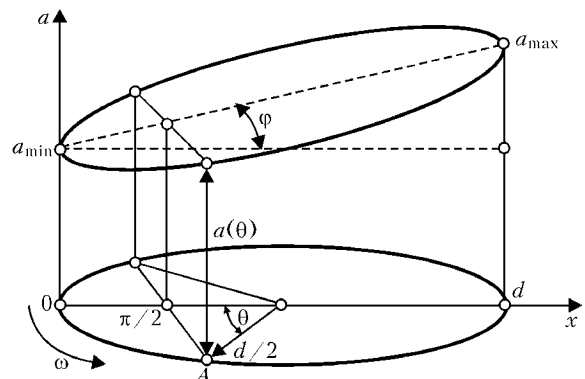


Рис. 4. Расчетная схема для определения текущего зазора в стыке $a(\theta)$ при повороте обечайки, собранной под сварку, на угол θ от начального положения

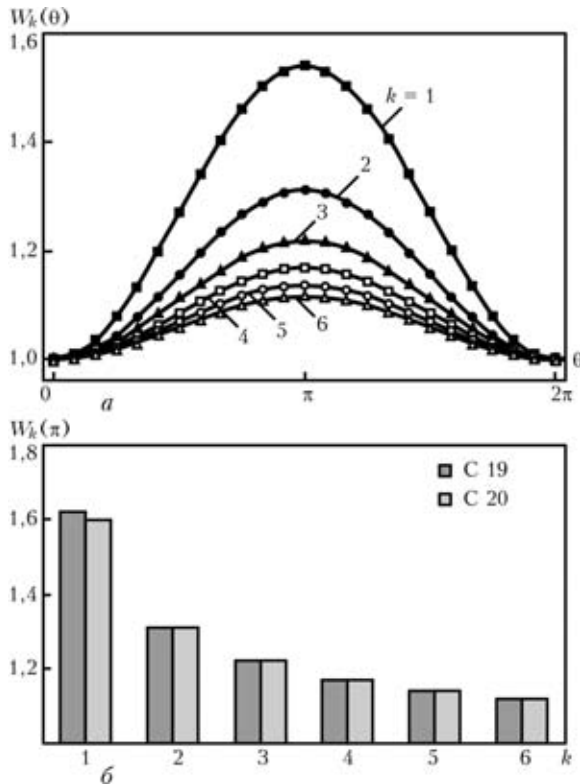


Рис. 5. Расчетные значения $W_k(\theta)$ для соединений типа С 19 (а) и зависимости $W_k(\pi)$ от номера слоя k для допустимых значений зазора в стыке $a_{\max} = 6,5$, $a_{\min} = 3,5$ мм (б)

$$W_k(\theta) = 1 + \frac{0,5(a_{\max} - a_{\min})(1 - \cos \theta)}{a_{\min} + h(2k - 1)\text{tg} \frac{\alpha}{2}}$$

Зависимость показывает, во сколько раз следует увеличить площадь наплавки отдельного валика, принадлежащего k -му слою, при повороте обечайки на угол θ по сравнению с начальным положением, для которого сборочный зазор в стыке минимален.

Рассмотрим соединение типа С 19 при толщине стенки обечайки $\delta = 28$ мм. Если принять количество выполняемых слоев $N = 6$, то высота отдельного слоя $h = 4,42$ мм (табл. 3). Как видно из рис. 5, в наибольшей степени варьировать площадь наплавки отдельных валиков следует при сварке первого слоя. По мере заполнения разделки (с увеличением значений k) разница в площадях наплавки для противоположных сечений $\theta = 0$ и

Таблица 3. Расчетные значения W_k для стыковых соединений с V-образной разделкой кромок для С 19, С 20

Номер слоя k	$N = 7, h = 3,79$ мм	$N = 6, h = 4,42$ мм	$N = 5, h = 5,3$ мм
1	1,57	1,54	1,50
2	1,34	1,31	1,28
3	1,24	1,22	1,19
4	1,19	1,17	1,14
5	1,16	1,14	1,12
6	1,13	1,12	—
7	1,11	—	—

Примечание. $a_{\min} = 3,5$; $a_{\max} = 6,5$ мм; $\delta = 28$ мм.

$\theta = \pi$ уменьшается, а значение $W_k(\pi)$ снижается от 1,54 для $k = 1$ до 1,12 для $k = 6$. Если учесть наличие притупления кромок и необходимость заполнения зазора присадочным металлом, то значение $W_1(\pi) = 1,62$ (для соединения С 19) и 1,60 (для С 20) (рис. 5, б).

При анализе комбинированной формы разделки кромок нижнюю и верхнюю части следует рассматривать отдельно. Если нижняя часть заполняется с помощью двух слоев, то зависимость имеет вид

$$W_k(\theta) = 1 + \frac{0,5(a_{\max} - a_{\min})(1 - \cos \theta)}{a_{\min} + \Omega_k}$$

Значения Ω_1 и Ω_2 (рис. 6) зависят только от формы нижней части разделки. При заполнении верхней части значения Ω_k ($k = 3, 4, \dots, N$) необходимо принимать в соответствии с данными табл. 4. Следует отметить, что параметр $W_k(\theta)$ изменяется по гармоническому закону для любой формы разделки кромок и номера слоя k . Так, если в результате выполнения контрольных операций для кольцевого стыка обечайки толщиной 48 мм, собранного под сварку (соединение С 35), установлены значения $a_{\min} = 0,2$ и $a_{\max} = 1,8$ мм, то для $k = 1, 2$ параметр $W_k(\theta)$ имеет вид

$$W_1(\theta) = 1 + 0,12(1 - \cos \theta),$$

$$W_2(\theta) = 1 + 0,05(1 - \cos \theta),$$

а для $k = 3, 4, \dots, N$

$$W_k(\theta) = 1 + \frac{0,8(1 - \cos \theta)}{16 + 0,18h(2k - 5)}$$

Как видно из рис. 7, независимо от формы разделки наиболее существенным образом корректировать параметры режима по периметру разделки необходимо при сварке первого слоя. При этом наибольшая вариация площади наплавки валиков первого слоя характерна для ступенчатой разделки (~80%), а наименьшая — для U-образной (~30%).

Изменение площади наплавки валика в процессе заполнения разделки возможно в результате совместного или отдельного изменения скорости сварки $v_{\text{св}}$ и скорости подачи электродной проволоки $v_{\text{п.п}}$. При этом между площадью наплавки валика f и параметрами режима сварки существует зависимость [3]:

Таблица 4. Значения Ω_k для верхней части комбинированной разделки кромок соединений различных типов

Тип соединения	δ , мм	Ω_k ($k = 3, 4, \dots, N$), мм
С36, С37	≤ 60	$16 + 0,23h(2k - 5)$
С34	≤ 40	$11,7 + 0,21h(2k - 5)$
	40...60	$15,8 + 0,18h(2k - 5)$
С35	≤ 40	$11,7 + 0,21h(2k - 5)$
	40...60	$15,8 + 0,18h(2k - 5)$

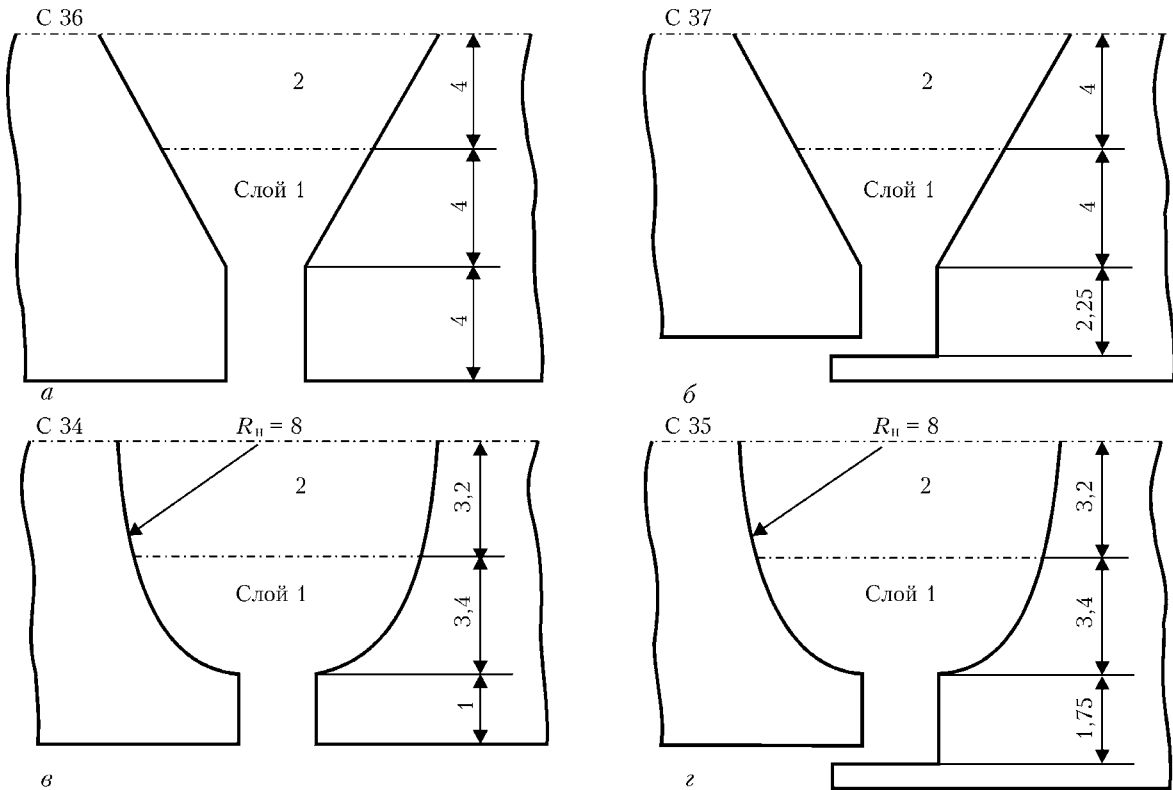


Рис. 6. Расчетные характеристики нижней части комбинированных разделок для различных типов соединения: а – $a_{\max} = 3$ мм; $a_{\min} = 1$ мм; $\Omega_1 = 2$ мм; $\Omega_2 = 12$ мм; $W_1(\pi) = 1,67$; $W_2(\pi) = 1,15$; б – $a_{\max} = 2$ мм; $a_{\min} = 0$ мм; $\Omega_1 = 2,56$ мм; $\Omega_2 = 12$ мм; $W_1(\pi) = 1,78$; $W_2(\pi) = 1,17$; в – $a_{\max} = 2$ мм; $a_{\min} = 0$ мм; $\Omega_1 = 7,27$ мм; $\Omega_2 = 14,7$ мм; $W_1(\pi) = 1,28$; $W_2(\pi) = 1,14$; з – $a_{\max} = 2$ мм; $a_{\min} = 0$ мм; $\Omega_1 = 6,21$ мм; $\Omega_2 = 14,7$ мм; $W_1(\pi) = 1,32$; $W_2(\pi) = 1,14$

$$f = \frac{\pi d_3^2}{4} \frac{v_{\text{п.п}}}{v_{\text{св}}} (1 - \Psi_L),$$

где d_3 – диаметр электродной проволоки; Ψ_L – коэффициент потерь электродного металла.

Поскольку при сварке кольцевых стыков угловая скорость вращения обечайки остается постоянной ($\omega = \text{const}$), постепенное вертикальное перемещение горелки от слоя к слою сопровождается увеличением скорости сварки. Так, при сварке обечайки с внутренним диаметром 1 м и тол-

щиной стенки 100 мм скорость сварки при переходе от первого слоя к последнему увеличится примерно на 12 %. Поэтому закон изменения скорости подачи электродной проволоки должен быть связан не только с изменением геометрии разделки кромок в пределах одного слоя, но и с наблюдаемым систематическим изменением скорости сварки при переходе от слоя к слою.

Скорость сварки при выполнении первого слоя кольцевого шва $v_1 = 0,5\omega d$, а k -го слоя

Таблица 5. Расчетные значения коэффициента Λ_k для обечайек диаметром 0,5 и 2 м с различной толщиной стенки

Номер слоя k	С 19, С 20 $N = 6, \delta = 28$ мм, $h = 4,42$ мм		С 36 $N = 12, \delta = 58$ мм, $h = 4,6$ мм		С 37 $N = 12, \delta = 58$ мм, $h = 4,85$ мм		С 34 $N = 12, \delta = 58$ мм, $h = 5,04$ мм	
	d , мм							
	0,5	2	0,5	2	0,5	2	0,5	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1,04	1,01	1,05	1,01	1,04	1,01	1,03	1,01
3	1,06	1,02	1,07	1,02	1,06	1,01	1,05	1,01
4	1,08	1,02	1,09	1,02	1,08	1,02	1,07	1,02
5	1,10	1,02	1,1	1,03	1,10	1,02	1,09	1,02
6	1,11	1,03	1,12	1,03	1,11	1,03	1,11	1,03
7	–	–	1,14	1,04	1,14	1,03	1,13	1,03
8	–	–	1,16	1,04	1,15	1,04	1,15	1,04
9	–	–	1,18	1,04	1,17	1,04	1,17	1,04
10	–	–	1,20	1,05	1,19	1,05	1,19	1,05
11	–	–	1,21	1,05	1,21	1,05	1,21	1,05
12	–	–	1,23	1,06	1,23	1,06	1,23	1,06

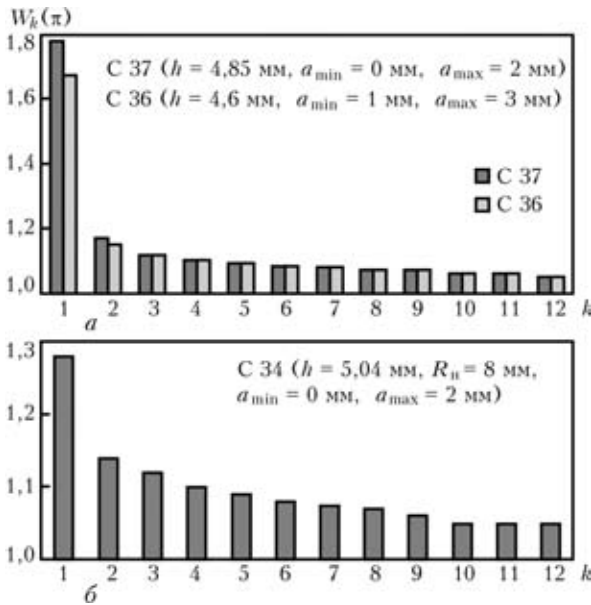


Рис. 7. Зависимость $W_k(\pi)$ от номера слоя ($N = 12$, $\delta = 58$ мм) для ступенчатой (а) и U-образной разделки (б)

$$v_k = \omega[0,5d + \delta - h(N - k)] \quad (k = 2, 3, \dots, N),$$

или

$$v_k = v_1 \Lambda_k,$$

где

$$\Lambda_k = 1 + \frac{\delta - h(N - k)}{0,5d}.$$

Соответственно для $k = 1$ принимаем $\Lambda_1 = 1$.

Коэффициент Λ_1 показывает, во сколько раз возрастет скорость сварки при выполнении k -го слоя по сравнению с первым, если в верхней части разделки все слои имеют высоту h . Как видно из табл. 5, увеличение скорости сварки в некоторых случаях может превышать 20 %.

Площадь валика, наплавляемого в k -м слое:

$$f_k = \frac{\pi d_{\vartheta}^2}{4} (1 - \psi_L) \frac{v_{п.п}}{v_1 \Lambda_k}.$$

Закон изменения скорости подачи электродной проволоки в процессе заполнения разделки имеет вид

$$v_{п.п}(k, \theta) = \frac{4f_1 v_1}{\pi d_{\vartheta}^2 (1 - \psi_L)} \vartheta_k \Lambda_k W_k(\theta),$$

где f_1 — площадь наплавки валика в начальном сечении первого слоя; $\vartheta_k = f_k / f_1$ — характеристика начального сечения разделки, показывающая во сколько раз площадь валика, наплавленного в k -м слое, больше чем в первом.

Таким образом, при многопроходной сварке кольцевых стыков толстостенных обечаек оптимальной является стратегия заполнения разделки слоями постоянной высоты с параметрами режима, изменяемыми в пределах каждого слоя по гармоническому закону.

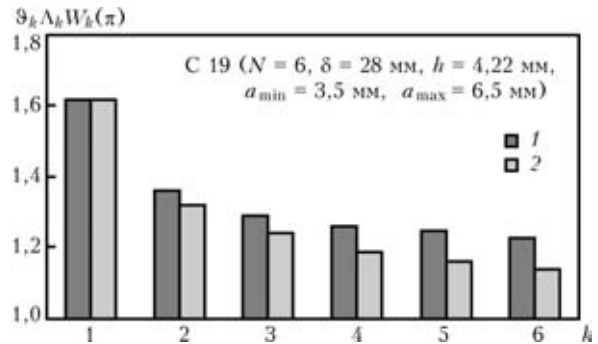


Рис. 8. Зависимость произведения $\vartheta_k \Lambda_k W_k(\pi)$ от номера слоя k для обечаек диаметром 0,5 (1) и 2 (2) м

Произведение $\vartheta_k \Lambda_k W_k(\pi)$ показывает во сколько раз следует увеличить скорость подачи электродной проволоки в сечении с максимальным сборочным зазором $\theta = \pi$ при выполнении k -го слоя по сравнению с начальным сечением первого слоя ($\theta = 0$, $k = 1$).

На рис. 8 приведены расчетные зависимости произведения $\vartheta_k \Lambda_k W_k(\pi)$ от номера слоя k для обечаек диаметром 0,5 и 2 м с односторонней V-образной разделкой кромок, заполнение которой производится слоями постоянной высоты, а все валики в начальном сечении имеют неизменную площадь наплавки ($\vartheta_k = 1$). Принятые значения максимального и минимального зазора в стыке соответствуют предельно допускаемым для соединения типа С 19 (см. табл. 1).

Поскольку увеличение скорости сварки для обечайки толщиной 28 мм не превышает 11 % (табл. 6), а все валики в начальном сечении имеют одну и ту же площадь, то установленный закон изменения скорости подачи проволоки позволяет

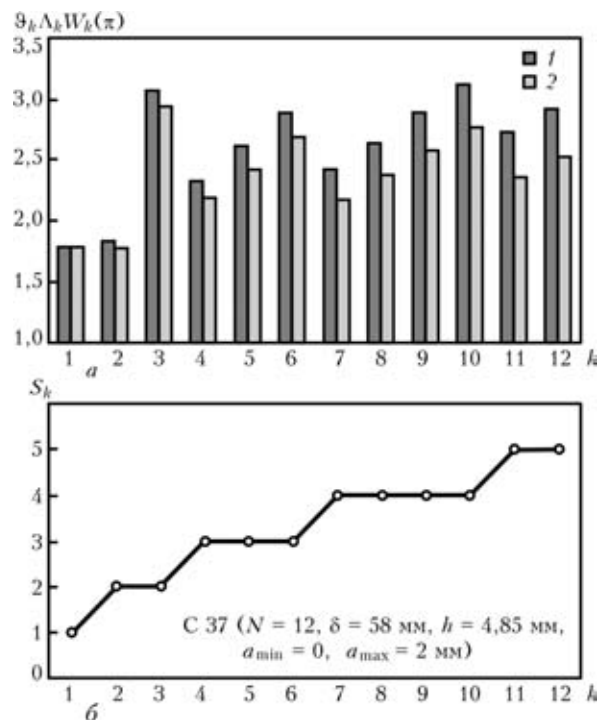


Рис. 9. Зависимость произведения $\vartheta_k \Lambda_k W_k(\pi)$ от номера слоя для обечаек диаметром 0,5 (1) и 2 (2) м (а) и соответствующая $S_k - k$ диаграмма, описывающая схему заполнения разделки кромок (б)



Таблица 6. Расчетные значения параметров процесса многопроходной сварки (соединение типа С 37, $v_i = 6$ мм/с, $d_0 = 3$ мм, $(1 - \psi_L) = 0,98$, $\delta = 0,5$ м, $N = 12$, $\delta = 58$ мм, $h = 4,85$ мм, $a_{\min} = 0,6$ мм, $a_{\max} = 1,8$ мм)

Номер слоя k	Количество валиков в k -м слое, S_k	Площадь валика в k -м слое начального сечения f_k , мм ²	$\frac{4f_i v_i \vartheta_k \Lambda_k}{\pi d_0^2 (1 - \psi_L)}$, мм/с	Закон изменения скорости подачи электродной проволоки $v_{п.п}(k, \theta)$, мм/с	Максимальная скорость подачи проволоки в k -м слое $v_{п.п}(k, \pi)$, мм/с
1	1	19,75	17,1	$20,35 - 3,25 \cos \theta$	23,60
2	2	25,2	22,74	$23,88 - 1,14 \cos \theta$	25,02
3	3	28,6	26,33	$27,23 - 0,9 \cos \theta$	28,13
4	3	32,2	30,09	$30,99 - 0,9 \cos \theta$	31,89
5	3	35,9	34,20	$35,12 - 0,92 \cos \theta$	36,04
6	4	29,6	28,56	$29,27 - 0,71 \cos \theta$	30,00
7	4	32,3	31,81	$32,51 - 0,7 \cos \theta$	33,21
8	4	35	34,88	$35,61 - 0,73 \cos \theta$	36,34
9	5	30,17	30,61	$31,19 - 0,58 \cos \theta$	31,77
10	5	32,33	33,35	$33,95 - 0,6 \cos \theta$	34,55
11	5	34,5	36,25	$36,87 - 0,62 \cos \theta$	37,49
12	6	30,6	32,66	$33,18 - 0,52 \cos \theta$	33,70

в основном компенсировать наблюдаемое изменение площади сечения отдельного слоя по периметру разделки. Однако принятая для этого случая схема раскладки валиков имеет ряд существенных недостатков, связанных со сложностью обеспечения качества сварных соединений. Более предпочтительным следует считать вариант заполнения разделки, при котором площадь поперечного сечения отдельных валиков f_k для начального сечения остается неизменной только в пределах одного слоя.

Зависимость произведения $\vartheta_k \Lambda_k W_k(\pi)$ от номера слоя k для обечаек диаметром 0,5 и 2 м с толщиной стенки $\delta = 58$ мм приведена на рис. 9, а. Схема раскладки валиков соответствует данным рис. 9, б, где S_k — количество валиков в k -м слое с площадью наплавки $f_k = F_k^- / S_k$. При этом в пределах отдельного слоя для начального сечения принимается $f_k = \text{const}$. Видно, что принятая схема заполнения разделки связана с необходимостью увеличения скорости подачи электродной проволоки в процессе заполнения разделки более чем в 3 раза.

Задача выбора оптимальной схемы заполнения разделки кромок не имеет однозначного решения [3], поэтому в зависимости от конкретных условий сборки разделка может быть заполнена с использованием различных схем. При этом требуемый диапазон изменения скорости подачи электродной проволоки должен быть обеспечен имеющимся технологическим оборудованием. Например, если после сборки под сварку обечайки диаметром 0,5 м по результатам контрольных операций для сое-

динения С 37 установлены значения зазора в стыке: $a_{\min} = 0,6$ и $a_{\max} = 1,8$ мм, то они в соответствии с ГОСТ 8713-79 рассматриваются как допусковые (см. табл. 1).

Процесс сварки следует начинать, установив обечайку в положение, при котором дуга зажигается в начальном сечении с минимальным зазором $\theta = 0$. Результаты расчетов и рекомендуемая схема заполнения разделки для этого случая приведены в табл. 6, где указан также алгоритм, в соответствии с которым следует изменять скорость подачи электродной проволоки при сварке. Кроме того, для принятой схемы заполнения разделки можно указать максимальную и минимальную скорость подачи электродной проволоки ($v_{п.п \min} = 17,1$, $v_{п.п \max} = 37,49$ мм/с) и тем самым установить требования к используемому сварочному оборудованию.

Таким образом, предложенные расчетные зависимости позволяют на основе компенсационного подхода решать задачу обеспечения качества кольцевых швов толстостенных обечаек путем предварительного выбора схемы раскладки валиков и программного изменения параметров режима в процессе многопроходной сварки.

1. Панков В. В., Чернышев Г. Г., Козлов Н. Е. Математическая модель оптимизации многослойной сварки под флюсом корпусного оборудования энергетических установок // Свароч. пр-во. — 1987. — № 7. — С. 34-37.
2. Куркин С. А., Ховов В. М., Рыбачук А. М. Технология, механизация и автоматизация производства сварных конструкций: Атлас. — М.: Машиностроение, 1989. — 328 с.
3. Березовский Б. М. Математические модели дуговой сварки: В 3 т. — Т. 2. Математическое моделирование и оптимизация формирования различных типов сварных швов. — Челябинск: ЮУрГУ, 2003. — 601 с.

Considered are the features of development of systematic deviations of edge geometry in the presence of errors of assembly for welding of circumferential butt joints of thick-walled shells. It is proposed to compensate for deviations observed around the butt perimeter by a programmed change of the electrode wire feed rate in multipass welding. Regularities of variation of the wire feed rate for different types of joints are established.

Поступила в редакцию 24.02.2005

СВЕТОЛУЧЕВАЯ СВАРКА И ПАЙКА (Обзор)

А. М. ЖАДКЕВИЧ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведен ретроспективный анализ развития метода светолучевого нагрева. Подчеркивается ведущая роль российских ученых в становлении этого направления. Отмечается, что метод светолучевого нагрева пригоден для сварки и пайки разнообразных материалов, а также термической обработки изделий. Изложены преимущества сварки с использованием светового луча по сравнению с дуговой сваркой.

Ключевые слова: световой луч, светолучевой нагрев, сварка, пайка, термообработка

Светолучевые технологии находят все большее применение в промышленности, в частности, для плавки и соединения металлов, а в последние годы — для получения материалов с наноструктурой. В данной работе дано ретроспективное освещение разработки технологий и применения светового луча в процессах сварки и пайки [1]. В становлении этого направления ведущая роль принадлежит Московскому авиационному технологическому институту (МАТИ) им. К. Э. Циолковского. Еще в 1967–1968 гг. Г. Д. Никифоровым и М. И. Опариним были начаты исследования по оценке возможности и эффективности применения в технологических целях (сварка, пайка, термическая обработка) сфокусированной энергии светового луча некогерентных источников света [2, 3]. Возможность разработки источников энергии (светолучевых модулей) и оптимизацию их технологического применения исследовали с помощью электронно-лучевой и лазерной сварки. В последующие годы указанными авторами был опубликован ряд работ [4–7], посвященных оптимизации параметров процесса и технологического применения светолучевого нагрева.

В 1968 г. под руководством М. А. Опарина была спроектирована, а в РПО «Электромеханика» (Ржев) изготовлена первая установка для сварки и пайки лучистой энергией УСПЛЭ-1-МАТИ. Установка состояла из дуговой ксеноновой лампы мощностью 3... 10 кВт (производитель — Московский электроламповый завод), которая использовалась в качестве источника света эллипсоидного стеклянного алюминированного отражателя, контролражателя и двухлинзового кварцевого объектива для дополнительной фокусировки светового излучения [2, 4, 5].

Студенческое конструкторско-технологическое бюро, организованное на кафедре под руководством М. И. Опарина, занималось вопросами проектирования технологической оснастки, проведением исследований энергетических параметров светового луча и экспериментов по сварке и пайке различных конструкционных материалов. Особый упор был сделан на разработку различных вариантов технологических установок [4, 6, 8].

В 1970 г. сотрудником МАТИ С. А. Федоровым при участии РПО «Электромеханика» была разработана экспериментальная установка УСПЛЭ-

7-МАТИ с семью оптическими фокусирующими системами и дуговыми ксеноновыми лампами мощностью 0,5 и 1 кВт для создания сложных схем нагрева и моделирования различных тепловых процессов, а в 1976 г. — малогабаритная установка «Фотон-1» для пайки электромонтажных соединений.

Проведенные исследования показали, что световой луч является перспективным концентрированным источником тепла и имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными: возможность нагрева материалов независимо от их электрических и магнитных свойств; бесконтактный способ подвода энергии к изделию непосредственно или через оптически прозрачные среды и оболочки (что позволяет осуществлять нагрев в контролируемой газовой среде и вакууме); возможность достижения сравнительно простыми средствами достаточно высокой плотности энергии — $1 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^4$ Вт/см² (у электрической дуги и лазера эти показатели достигают соответственно $1 \cdot 10^5$ и $1 \cdot 10^8$ Вт/см²) и пятен нагрева требуемой формы и размеров; высокую управляемость ввода энергии в изделие; дешевизну оборудования по сравнению с лазерным; незначительное механическое воздействие на нагреваемый объект; возможность простыми средствами механизировать и автоматизировать технологический процесс. Спектр излучения светового луча (0,2...2,4 мкм) находится в таком же диапазоне, что и рубинового ($\lambda = 0,69$ мкм) и неодимового ($\lambda = 1,06$ мкм) лазеров. Данное излучение эффективнее для нагрева металлов, чем инфракрасное, так как коротковолновая часть спектра лучше поглощается металлами. Световой луч сочетает локальность лазерного нагрева с возможностью проведения групповой пайки, как при инфракрасном нагреве [4, 9].

Рабочие параметры светового источника (эффективная мощность, КПД, погонная энергия, температура нагрева) зависят от оптических и теплофизических свойств нагреваемого материала, например, коэффициента поглощения и конфигурации изделий [3], причем коэффициент поглощения материалов может изменяться с повышением температуры (например, при нагреве меди изменяется, а алюминия — нет) [10], оказывая в итоге существенное влияние на тепловые и энергетические характеристики. Поэтому для управления процессом нагрева световым лучом необходимо ис-



пользовать в совокупности все факторы, обеспечивающие требуемый характер распределения температуры на изделии.

Накопленные результаты позволили перейти в 1970–1980 гг. от разработок лабораторных вариантов установок к созданию образцов промышленного оборудования для решения конкретных технологических задач. При активном участии сотрудников МАТИ разработана серия производственных технологических установок (УПСЛ-1, УСС-1, «Свет» и др.) и начата работа над специализированными короткофокусными стеклянными алюминированными отражателями и дуговыми ксеноновыми лампами с малым межэлектродным промежутком, позволившими повысить эффективность использования фокусирующих оптических систем. Разработаны методики и средства юстировки оптических систем, аппаратура для исследования и контроля энергетических параметров режима, приборы для определения поглощательной способности материалов, различная технологическая оснастка, средства защиты и наблюдения за объектом обработки, проработаны технологические особенности процессов сварки и пайки, нормативно-технические материалы, устанавливающие правила оформления технологической документации. Кафедра сварки МАТИ стала ведущей в разработке светолучевых технологий. Результаты исследований и разработок нашли отражение в кандидатских диссертациях М. И. Опарина (1971 г.) и С. А. Федорова (1976 г.) и обобщены в учебном пособии [4].

Работы МАТИ в области светолучевой технологии в последующем получили дальнейшее развитие. Появились публикации по пайке высокотемпературными паяльниками с кварцевыми галогенными лампами накаливания, пайке элементов радиоэлектронной аппаратуры на механизированных установках, сварке алюминиевых сплавов лучистой энергией в вакууме под флюсом и др.

В начале 1980-х годов развитие светолучевого оборудования пошло по пути повышения выходных энергетических параметров светового луча. Использование специализированных металлических отражателей, изготовляемых на токарных автоматах с ЧПУ, и переход на импульсный режим питания ламп позволили увеличить плотность лучистого потока до 12 кВт/см^2 .

Разработаны специальные фокусирующие комбинированные сфероэллипсоидные оптические системы для пайки и термической обработки, позволяющие трансформировать лучистый поток из нормально распределенного в кольцевой и даже расщепленный на два и более лучей.

Созданы компьютерные программы расчета геометрических параметров отражателей под конкретные биологические задачи, что позволило реализовать на практике принцип модульности при разработке светолучевого оборудования. Модули лучистого нагрева с ксеноновыми лампами мощностью $0,12 \dots 10 \text{ кВт}$ использовали в различных технологических установках. Проектные работы завершились изготовлением в 1991 г. совместно с РПО «Электромеханика» серийного варианта

многоцелевой установки УСТСЛ-1 с программным управлением.

В кандидатских диссертациях В. С. Мамаева (1985 г.), Н. С. Пронина, В. А. Фролова (1990 г.), Н. А. Коробко (1992 г.) были собраны и систематизированы научные результаты, уточнены области эффективного использования светового луча и классифицированы технологические процессы светолучевой тепловой обработки материалов по трем группам [3, 11, 12].

К первой группе относятся процессы сварки металлических листовых корпусных и оболочковых конструкций толщиной $0,1 \dots 2,0 \text{ мм}$ из углеродистых и легированных сталей, титановых, никелевых и алюминиевых сплавов и герметизации корпусов электровакуумных приборов в различных контролируемых газовых средах, сварки стеклокерамики и пластмасс. Ко второй группе причисляют процессы низкотемпературной пайки микроэлементов на печатные платы, штепсельных разъемов, монтажных проводов с наконечниками в радиоэлектронике и процессы высокотемпературной пайки узлов волноводных трактов, электрических контактов силовой электроаппаратуры, обмоток статоров электрических машин. К третьей группе относятся процессы локальной термической обработки сварных соединений, термоправки и термоупрочнения изделий.

Технологические аспекты светолучевой сварки и пайки различных материалов нашли отражение в многочисленных публикациях [13–36]. Они позволяют заключить, что сфокусированным световым лучом можно сваривать тонколистовые конструкции с толщиной стенки $0,1 \dots 2,5 \text{ мм}$ из низкоуглеродистых и высоколегированных сталей, алюминиевых, никелевых и титановых сплавов [14, 16, 21, 22], термопластмасс и стеклокерамики, заваривать дефекты и герметизировать корпусные детали. Такой перечень задач можно решать, например, с помощью комплекта светолучевого оборудования в составе роботизированного комплекса (рис. 1). Так, при сварке титановых сплавов ВТ5-1, ОТ4-2 и ВТ20 толщиной $1,5 \dots 2,5 \text{ мм}$ мощность луча составляла $1,1 \dots 1,2 \text{ кВт}$ на 1 мм толщины материала при скорости сварки $9 \dots 10 \text{ м/ч}$. Установлено, что даже при местной защите зоны сварки световой луч позволяет получить соединения с более высокой прочностью и стойкостью к циклическим нагрузкам и уменьшенной пористостью металла шва по сравнению с дуговой сваркой. При сварке низкоуглеродистых сталей дополнительную защиту зоны соединения можно вообще не применять.

Широкие пределы регулирования энергетических параметров (плотность лучевого потока в фокальном пятне может изменяться от 0 до 2200 Вт/см^2), а также форма и размеры пятна нагрева дают возможность применять нагрев световым лучом при пайке [18, 20, 27, 35]. Процесс такой пайки характеризуется следующими особенностями: локальностью нагрева мест соединений под пайку с большим градиентом температуры; возможностью применения практически любых припоев, начиная от легкоплавких оловянно-свинцовых и кончая ту-



Рис. 1. Комплект светолучевого оборудования для сварочного роботизированного комплекса

гоплавкими на основе никеля и титана [25, 27, 30, 32–34]; уменьшением вероятности образования хрупких интерметаллидных прослоек в связи с кратковременностью нагрева. Благодаря идеальной чистоте процесса нагрева при пайке в контролируемых газовых средах и вакууме обеспечивается высокое качество соединений.

Светолучевое оборудование и технологии МАТИ были внедрены на различных предприятиях: заводе «Радиоприбор» (Владивосток), ПППО (Пермь), КЭМЗ (Ковылкино), НИИ «Волна», НИТИ (Саратов), КЭМПО им. Лепсе (Вятка), ПО «Теплообменник» и ГАЗ (Н. Новгород), РПКБ (Раменское, Моск. обл.), НПО «Зенит» (Зеленоград, Моск. обл.), ИОВНИИЭМ (Истра, Моск. обл.), МАЗ «Дзержинец», ВНИИРТ, «Прожектор» и др.

В 1980-е годы в МАТИ параллельно с внедрением оборудования и технологии на кафедре были успешно защищены кандидатские диссертации В. С. Кудрявцевым (1984 г.), В. Ф. Савичевым (1988 г.), В. Б. Редчицем (1989 г.) и др. Предложенные сотрудниками кафедры технические решения и технологические разработки были защищены более чем 60 авторскими свидетельствами, а результаты исследований опубликованы в более чем 120 научных трудах [19–24, 27–32]. Обобщение работ по сварке световым лучом нашло отражение в докторской диссертации В. А. Фролова (1998 г.).

За пределами бывшего СССР (Японии, ФРГ, США и др.) светолучевой нагрев начал развиваться позднее и для решения конкретных технологических задач. В научном плане исследования за рубежом не принесли новых результатов, хотя и были проведены на современном, более высоком уровне. М. Такаджи и Т. Ямад и (Япония) создали светолучевую установку для низкотемпературной пайки, используемую в электронике, которая базируется на излучении ксеноновой лампы с гиб-

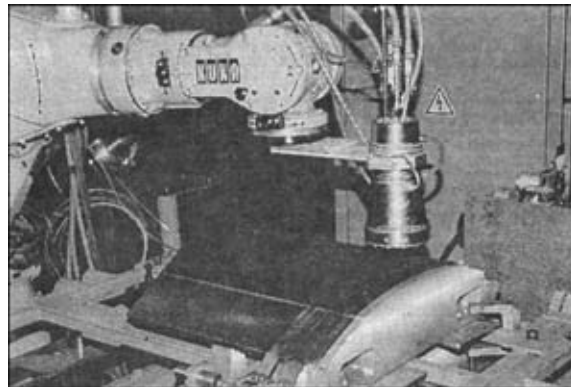


Рис. 2. Светолучевое оборудование для сварки и пайки

ким оптическим кабелем, что, естественно, значительно расширяет технологические возможности процесса. Она успешно конкурирует на рынке с установками с лазерным нагревом аналогичного назначения [37]. Чешской фирмой «SVAR spol s.r.o.» при участии ряда российских организаций (АО НИИТавтопром, НПФ МГМ и др.) был создан универсальный комплекс светолучевого оборудования для сварки и пайки (рис. 2), состоящий из светолучевого излучателя, источника питания, сервисного блока, блока автономного водяного охлаждения. Этот комплекс может быть применен, например в автомобильной промышленности.

Выводы

1. Сотрудниками кафедры сварки МАТИ установлены преимущества нагрева световым лучом по сравнению с другими распространенными видами нагрева: возможность термообработки материалов независимо от их электрических и магнитных свойств; вероятность достижения сравнительно простыми средствами высоких плотностей энергии ($1 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^4$ Вт/см²); бесконтактный способ подвода энергии к изделию непосредственно и через оптически прозрачные оболочки в любой контролируемой газовой среде и вакууме; незначительное механическое воздействие на нагреваемый объект; высокая регулируемость и управляемость вводом тепла. Такое сочетание свойств оптического источника тепла открывает широкие перспективы его использования для сварки и пайки.

2. Сфокусированным лучом дуговых ксеноновых ламп можно сваривать тонкостенные конструкции (толщиной 0,1... 2,5 мм) из низкоуглеродистых и высоколегированных сталей (например, 08Ю, Ст10, 12Х18Н10Т, 30ХГСА, высокомарганцовистых сталей системы Fe–Mn–Al–C с содержанием 30 % Mn), а также алюминиевых (АМг3), никелевых и титановых сплавов (ОТ4, ВТ5-1, ВТ20, ОТ4-2), термопластмасс и стеклокерамику. Причем сварка малоактивных материалов (низкоуглеродистых сталей, медных сплавов) производится прямо на воздухе, что облегчает технологический процесс.

3. Пайку металлов световым лучом дуговых ксеноновых ламп можно осуществлять движущимися и неподвижными источниками тепла; в пятне нагрева происходит интенсивная термическая активация поверхности, что создает благоприятные



условия для смачивания и растекания припоя. Выявление новых возможностей светового луча дуговых ксеноновых ламп в сварочных технологиях является очень перспективным.

4. В зависимости от конкретной технологической задачи для пайки можно использовать как легкоплавкие, так и тугоплавкие припои. Пайка световым лучом применима в вакууме, в атмосфере защитных газов и на воздухе с использованием соответствующих флюсов.

1. *Беляничков Л. Н.* Светолучевые технологии — перспективное развивающееся направление спецэлектротехнологии // *Электротехнология*. — 2004. — № 10. — С. 21–26; № 11. — С. 24–29.
2. *Применение* сфокусированной лучистой энергии мощных ксеноновых ламп для сварки и пайки металлов / Г. Д. Никифоров, В. В. Дьяченко, М. И. Опарин и др. // *Свароч. пр-во*. — 1969. — № 9. — С. 1–3.
3. *Никифоров Г. Д., Опарин М. И., Федоров С. А.* Использование лучистого нагрева для сварки, пайки и термической обработки // *Там же*. — 1974. — № 12. — С. 19–21.
4. *Никифоров Г. Д., Опарин М. И., Федоров С. А.* Сварка и пайка световым лучом. — М.: Машиностроение, 1979. — 40 с.
5. *Федоров С. А., Овчинников В. В.* Управление формированием шва при сварке световым лучом // *Свароч. пр-во*. — 1983. — № 9. — С. 33–35.
6. *Опарин М. И., Никифоров Г. Д., Мамаев В. С.* Расширение энергетических возможностей установок для сварки световым лучом при импульсном питании дуговых ксеноновых ламп // *Там же*. — 1982. — № 7. — С. 13–14.
7. *Опарин М. И., Фролов В. А., Пронин Н. С.* Новое в области сварки световым лучом дуговых ксеноновых ламп // *Повышение качества и эффективности сварочного производства на предприятиях г. Москвы*. — М.: МДНТП, 1989. — С. 17–22.
8. *Фролов В. А.* Конструкторско-технологические особенности разработки сварных конструкций с применением светолучевой сварки // *Свароч. пр-во*. — 1998. — № 3. — С. 16–20.
9. *Использование* энергии светового луча в технологических целях / В. А. Фролов, В. С. Мамаев, Н. С. Пронин, Н. А. Коробко // *Там же*. — 1993. — № 4. — С. 12–14.
10. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
11. *Разработка* и развитие технологий сварки, пайки и термической обработки световым лучом / В. А. Фролов, Н. С. Пронин, С. А. Федоров, М. И. Опарин // *Свароч. пр-во*. — 2003. — № 11. — С. 19–21.
12. *Разработка* и развитие технологий сварки, пайки и термической обработки световым лучом / В. А. Фролов, Н. С. Пронин, С. А. Федоров, М. И. Опарин // *Технология машиностроения*. — 2003. — № 5. — С. 28–29.
13. *Федоров С. А., Овчинников В. В.* Местная термообработка сварных соединений алюминиевых сплавов светолучевыми источниками нагрева // *Там же*. — 1993. — № 1. — С. 6–7.
14. *Овчинников В. В., Федоров С. Л.* Механические свойства сварных соединений из тонколистовых титановых сплавов, выполненных дуговой и светолучевой сваркой // *Там же*. — 1989. — № 8. — С. 14–15.
15. *Федоров С. А., Овчинников В. В.* Влияние разности поверхностного натяжения металла в ванне на формирование шва при сварке тонколистовых материалов световым лучом // *Там же*. — 1986. — № 11. — С. 33–35.
16. *Светолучевая* сварка тонколистовых титановых сплавов / В. А. Фролов, В. С. Мамаев, Н. С. Пронин, П. Г. Волков // *Там же*. — 1993. — № 1. — С. 4–6.
17. *Повышение* технологической надежности при светолучевой сварке / В. А. Фролов, В. С. Мамаев, В. В. Редниц, П. Г. Волков // *Производство и надежность сварных конструкций*: Тез. докл. науч.-техн. конф. стран СНГ, Калининград, 26–28 янв. 1993 г. — М., 1993. — С. 76.
18. *Применение* светового луча в автомобилестроении / В. А. Фролов, В. С. Мамаев, Н. С. Пронин, Н. П. Коробко // *Там же*. — С. 78.
19. *Никифоров Г. Д., Пронин М. И., Федоров С. А.* Особенности формирования ванны на весу при сварке тонколистовых материалов световым лучом // *Свароч. пр-во*. — 1973. — № 8. — С. 1–3.
20. *Никифоров Г. Д., Опарин М. И., Федоров С. А.* Энергетические и технологические особенности сварки и пайки металлов световым лучом // *Повышение качества и эффективности сварочного производства*. — М.: МДНТП, 1978. — С. 130–138.
21. *Федоров С. А., Овчинников В. В.* Свойства сварных соединений коррозионно-стойких сталей, выполненных световым лучом в азотно-кислородных смесях // *Свароч. пр-во*. — 1984. — № 8. — С. 23–24.
22. *Сварка* высокомарганцовистых сталей световым лучом / М. И. Опарин, В. А. Фролов, А. Н. Свободов и др. // *Там же*. — 1990. — № 8. — С. 2–3.
23. *Овчинников В. В., Федоров С. А.* Сварка соединений типа шпилька—фланец световым лучом дуговых ксеноновых ламп // *Там же*. — 1990. — № 5. — С. 23–24.
24. *Никифоров Г. Д., Федоров С. А., Овчинников В. В.* Сварка низкоуглеродистых и коррозионно-стойких сталей световым лучом в азоте // *Там же*. — 1982. — № 10. — С. 9–11.
25. *Овчинников В. В., Федоров С. А.* Герметизация изделий световым лучом дуговых ксеноновых ламп // *Там же*. — 1989. — № 2. — С. 3–4.
26. *Технологические* особенности сварки световым лучом медных монтажных проводов / М. И. Опарин, В. С. Мамаев, В. А. Фролов и др. // *Там же*. — 1991. — № 6. — С. 3–4.
27. *Зернов И. А., Белов Л. А., Бульбутенко В. С.* Выбор режимов радиационной локальной пайки трубчатых теплообменников // *Прогрессивные методы в пайке*: Сб. науч. тр. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1986. — С. 83–85.
28. *Овчинников В. В., Федоров С. А.* Пайка капиллярных трубок с арматурой световым лучом дуговых ксеноновых ламп // *Свароч. пр-во*. — 1991. — № 4. — С. 4.
29. *Пайка* пружинных контактов световым лучом дуговых ксеноновых ламп / С. А. Федоров, В. В. Гринин, В. В. Овчинников и др. // *Там же*. — 1986. — № 3. — С. 2–3.
30. *Овчинников В. В., Федоров С. А.* Пайка фильтрующих элементов световым лучом дуговых ксеноновых ламп // *Там же*. — 1991. — № 11. — С. 28–29.
31. *Опарин М. И., Коробко Н. А., Пронин Н. М.* Пайка интегральных микросхем на печатные платы лучистой энергией // *Новые энерго- и материалосберегающие технологии пайки в народном хозяйстве*. — Смоленск, 1991. — С. 93–97.
32. *Миронов Л. Г., Раваев Г. П., Петухов В. Ф.* Опыт применения сфокусированной лучистой энергии дуговых ксеноновых ламп для пайки изделий // *Новые достижения в области пайки*: Сб. науч. тр. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1981. — С. 116–120.
33. *Особенности* нагрева световым лучом дуговых ксеноновых ламп при пайке узлов из меди и ее сплавов / М. И. Опарин, В. С. Мамаев, Н. С. Пронин и др. // *Технологическая теплофизика. Раздел III. Теплофизика процессов сварки и пайки*. — Тольятти, 1988. — С. 129.
34. *Использование* энергии пространственно-трансформированного светового луча для высокотемпературной пайки / М. И. Опарин, Н. А. Коробко, Н. С. Пронин и др. // *Новые энерго- и материалосберегающие технологии пайки в народном хозяйстве*. — Смоленск, 1991. — С. 57–60.
35. *Алексеев Г. М., Бутов В. Н.* Оборудование для светолучевой сварки и пайки тонкостенных конструкций // *Свароч. пр-во*. — 1999. — № 9. — С. 33–35.
36. *Пигарев К. В., Волков С. С.* Исследование энергетических параметров светолучевого безлампного малогабаритного излучателя // *Там же*. — 2000. — № 3. — С. 54–56.
37. *Takagi M., Yamaji T.* New soldering process using light beam technology // *Soldering and Surface Mount Technology*. — 1995. — № 20, May. — P. 13–18.

Retrospective analysis of development of the light-beam heating method is given. The leading role of Russian scientists in formation of this area is highlighted. It is noted that the light-beam heating method can be applied for welding and brazing of various materials, as well as for heat treatment of parts. Advantages of welding using the light beam are given in comparison with those of arc welding.

Поступила в редакцию 18.05.2005



ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ШВОВ ПРИ СВАРКЕ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Р. Н. РЫЖОВ, канд. техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

На основе экспериментов произведен сравнительный анализ эффективности применения электромагнитных воздействий с пульсирующим аксиальным и комбинированным магнитным полем для управления параметрами формирования и кристаллизации швов.

Ключевые слова: дуговая сварка, неплавящийся электрод, электромагнитное воздействие, магнитное поле, комбинированное электромагнитное воздействие, формирование шва, макроструктура

Эффективность технологий сварки с внешними импульсными воздействиями в значительной степени определяется комплексным улучшением показателей качества швов. При сварке с электромагнитными воздействиями (ЭМВ) в случае применения аксиальных управляющих магнитных полей (УМП) возможно управление гидродинамикой сварочной ванны с целью как дегазации, так и значительного улучшения параметров кристаллизации швов [1]. Однако из-за характерной для данного воздействия преобразования геометрии дуги в конусоподобную форму, сопровождающейся ее рассредоточением как источника нагрева, происходит уменьшение на 20...30 % глубины проплавления. При сварке неплавящимся электродом, характеризующейся строгим регламентированием параметров режима, уменьшение глубины проплавления недопустимо.

Одним из способов сохранения заданной глубины проплавления при сварке с ЭМВ является применение реверсивных пульсирующих магнитных полей с регулированием временных интервалов между импульсами УМП, в течение которых дуга горит в естественном состоянии [2]. Однако при этом для сохранения эффективности ЭМВ на кристаллизацию сварочной ванны необходимо увеличение как индукции УМП в импульсе, что требует увеличения массогабаритных параметров электромагнитов и может снижать стабильность горения дуги, так и длительности интервала реверсирования УМП, что может сопровождаться ухудшением параметров формирования швов.

Другой способ решения указанной проблемы — применение поперечных УМП, создающих объемные электродинамические силы в направлении, перпендикулярном поверхности ванны. Такие ЭМВ позволяют как понижать, так и повышать относительно исходной глубину проплавления [3].

Исходя из того, что применение аксиальных УМП более целесообразно для управления параметрами кристаллизации, а поперечных — для

управления параметрами формирования швов, целью данной работы является определение эффективности применения комбинированных ЭМВ для комплексного улучшения параметров качества сварных соединений.

В ходе экспериментов проплавливали пластины из нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 6 мм на следующем режиме: $I_{св} = 100$ А, $U_d = 10$ В, $v_{св} = 10$ м/ч аналогично работе [3]. Аксиальные и поперечные УМП в зоне сварки генерировали с помощью специализированной горелки с шестиполусной электромагнитной системой (ЭМС) [4] путем суперпозиции магнитных полей отдельных ее электромагнитов [3]. Амплитуду и длительности импульсных последовательностей токов через катушки электромагнитной системы задавали с помощью микропроцессорного устройства управления ЭМВ [5].

Комбинированное ЭМВ создавали путем поочередного генерирования в зоне сварки в течение времени t_a аксиального и $t_{п}$ поперечного УМП. Период воздействия $t_k = t_a + t_{п}$ изменяли в диапазоне 0,05...0,1 с путем регулирования $t_{п}$ в пределах 0...0,05 с при неизменном $t_a = 0,05$ с, оптимальном для данных условий эксперимента [3]. Следующий период отличался от предыдущего только полярностью аксиального УМП, благодаря чему достигалось реверсивное движение расплава вдоль боковых поверхностей ванны. Индукция обоих реализуемых видов УМП была равной 15 мТл исходя из достигнутых в [3] максимальных изменений параметров формирования швов при ЭМВ с разделением использованием аксиальных и поперечных магнитных полей. В ходе экспериментов отдельно исследовали комбинированные ЭМВ с силовыми воздействиями на расплав, направленными как вниз, так и вверх. При реализации ЭМВ с пульсирующими аксиальными магнитными полями [2] за время $t_{п}$ в зоне сварки индукция обоих используемых видов УМП была равной нулю.

Экспериментально установлено (рис. 1), что применение комбинированного ЭМВ независимо от полярности поперечного УМП, а значит и направления (вертикального вверх или вниз) силового воздействия на расплав позволяет увеличивать на 60...65 % глубину проплавления H при $t_{п} = 0,02...0,03$ с. Данный эффект можно объяснить

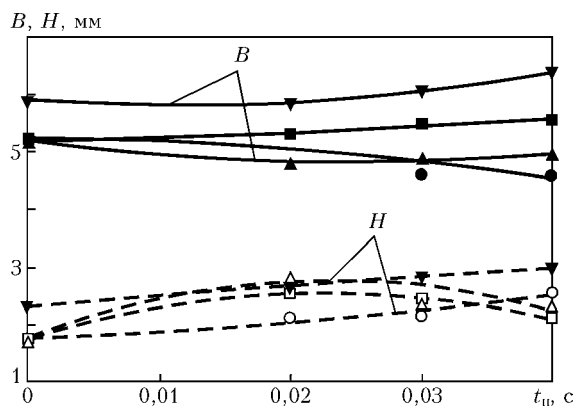


Рис. 1. Зависимость ширины B (сплошные кривые) и глубины H (штриховая) швов от времени воздействия поперечного УМП при сварке с комбинированным ЭМВ ($I_{св} = 100$ А, $v_{св} = 10$ м/ч): ● и ○ — пульсирующее аксиальное УМП; ■, □ и ▲, △ — комбинированное ЭМВ при силовом воздействии за время $t_{п}$, направленном соответственно вниз и вверх; ▼ — то же, но при $I_{св} = 130$ А, $v_{св} = 13$ м/ч

оттеснением расплава из-под дуги, в результате чего увеличивается ее проплавляющая способность. Дальнейшее возрастание $t_{п}$ сопровождалось некоторым уменьшением H . Это можно объяснить тем, что после достижения потоком расплава хвостовой части ванны формируется его обратная струя, направленная к центру. Для подтверждения этого проведены эксперименты с повышенными на 30 % $I_{св}$ и $v_{св}$, что при неизменном значении погонной энергии позволило увеличить длину хвостовой части ванны. В данных условиях уменьшение H не наблюдалось и при $t_{п} = 0,04$ с (рис. 1). При реализации ЭМВ с пульсирующим аксиальным УМП увеличению $t_{п}$ соответствовало монотонное, однако менее значительное, чем при комбинированном ЭМВ, возрастание H .

При сварке с комбинированными ЭМВ увеличение ширины швов наблюдали только тогда, когда при $t_{п}$ силовое воздействие было направлено вертикально вниз (рис. 1). При изменении направления силового воздействия на противоположное с увеличением $t_{п}$ параметр B уменьшался. Аналогичные результаты получены при сварке с пульсирующими аксиальными УМП.

Данные экспериментальные зависимости можно объяснить следующим образом. В начале периода $t_{п}$, когда аксиальным УМП за время t_a уже сформирован поток расплава, перемещающийся вдоль одной из боковых кромок ванны, создается силовое воздействие в вертикальном направлении. В случае, когда оно направлено вниз, поток распла-

ва, отразившись от дна, перемещается в сторону ее хвостовой части уже вдоль обеих боковых кромок, уменьшая тем самым толщину жидкой прослойки под дугой, в результате увеличивается глубина проплавления. Одновременно с этим аналогично действию аксиального УМП перемещение потоков вдоль боковых кромок ванны вызывает их «размывание», что приводит к увеличению ширины швов. В случае, когда за время $t_{п}$ силовое воздействие направлено вверх, вытесненный из-под дуги расплав не перемещается вдоль боковых кромок ванны, а создает вблизи фронта плавления избыточный объем, который в последующий период t_a переносится в хвостовую часть. При этом ширина швов уменьшается аналогично действию пульсирующего аксиального УМП, когда с увеличением $t_{п}$ данный параметр формирования приближается к исходным значениям.

Отличие гидродинамики процессов в ванне при комбинированных ЭМВ проявляется в макроструктурах швов. При реализации ЭМВ с пульсирующим аксиальным УМП при $t_{п} = 0,02...0,04$ с наблюдали структуры швов, незначительно отличающиеся от исходных (рис. 2, а). Комбинированное ЭМВ, при котором за время $t_{п}$ силовое воздействие направлено вниз, характеризуется постоянным, а не импульсным перемещением из головной в хвостовую часть ванны перегретого расплава. Это приводит к снижению скорости охлаждения центральной области швов, в результате при $t_{п} > 0,03$ с формируется грубая транскристаллитная структура (рис. 2, б). Наиболее существенное измельчение структуры наблюдали при комбинированном ЭМВ, при котором при $t_{п}$ силовое воздействие направлено вверх (рис. 2, в). Следует отметить, что в процессе выявления структур, шлифы, изготовленные из образцов данной серии, плохо протравливались, что свидетельствует о снижении уровня химической микронеоднородности. Данное воздействие характеризуется тем, что за время t_a в направлении хвостовой части ванны импульсно переносятся увеличенные по сравнению с традиционным ЭМВ объемы расплава. По всей видимости при этом происходят не только периодические остановки с заданной частотой фронта кристаллизации, но и частичное оплавление уже сформированных кристаллитов, чем можно объяснить значительное измельчение структуры.

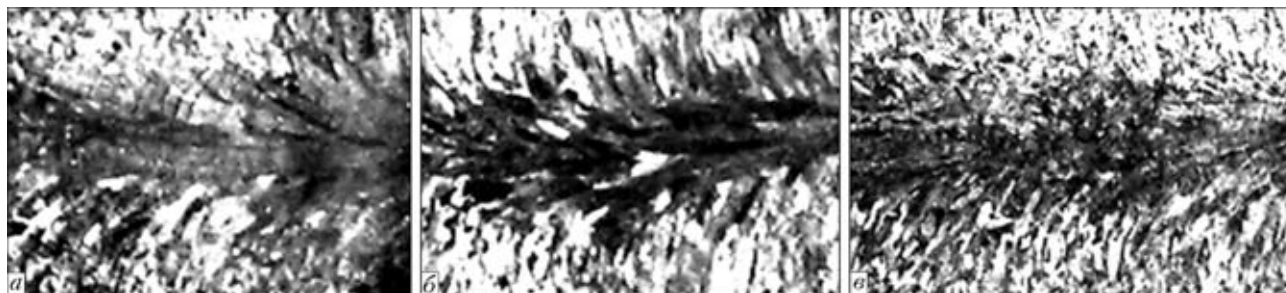


Рис. 2. Макроструктуры швов при пульсирующем аксиальном УМП (а) и комбинированном ЭМВ при силовом воздействии за время $t_{п}$, направленном соответственно вниз (б) и вверх (в)



Выводы

1. При сварке с комбинированным ЭМВ максимальное одновременное улучшение параметров формирования и кристаллизации швов достигается в случае, когда при $t_{II} \geq 0,02$ с силовое воздействие на расплав ванны, создаваемое поперечным УМП, направлено вверх.

2. Применение комбинированных ЭМВ позволяет полностью компенсировать характерное для сварки с электромагнитным перемешиванием уменьшение глубины проплавления без снижения эффективности воздействия на процессы кристаллизации.

Experiments were the basis to conduct comparative analysis of the effectiveness of application of an electromagnetic impact with a pulsed axial and combined magnetic field to control the parameters of weld formation and solidification.

Поступила в редакцию 02.02.2005,
в окончательном варианте 08.04.2005

УДК 621.791.04

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМООБРАБОТКИ ПОКРЫТЫХ СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ*

М. Ф. ГНАТЕНКО, канд. техн. наук (ООО «ВЕЛМА», г. Киев)

Рассмотрены аппаратные и технологические направления совершенствования термической обработки качественных электродов с целью улучшения сушильных свойств покрытия.

Ключевые слова: сварочные материалы, покрытые электроды, сушильные свойства покрытия, направления совершенствования

Термообработка электродов является энергоемким процессом (более 80 % общего объема затрат энергии). Это заключительная и очень «капризная» стадия производства. Неправильный режим термообработки может существенно влиять на качество электродов, вспухание, образование трещин и снижение прочности покрытия.

Исходя из особенностей технологии термообработки электродов пути ее совершенствования можно разделить на две взаимосвязанные группы.

К первой, аппаратной группе относятся: выбор конструкции печи, вида нагрева, метода и способа подвода тепла, т. е. все, что связано с теплоносителем, удалением влаги, управлением режимом процесса термообработки и пр.

Вторая группа технологическая, связанная со свойствами покрытия электродов, а именно: с его сушильными свойствами, степенью связности влаги, сопротивлением структуры покрытия выведению влаги, характером изменения пластично-меха-

1. Сварка с электромагнитным перемешиванием / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брискман, Г. М. Шеленков. — Киев: Техніка, 1983. — 127 с.
2. Сохранение глубины провара в условиях электромагнитного перемешивания сварочной ванны / И. В. Малинкин, В. Ю. Поповский, В. В. Сыроватка, В. П. Черныш // Автомат. сварка. — 1971. — № 8. — С. 46–48.
3. Рыжов Р. Н., Кузнецов В. Д., Малышев А. В. Применение шестиполусной электромагнитной системы для управления параметрами формирования швов при сварке неплавящимся электродом // Там же. — 2004. — № 2. — С. 45–49.
4. Пат. 42252АВ 23 К 9/08 Украина. Пальник для зварювання з зовнішніми електромагнітними діями / Р. М. Ришов, О. В. Малишев. — Опубл. 15.10.2001, Бюл. № 9.
5. Пат. 50430 В 23 К 9/08. Спосіб зварювання неплавким електродом з використанням зовнішніх комбінованих керуючих магнітних полів і пристрій для його реалізації / А. А. Тітов, О. В. Малишев, Р. М. Ришов. — Опубл. 15.10.2002, Бюл. № 10.

нических свойств покрытия при нагреве, термоусадочными свойствами и пр.

В части аппаратного оформления печей имеется два типа электродных производств — высокопроизводительные конвейерные и небольшие мелкосерийные производства, в том числе изготавливающие специальные электроды.

Для предприятий с небольшим (до 10 т/смену) объемом производства оптимальным следует признать камерные печи с электрическим (калорифер, ТЭН) или газовым нагревом. В них раскладка электродов происходит на рамки или в кроватках (при влажности менее 2 %), а термообработка осуществляется после их провяливания. При этом необходимо обеспечить интенсивный обдув каждого электрода теплоносителем (лучше всего по его длине) для быстрого и равномерного нагрева и удаления влаги с электродного покрытия. При этом очень важно полностью исключить холостые потоки теплоносителя. В конструкции печей должны быть предусмотрены регулируемые по сечению воздухопроводы для подачи свежего и выброса влажного воздуха.

Скорость нагрева в основном регламентируется только начальной влажностью электродного покрытия, т. е. после провяливания. При влажности менее 4 % скорость нагрева электрода ограниченный практически не имеет, поскольку его покрытие уже достаточно прочное и термоусадочные процес-

* По материалам доклада, заслушанного на III Международной конференции по сварочным материалам стран СНГ (г. Днепродзержинск, 1–4 июня 2004 г.).



сы в основном завершены, поэтому исключается вспухание и образование трещин.

Максимальная температура и время выдержки должны быть соизмерены так, чтобы произошла необходимая степень обезвоживания электродного покрытия при максимальной температуре. Это сводит к минимуму разупрочнение покрытия и уменьшает расход энергии. Существенную роль при этом играют технологические свойства электродного покрытия.

Очень важной является стадия охлаждения электродов. Резкое охлаждение в связи с разностью коэффициентов линейного расширения стержня и электродного покрытия после термообработки может привести к образованию трещин. Поэтому при температуре 100...120 °С скорость охлаждения электрода должна быть небольшой и равномерно распределенной по его длине. Если охлаждение осуществлять в печи, то производительность последней резко снижается. Целесообразно электроды вывести из печи под колпак-термос, где скорость охлаждения незначительная, при этом печь продолжают использовать по назначению. Тепло из колпака-термоса можно использовать для провяливания.

Применительно к конвейерному производству анализ процесса термообработки электродов показал следующее. Из имеющихся печей конвейерного типа можно выбрать следующие наиболее перспективные типы:

газовая конвейерная печь (конструкция института «Теплопроект»). Непростая по конструкции, но эффективная по скорости термообработки, малоинерционная, с небольшой массой. Ее следует усовершенствовать с целью рекуперации воздуха для охлаждения электродов на выходе из печи. Следует также сделать более простыми газовые камеры сгорания;

конвейерная печь типа ОКБ с радиационным нагревом (конструкция ВНИИЭТО). Имеет более сложную конструкцию, но очень легко механизмуется и весьма эффективна. Электроды подвергаются равномерной термообработке; несущие элементы нагреваются один раз — на стадии разогрева печи. Небольшие потери тепла имеют место на переключниках и их следует свести к минимуму. Необходимо усовершенствовать транспортировку свежеспрессованных электродов в первом проходе, а также конструкцию узлов переключника электродов между проходами. В верхних двух проходах нагревательные элементы не нужны, необходим лишь выброс влаги. На стадии прокалки должен быть предусмотрен механизм ворошения (прокручивания) электродов;

тоннельная печь с электрическим или газовым нагревом (два тоннеля — для провяливания и термообработки). Она обеспечивает возможность

раскладки электродов на рамки и стопирование рамок. Конструктивно в ней сложно механизировать загрузку электродов на рамки и их разгрузку. Ее несущие элементы имеют большую массу. Эффективность процесса термообработки повышается при наличии экранов и рекуперации теплоносителя.

Из трех рассмотренных моделей печей наиболее перспективной является газовая конструкция института «Теплопроект».

На основе проведенного анализа работы различных типов печей и результатов их промышленных испытаний нами спроектирована простая экономичная надежная печь для применения как в конвейерных, так и в небольших производствах — это газовая (в альтернативе электрическая) конвейерная печь, имеющая несущие элементы небольшой массы, простая по конструкции, загрузка и выгрузка электродов в ней механизированы. Через 1,0–1,5 года печь будет выполнена в металле.

Относительно технологической группы направлений, касающейся совершенствования сушильных свойств покрытия сварочных электродов, заслуживают внимания три пути улучшения сушильных свойств покрытия электродов за счет следующих объектов:

гранулометрического состава компонентов (повышение плотности упаковки зерен и уменьшение усадки, трещин, вспухания покрытия; понижение активности поверхности компонентов и подавление их взаимодействия с жидким стеклом; армирование покрытия или создание каркаса);

состава и характеристики жидкого стекла (подбор вязкости (плотности), модуля, типа, которыми определяется структура и свойства пленки жидкого стекла и энергия связи влаги с материалом; уменьшение активности жидкого стекла по отношению к компонентам шихты и подавление вспухания);

вида и содержания пластификатора (обеспечение требуемой степени структурирования массы; замедление процесса размягчения массы при нагреве; активное воздействие на жидкое стекло для перевода как можно большей части химически связанной влаги в свободную).

По каждому из названных путей совершенствования нами разработаны конкретные направления улучшения сушильных свойств электродного покрытия. Они позволяют увеличить скорость удаления влаги с покрытия и уменьшить температуру прокалки электродов, исключив тем самым вмятины, слипание, вспухание, трещины в покрытии и обеспечив требуемую степень его обезвоживания.

Сочетание оптимальных конструкции печи и режимов термообработки обеспечит высокое качество последней при минимальных издержках производства.

Hardware and technology trends in upgrading of heat treatment of quality electrodes, aimed at improvement of drying properties of coatings, are considered.

Поступила в редакцию 30.12.2004



ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ



Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Ю. М. Кусков (ИЭС) защитил 18 мая 2005 г. докторскую диссертацию на тему «Электрошлаковый процесс и технология наплавки дискретными материалами в токоподводящем кристаллизаторе»

Работа посвящена созданию принципиально нового направления в электрошлаковой технологии наплавки цилиндрических деталей, в частности прокатных валков, основанного на современных представлениях получения высококачественного металла за счет целенаправленного управления теплофизическими физико-химическими и кристаллизационными процессами. Такое управление достигается, например, обработкой наплавленного металла высокоактивными рафинирующими шлаками, инокулирующим воздействием на кристаллизующийся металлический расплав дискретной присадки в виде дроби, электромагнитным влиянием на фазовый переход металла из жидкого состояния в твердое и созданием условий ускоренного охлаждения образующейся металлической ванны.

Диссертантом получены следующие наиболее существенные научные результаты:

- изучены условия стабильного протекания в токоподводящем кристаллизаторе (ТПК) электрошлакового процесса. При этом установлено, что электрошлаковый процесс наплавки проходит в две стадии. В начальной стадии следует применять переменный ток или постоянный прямой полярности с подачей на шлаковую ванну напряжения не менее 45...55 В. Вторая стадия характеризуется установившимся процессом при рабочем напряжении, составляющем 50...70 % первоначального. Суммарный ток возрастает с уменьшением отношения диаметров токоподводящей и формирующей секций кристаллизатора и толщины наплаваемого слоя. Стабильность процесса и качество наплавки достигаются при распределении тока на металлическую ванну, не меньше 25 % тока, идущего на заготовку;

- исследована кинетика переноса дискретного материала в слое вращающегося шлака и характера формирования наплавленного слоя. Установлено, что вследствие намораживания шлака на поверхности частиц скорость их переноса через шлак

по сравнению с расчетной снижается в 5...10 раз. Это исключает появление дефектов в наплавленном металле. При повышении скорости вращения шлаковой ванны свыше 150 об/мин процесс переноса частиц изменяется и возрастает время их нахождения в шлаке, благодаря чему расширяется фракционный состав применяемой при наплавке присадки;

- установлена возможность повышения износостойкости наплавленного хромистого чугуна 1,2...1,3 раза за счет увеличения фракционного состава частиц от 1,6...2,5 до 2,5...3,5 мм и на 40...50 % при почти трехкратном увеличении массовой скорости ввода присадки в шлаковую ванну. Это связано с изменением структуры чугуна, в частности уменьшением размеров карбидов хрома более чем в два раза. По сравнению с наплавкой некомпактным материалом размер зерна наплавленного металла типа быстрорежущей стали Р6М5 уменьшается примерно в три раза;

- разработана конструкция водоохлаждаемого нерасходуемого электрода в виде секционного токоподводящего кристаллизатора, позволяющая исключить жесткую зависимость между скоростью подачи переплавляемого материала, формой и размерами металлической ванны. Установлено, что она должна быть трехсекционной. Токопроводящую секцию следует изготавливать при диаметре, на 5...30 % превышающем диаметры других секций, благодаря чему на 30 % снижаются тепловые нагрузки на ее стенки и примерно в 1,4 раза повышается долговечность работы. Промежуточная и формирующая секции не требуют специальной защиты рабочих поверхностей от электроэрозии. Для полного исключения электроэрозионных явлений промежуточную секцию следует изготавливать из тугоплавких неэлектропроводных материалов типа карбонитрида бора.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований электрошлакового процесса с введением в шлаковую ванну дискретного присадочного материала и конструкции устройства, с которым он осуществляется, легли в основу нового высокопроизводительного технологического способа восстановления и упрочнения прокатных валков, эффективность применения которого проверена при электрошлаковой наплавке валков различных станов с диаметром бочки от 400 до 1000 мм на установках ОБ1960, ОБ2217 и ЭСП-10ВГ.



НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ

Согласно рейтингу Всемирного экономического форума в 2004 г. первое место среди конкурентоспособных стран отдано Финляндии. Она обошла Соединенные Штаты, скандинавские страны, Японию и Великобританию.

Одной из таких фирм является *Heatmasters Oy* из города Лахти в Финляндии, специализирующаяся на термообработке. Она сумела использовать преимущества компьютерных, информационных и GSM технологий нового поколения ее командоаппаратов, программного обеспечения термообработки и программных контроллеров. Они теперь могут осуществлять дальний дистанционный мониторинг технических процессов из одной страны в другую, создавать всемирные системы аварийно-предупредительной сигнализации и быстродействующие системы калибровки, быстро создавать и передавать документы. Кроме того, они также обеспечивают компьютерное хранение программ термообработки и результатов. Для выполнения проектов термообработки в более чем двадцати странах мира компания использует как стационарные, так и мобильные печи.

Системы управления и сигнализации на базе технологии GSM для печи в Голландии

Недавно *Heatmasters* усовершенствовала печь термообработки по заказу фирмы *Siemens Demag Delaval* в городе Хенгело, Нидерланды. Система управления включает управляющую программу термообработки HM2000 и программные контроллеры типа HM Rige/26 для беспроводного управления термическим оборудованием. Система обеспечивает управление всем процессом, начиная от составления инструкций по термообработке до регистрации данных и хранения результатов.

В тех случаях, когда контроллеры *Heatmasters* HM-Rige/26 имеют платы управления HM-IceStar, что обеспечивает возможность всемирной системы сигнализации и мониторинга процесса термообработки, так как эта управляющая плата содержит плату сигнализации и модем по технологии GSM. Расстояние между контроллером процесса и термической установкой не ограничено и оборудование может быть использовано для передачи аварийно-предупредительных сообщений и параметров процесса в форме кратких сообщений по системе SVS непосредственно на сотовый телефон.

Система сигнализации HM-IceStar со средствами мониторинга позволяет также осуществлять дальнейшее дистанционное программирование и запрашивать информацию о состоянии процесса в любое время с помощью телефона системы GSM. Эта система имеет много факультативных функций, например, в экстренных случаях оператор может послать SMS-сообщение или даже переговорить по телефону с установки термообработки.

В Хенгело система управления оборудована системой GSM-сигнализации для обеспечения безопасности и надежности процесса термообработки.

Эксплуатация в полевых условиях и обучение в нефтяной промышленности

При работе в полевых условиях доступ к объектам термообработки часто затруднен. Во избежание несчастных случаев и облегчения условий работы системы управления и программные контроллеры производства *Heatmaster* позволяют использовать беспроводные модемы для беспроводной связи между персональным компьютером и термической установкой, которая может находиться на расстоянии в несколько километров.

Например, в Находке, Россия, на строительной площадке компании *RR-Offshore Oy*, субподрядчика фирмы *Aker*, компания затребовала не только применение оборудования для высоких технологий, но и экспертное знание технологии термообработки. *Heatmasters* поставила установки для термообработки, а также командировала технического специалиста для контроля параметров оборудования и обучения местных операторов. Эта нефтяная платформа будет поставлена на российское нефтяное месторождение на Сахалине.

Термообработка крупногабаритных сосудов и отливок

Heatmasters также помогла фирме *Anritz Power Company*. Когда *Anritz* изготовила технологический резервуар диаметром 0,4×80 м для нефтеперерабатывающего завода Fortum в Финляндии, термообработка была произведена обслуживающей компанией фирмы *Heatmasters*. Две половины резервуара были обработаны отдельно, а сварной соединительный шов — на месте эксплуатации.

<http://www.eibis.com/eibis/eibiswww/eibisdoc/4185ru.htm>



ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

Устройство для импульсной сварки, содержащее накопитель энергии, ограничительный резистор, активный зажим, пассивный зажим, рабочий управляемый элемент, причем активный зажим соединен через ограничительный резистор с первым полюсом накопителя энергии, второй полюс которого соединен с корпусом, а пассивный зажим соединен со входом управляемого рабочего элемента, выход которого соединен с корпусом. Приведены отличительные признаки. Патент Украины 71002. Р. И. Кубай, Н. Н. Микийчук, Р. Н. Очирко, Я. М. Якимив (Национальный университет «Львівська політехніка») [11].

Способ сварки трением и машина для его реализации, отличающийся тем, что после отключения привода вращения определяют момент трения в зоне контакта, принудительное торможение и проковку начинают при достижении максимального значения момента трения, проковку выполняют одновременно с торможением. Патент Украины 46460. С. И. Кучук-Яценко, И. В. Зяхор (ИЭС им. Е. О. Патона) [11].

Состав порошковой проволоки, отличающийся тем, что порошкоподобная шихта содержит флюс сухой грануляции, карбонат лития, марганец, никель и комплексные лигатуры — алюмомагний, алюмокальций, ферроалюмоцирконий при следующем соотношении компонентов, мас. %: 10,0...15,0 флюса сухой грануляции; 0,5...2,5 карбоната лития; 0,5...1,5 марганца; 0,5...1,5 никеля; 0,5...2,5 алюмокальция; 1,0...3,0 алюмомагния; 0,1...0,5 ферроалюмоциркония; остальное — сталь оболочка. Патент Украины 71039. И. К. Походня, В. Н. Шлепаков, С. М. Наумейко (ИЭС им. Е. О. Патона) [11].

* Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетенях Украины «Промислова власність» за 2004 г. (в скобках указан номер бюллетеня).

Способ электродуговой наплавки на поверхность металлических изделий слоев с повышенным содержанием углерода, отличающийся тем, что в качестве углеродсодержащего материала используют углеродные материалы в виде волокон, ткани, ленты и войлока. Патент Украины 71260А. В. И. Савуляк, А. Ю. Осадчук (Винницкий ГТУ) [11].

Способ дуговой наплавки, отличающийся тем, что в устройство засыпают слой экзотермической металлофлюсовой легированной смеси, которая обеспечивает необходимую массу наплавленного металла за один проход. Патент Украины 71290А. А. Ф. Власов, В. М. Карпенко, С. В. Жариков, А. В. Неровный (Донбасская государственная машиностроительная академия) [11].

Плазмотрон, отличающийся тем, что он содержит металлическую шайбу с размещенными в ней штуцерами и клеммами для подачи/слива охлаждающей воды, плазмообразующего газа, электрического потенциала, которая прикреплена к металлической крышке плазмотрона с помощью ключа, который взаимодействует своими опорными поверхностями с опорой штока и с внешней поверхностью отмеченной шайбы при повороте ключа на угол, близкий к прямому, а шток установлен в центральном резьбовом отверстии металлической крышки с возможностью осевого перемещения при его вращении. Патент Украины 71633. В. В. Процив [12].

Флюс для нанесения в сухом состоянии на основе фторалюмината щелочного металла (для «сухого» флюсования), отличающийся тем, что его суммарное объемное распределение частей по крупности лежит в основном в пределах, ограниченных кривыми 1 и 2 фигуры 10. Патент Украины 71644. Х. В. Свидерский, А. Оттманн, Х.-Й. Бельт (Солвей флуор унд Деривейт ГмбХ, Германия) [12].

ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ЖУРНАЛАМ*

SCIENCE and TECHNOLOGY of WELDING and JOINING (Англия), 2004. — Vol. 9, № 2 (англ. яз.)



Hall A. C. et al. Визуальное наблюдение потока жидкого присадочного металла в зазоре при пайке, с. 95–102.

Hall A. C., Robino C. V. Связь микроструктурных особенностей и явления чешуйчатости в сварных швах нержавеющей стали 304, выполненных сваркой ТИГ, с. 103–108.

Vasudevan M. et al. Байсовский анализ с помощью нейронных сетей содержания феррита в сварных швах нержавеющей стали, с. 109–120.

Venkata Narayana G. et al. Характеристика разрушения сварных листовых материалов из алюминиевого сплава 2219-T87, с. 121–130.

Meran C. et al. Проблемы сварки тонких латунных листов и импульсная сварка ТИГ, с. 131–137.

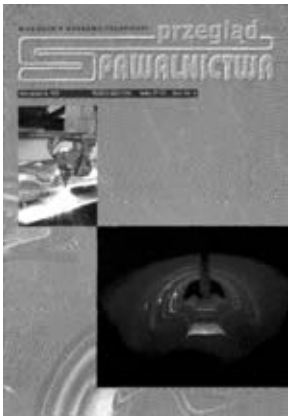
Yamane S. et al. Адаптивный контроль обратного валика при сварке с V-образной разделкой без подкладки, с. 138–148.

Huang C. et al. Ликвационные трещины в сварных алюминиевых соединениях с частичным проваром — оценка склонности к ликвации, образованию трещин и заполнению с обратной стороны, с. 149–157.

Zhang J. et al. Свойства и процессы разрушения паяного соединения $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}_3\text{N}_4$ с использованием припоя Cu-Zn-Ti, с. 158–162.

Yudodibroto B. Y. B. et al. Влияние добавки присадочной проволоки на колебание сварочной ванны в процессе сварки ТИГ, с. 163–168.

* Раздел подготовлен сотрудниками научной библиотеки ИЭС им. Е. О. Патона.



Kosilov A. T. et al. Пайка золота в микроэлектронных изделиях припоем из олова–индия, с. 169–171.
Tsukamoto M. et al. Формирование плазменного канала для начала дуговой сварки, с. 173–175.
Poorhaydari K. et al. Наблюдение двойникового мартенсита в зоне термического влияния малоуглеродистой микролегированной стали марки 100, с. 177–180.

SCHWEISSEN und SCHNEIDEN (Германия), 2004. — № 8 (нем. яз.)

Seiffart P. Впечатления о выставке «Сварка 2004» в Новосибирске, Россия, с. 374–375.
Что дала конференция по сварочной технике в Магдебурге в 2004 г., с. 377.
Vollrath C. Технологический исследовательский Институт Фраунхофера в Штуттгарте предлагает услуги малым и средним предприятиям — контроль материалов, с. 378.
Jenicsek A., Gramer H. Приварка втулок к алюминиевым материалам — соединение небольших полых тел сваркой дугой, вращающейся в магнитном поле, с. 384–389.
Xu P., Lehmkuhl B. Определение возникновения трещин и развития дефектов в точечных соединениях под циклической нагрузкой с помощью высокоточной термометрии, с. 390–394.
Scharff A., Allmeier S. Термомеханическое моделирование для определения характеристик материала — алюминия — в зависимости от температуры с учетом сварки, с. 395–399.

Nutsch G., Linke P. Изготовление высококачественных постоянных магнитных покрытий для микросистемной техники с помощью плазменного напыления, с. 400–405.

Beckert M. Из истории сварки: в 1923 г. сварочную технику впервые стали преподавать в техническом вузе, с. 406–409.

Hoff A. Многочисленные изменения в версии DIN EN 287-1 в 2004 г., с. 409.

Schambach B. Конференция по стандартизации в сварочной технике в мае 2004 г. в Берлине, с. 410–415.

Chung R. Коллоквиум по лазерной технике в Аахене AKL'04, с. 415–418.

Zwatz R. Сварка арматурной стали. Заседание комитета 121 в Хельсинки в апреле 2004 г., с. 418–419.

SCHWEISSEN und SCHNEIDEN (Германия), 2004. — № 9 (нем. яз.)

Berchmann F. Электронно-лучевая сварка толстостенных труб, с. 430–342.

Perpenteinterer R. Сварной бустер ракетополетителя ARIANE 5, с. 433–434.

Выставка «EuroBLECH 2004» (ЕВРОЛИСТ) — передача технологий в перерабатывающую листовую отрасль, с. 1–16.

Janben Timmen R., Moos W. Сварка и резка в 2003 г. Темп роста замедляется, с. 438–449.

Tolke P. Надежное соединение. Сварка чугуна со сферическим графитом в крупносерийном производстве, с. 450–455.

Hahn O., Handing C. et al. Исследование влияния температурной нагрузки на поведение клеевых соединений, с. 456–459.

Letsch S., Meschut G. et al. Техника механического соединения конструкций из смешанных материалов. Ч. 1. Системная оптимизация, с. 460–467.

Конференция по термическому напылению в мае 2004 г. в Японии, с. 476–478.

7-й Международный коллоквиум по высоко- и низкотемпературной пайке и диффузионной сварке в июне 2004 г. в Аахене, с. 479–480.

SOUDEGE et TECHNIQUES CONNEXES (Франция), 2004. — Vol. 58, № 1/2 (франц. яз.)

Орбитальная сварка трубопровода длиной 5000 км при $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, с. 7.

Когда роботы и лазеры состязаются друг с другом в точности, с. 13–14.

Как стать координатором в области сварки, с. 15–17.

Zhong M., Mayer C. Твердая лазерная наплавка: точная дозировка стеллита и карбида вольфрама, с. 27–32.

Лазерная сварка — преимущества гибридных способов (1-я ч.), с. 33–38.

SOUDEGE et TECHNIQUES CONNEXES (Франция), 2004. — Vol. 58, № 3/4 (франц. яз.)

Обучение — платформа для виртуальной сварки, с. 11–12.

Как бороться со сварочными дымами и токсичными газами в процессе сварки, с. 13.

Thomas W. M., Staines D. G., Norris I. M., R. De Frias. Сварка трением с перемешиванием — инструменты и разработка, с. 25–32.

Лазерная сварка — преимущества гибридных способов (2-я ч.), с. 33–38.

SOUDEGE et TECHNIQUES CONNEXES (Франция), 2004. — Vol. 58, № 5/6 (франц. яз.)

Алюминиевая промышленность — состояние на мировом уровне, с. 6–7.

Carbonell L. Металлургические характеристики — роль регулирующих элементов, с. 21–24.

Yurioka N. Температура предварительного нагрева — сравнение четырех методов прогнозирования, с. 25–31.





SUDURA (Румыния), 2004. — Vol. XIV, № 3 (рум. яз.)

Mihailescu D. Моделирование сухого способа подводной сварки в условиях повышенного давления, с. 5–10.

Savu D. Исследование влияния ширины разделки на внутренние напряжения стыкового шва и на риск образования холодных трещин в стыковом шве. Ч. 2. Экспериментальные данные по риску образования холодных трещин при большой ширине разделки и в условиях введения водорода, с. 12–19.

SUDURA (Румыния), 2004. — Vol. XIV, № 4 (рум. яз.)

Mihailescu D., Mihailescu A. Моделирование сухого способа подводной сварки в условиях повышенного давления. Ч. 2. Результаты лабораторных механических испытаний. Выводы, с. 4–11.

Bruehl D., Joni N., Caneparu P. Лазерный датчик для определения реального положения и формы разделки для дуговой сварки, с. 13–17.

THYSSENKRUPP. MAGAZINE (Германия), 2004. — № 1 (англ. яз.)

Klein H. Высококачественная сталь, позволяющая развивать большую скорость на треках бобслея, с. 4–11.

Железный порошок, используемый для искрения бенгальских огней, с. 12–19.

Abele R. Сборные распределители для современных двигателей, с. 30–31.

Breith B. Каротажные зонды для многотонных бурильных труб, с. 32–37.

Breith B. Технология лазерной сварки обеспечивает плотную посадку в судостроении, с. 84–87.

Vogt D. Сверхсплавы, полученные вакуумной индукционной плавкой, с. 88–91.

Klein C. Применение нержавеющей стали в повседневной жизни, с. 92–93.

Wilhelm S. Исследователи открывают магний как производственный материал, с. 94–99.

VARILNA TEHNIKA (Словения), 2004. — Let. 53, № 1 (слов. яз.)

Toms J. Роль поверхностного натяжения сварочной ванны при сварке А-ТИГ, с. 47–53.

Rihar J. Сварка трубопроводов из нержавеющей стали, используемая в фармацевтической промышленности, с. 54–58.

Gubeljak N., Predan J. Проектирование сварных конструкций без разрушения, с. 59–63.

WELDING and CUTTING (Германия), 2004. — № 5 (англ. яз.)

Головка для соосной наплавки с использованием комплексных датчиков, с. 264–265.

Повторная оценка процессов химического травления нержавеющей сталей, с. 266.

Поверхностная защита компонентов, подверженных высоким напряжениям, с. 267–269.

Wilden J., Bergmann J. P. Изготовление соединений титан (алюминий и титан) — сталь с помощью диффузионной сварки, с. 285–290.

Verhaeghe G., Hilton P. Выполнение лазерной сварки алюминиевого сплава для авиационно-космической промышленности с низким содержанием пор, с. 295–297.

Serve M. et al. Более экономичная сварка трением при более высокой скорости вращения, с. 298–301.

Jasnau U., Seyffarth P. Высокомощные волоконные лазеры после первоначальных испытаний — большой ряд перспективных преимуществ для потребителя, с. 302–303.

WELDING TECHNOLOGY (Япония), Journal of the Japan Welding Engineering Society. — 2004. — Vol. 52, № 1 (яп. яз.)

Nomura H. Предложения по структуре Японско-азиатской сварочной федерации, с. 63–66.

Shishido Y. Автоматическое обучение сварочных роботов, с. 68–73.

Kitsuna M. Современное оборудование для лазерной обработки и его применение, с. 74–81.

Nakamura S. Тренажеры для практикующих сварщиков, с. 82–86.

Narumiya T., Murakami T. Автоматизация сварки и разработка сварочных систем для мостостроения, с. 88–92.

Haneda M. Новые способы сварки в энергетике, с. 93–97.

Yamamoto S. Подводная сварка в атомной энергетике, с. 98.

Noma K., Katou S. Разработка способа односторонней сварки с одновременным выполнением двух точечных швов, с. 110–116.

Hayashi Y. Система для объемной пайки мощным полупроводниковым лазером, с. 117–121.

Kariya Y. Способ оценки надежности паяных соединений, выполненных бессвинцовым припоем при изготовлении насосов, с. 122–127.

Sonoda M., Yonemori S. Ч. 1. Внедрение цифрового сварочного оборудования, с. 129–133.

Репортаж о посещении завода, с. 134–136.

Okuyama H., Nakayama K. Ч. 1. Теория лазерного оборудования, с. 140–145.

Kasuya T. Ч. 1. Низкотемпературные трещины, с. 146–150.

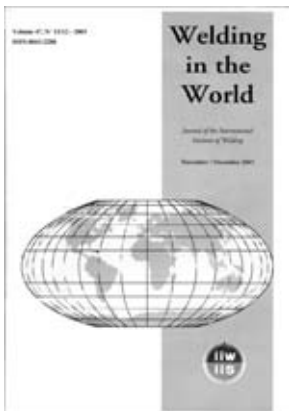
Araya T. Ч. 1. Текущая информация о способах лазерной обработки, с. 151–158.





WELDING TECHNOLOGY (Япония) Journal of the Japan Welding Engineering Society. — 2004. — Vol. 52, № 2 (яп. яз.)

- Сила** логотипа «Made in Japan», с. 51–56.
Hashimoto T. Разработка крупногабаритных алюминиевых панелей, изготовленных сваркой трением с перемешиванием, с. 58–61.
Ishide T. Применение лазерной обработки в тяжелой промышленности, с. 62–68.
Kadoriku J. Современное состояние и проблемы выполнения сварных соединений строительной арматуры, с. 69–74.
Minagawa H. Сварочные технологии в автомобильной технологии, с. 76–79.
Sakai Y. Сварные конструкции и сварочные технологии в вагоностроении, с. 80–86.
Katayama N. Современные сварочные технологии в строительстве танкеров для природных сжиженных газов, с. 87–92.
Mukumoto K. et al. Разработка оборудования для дуговой сварки кузовов автомобилей, с. 94–98.
Sakano R., Katou K. Разработка точечной сварки трением с перемешиванием, с. 99–103.
Sonoda M., Shimada A. Ч. 2. Применение цифровых сварочных машин, с. 105–110.
Yamamoto S. Сварка сплавов ниобия, с. 111.
Повышение качества сварки газоочистных устройств с полимерными шлангами, с. 112–117.
Okuyama H., Nakayama K. Ч. 2. Теория лазерной сварки, с. 118–124.
Kasuya T. Введение в теорию образования сварочных трещин. Ч. 2. Низкотемпературные трещины, с. 125–132.



WELDING TECHNOLOGY (Япония) Journal of the Japan Welding Engineering Society. — 2004. — Vol. 52, № 3 (яп. яз.)

- Itou Y.** Мировая практика использования распределенных энергетических систем, с. 59–65.
Yasuda K. Разработка сварочных систем с высокими эргономическими показателями, с. 68–73.
Hara S. et al. Программы автономного обучения для повышения эффективности внедрения сварочных роботов, с. 74–79.
Yamamoto S. Сварка ТИГ герметичных сосудов для ядерного топлива, с. 80.
Satonaka S. Контактная точечная сварка разнородных металлов, с. 82–86.
Ichikawa K. et al. Предложения по разработке энергосберегающих экологических контактных машин, с. 87–92.
Nakane Y. et al. Системы оперативного управления мощностью для контактной сварки, с. 93–98.
Furukawa K. Разработка и применение способа сварки Time Twin Digital (с применением двух источников для сварки МИГ/МАГ с числовым управлением и сдвоенной проволокой), с. 100–107.
Nakatani K. Разработка мощных волоконных лазеров и их применение, с. 108–114.
Ohmori T. Новые сварочные технологии в судостроении, с. 115–120.
Suzuki M., Yokota H. Сварочные патенты, с. 121–125.
Yasuhara Y., Yonemori S. Ч. 3. Высокие возможности цифровых сварочных машин, с. 126–129.
Suga T. Посещение Института электросварки им. Е. О. Патона, с. 130–137.
Okuyama H., Nakayama K. Ч. 3. Теория лазерной сварки, с. 132–137.
Inoue Y. Введение в теорию образования сварочных трещин. Ч. 3. Высокотемпературные трещины, с. 138–141.
Аттестационные вопросы для специалистов по контролю качества сварки, с. 142–156.



WELDING JOURNAL (США). — 2004. — Vol. 83, № 9 (англ. яз.)

- Blank M.** Предотвращение травматизма при выполнении работ с изделиями, нагретыми до высоких температур, с. 26–28.
Schifsky M. Важность соблюдения правил безопасности при выполнении операций шлифовки, с. 30–31.
Pankratz M., Dorn D. Безопасность на рабочем месте — человеческий фактор, с. 32–35.
Установка новых систем фильтрации воздуха на сварочных постах, с. 36–37.
Harris R. Использование силовых реле в промышленных установках в качестве дополнительной меры безопасности, с. 38–40.
Jones J. Рекомендации по выбору наконечников горелок для кислородной резки, с. 71–72.
McGowan D. Понимание принципов деформации изделий при сварке, с. 76–80.
Bhadeshia H. K. D. H. Надежность расчетов микроструктуры шва и его свойств, с. 237–243.
Elmer J. W. et al. Непосредственное наблюдение за образованием аустенита, бейнита и мартенсита при дуговой сварке стали 1045 с использованием метода рентгеновской дифракции в реальном масштабе времени, с. 244–253.
Lensing C. A. et al. Использование иттрия для фиксации водорода при контроле содержания водорода на высокопрочных легированных сталях, с. 254–266.



ZAVARIVANJE (Хорватия). — 2004. — Vol. 47, № 3/4 (хорват. яз.)

- Rowe M. D., Manning P. E.** Сварка сплавов на никелевой основе, с. 77–86.
Markucic D. et al. Требования к аккредитации организаций, занимающихся подводными неразрушающими испытаниями, с. 93–98.



КАЛЕНДАРЬ КОНФЕРЕНЦИЙ И ВЫСТАВОК В 2005 г. (СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ)

Дата	Место проведения	Название мероприятия	Организаторы
10-16.07	Прага, Чехия	58-й конгресс МИС и конференция «Новые методы и тенденции развития сварки и их вклад в повышение экономичности, производительности и качества»	Czech Welding Society Novotneho lavka, 5 11001 Praha, 1 Czech Republic
23-25.08	Саратов, Россия	9-я Специализированная выставка «Нефть. Газ. Хим.» (с салоном «Сварка»)	Тел./факс: (8452) 205470, 205839 E-mail: office@expo.sofit.ru
Август	Симферополь, Украина	Международный семинар «Новые технологии и сварочное оборудование для судостроения и судоремонта»	Тел. (0652) 482975 Фирма «СЭЛМА»
05-08.09	Прага, Чехия	Европейский конгресс по современным материалам и способам обработки	C/o Deutsche Gesellschaft fuer Materialkunde Hamburger Allee, 26 60486 Frankfurt
Сентябрь	Каховка, Украина	Научно-практический семинар «Судостроение – сварка 2005»	Тел. (05536) 35967 КЗЭСО
Сентябрь-октябрь	Минск, Беларусь	Заседание бюро Межгосударственного научного совета по сварке и родственным технологиям	Тел. (044) 2209203
12-17.09	Донецк, Украина	XII Международная конференция «Машиностроение и технология в XXI-м столетии»	Национальный технический университет г. Донецк, 83000
12-17.09	Эссен, Германия	Международная выставка «Сварка и резка»	Deutscher Verband fuer Schweissen und verwandte Verfahren Duesseldorf, tel. 49211/15910
13-15.09	Эссен, Германия	Большая сварочная неделя в DVS	То же
14-16.09	Ростов-на-Дону, Россия	Специализированная выставка «Металлургия. Машиностроение. Металлообработка-2005»	Тел./факс: (8632) 622883
14-16.09	Эрланген, Германия	39-я металлографическая конференция с выставкой по металлам, керамике и полимерам	DGM 60325 Франкфурт-на-Майне
14-21.09	Ганновер, Германия	Международная выставка «Мир металлообработки-ЕМО 2005»	
20-22.09	Сингапур	Азиатская выставка «Сварка»	г. Сингапур
20-23.09	Екатеринбург, Россия	Выставка «Металлургия Урала-2005»	Тел. (3432) 493017 факс: (3432) 493019
25-29.09	Питтсбург, США	Конференция и выставка ASM по технологическим решениям проблем термообработки	Тел. 8003365152 факс: 4403384634
26-29.09	С.-Петербург, Россия	Международная специализированная выставка «НЕВА 2005» с разделом «Сварка и родственные технологии»	Альянс сварщиков СПб Тел./факс: (812) 3273790 (91)
27-29.09	Ялта, Украина	Международная научно-практическая конференция «Качество. Стандартизация. Контроль: теория и практика»	Тел./факс: (044) 4308500
26.09-01.10	Пловдив, Болгария	Международная техническая выставка ITM	
01-08.10	Кацивели, Крым, Украина	Международная конференция «Электрические контакты и электроды» ЭК-2005	Тел. (044) 4242474, 4241181 факс: (044) 4242131 E-mail: 29min@ipms.kiev.ua
03-07.10	Брно, Чехия	47-я Международная инженерная ярмарка	
13-16.10	Хабаровск, Россия	Хабаровская международная ярмарка «ПромТехноЭкспо ДВ региона-2005»	Тел. (4212) 340992 факс: (4212) 346129
18-20.10	Катовице, Польша	11-я Международная выставка «Интервелдинг 2005»	E-mail: S. Kolodziej@mt.k.katowice.pl
18-21.10	Москва, Россия	Международная специализированная выставка электротехнического оборудования и новых технологий в электроэнергетике	Тел./факс: (095) 3635032, 3635033
22-25.10	Москва, Россия	Международная выставка Weldex/Россварка-2005, «Современные методы и технологии защиты от коррозии»	Тел./факс: (095) 1053486, 2689904 E-mail: Kna@mvk.ru
25-28.10	Уфа, Россия	Международная выставка «Сварка. Контроль. Реновация-2005»	Тел. (3472) 908710 факс: (3472) 908707
26-28.10	Томск, Россия	2-я Специализированная выставка сварочных материалов, оборудования и технологий «СВАРКА»	ОАО ТМОЦ «ТЕХНОПАРК»
31.10-03.11	Сан-Франциско, США	Международный конгресс по применению лазеров	
31.10-03.11	Москва, Россия	Международная выставка «ЭКСПОСВАРКА»	MSI Тел. +431402895447 факс: +431402895454
14-16.11	Новый Ульм, Германия	Международная конференция и выставка «Непрерывное литье цветных металлов»	Deutsche Gesellschaft fuer Materialkunde Vera Hausen, Niels Parusel Hamburger Allee, 26 60486 Frankfurt
16-18.11	Санлис, Франция	Международная конференция по использованию численных моделей и экспериментальных методов в расчетах усталости	Henri-Pau Lieurade Tel. 333 44 67 36 82 E-mail: henri-paul.lieurade@cet.im.fr
29.11-02.12	Екатеринбург, Россия	Специализированная выставка «Сварка-2005»	

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СВАРКИ, НАПЛАВКИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ»

19–21 апреля 2005 г. в Приазовском государственном техническом университете (г. Мариуполь) проходила конференция на тему «Современные проблемы сварки, наплавки и материаловедения», организаторами которой выступили сварочный факультет ПГТУ и Общество сварщиков Украины. Конференция была посвящена 75-летию ПГТУ, которое будет отмечаться в сентябре 2005 г.

Работа конференции проходила в четырех секциях:

- повышение качества и эффективности процессов сварки, наплавки и других родственных технологий;
- проблемы проектирования, изготовления и эксплуатации сварных конструкций;
- современные проблемы материаловедения в машиностроении;
- проблемы совершенствования подготовки кадров в условиях многоуровневой системы высшего образования.

На пленарном заседании было заслушано семь докладов, с которыми выступили ведущие ученые ПГТУ и главные сварщики крупных предприятий г. Мариуполя: С. П. Никитченко (ОАО «Азовмаш»), П. В. Халангот (ОАО «МК Азовсталь»), В. Г. Чекурна (ООО «Коксохим-тепломонтаж»).

Программой конференции было запланировано около ста докладов. С докладами выступили представители машиностроительных предприятий городов Киева, Краматорска, Донецка, Славянска, Запорожья, а также ученые из ИЭС им. Е. О. Патона, ДГМА (г. Краматорск), ЗНТУ (г. Запорожье), КПИ (г. Киев). Были представлены доклады специалистов машиностроительных предприятий и научных учреждений из Польши и Республики Беларусь.

Интерес у слушателей вызвал содержательный доклад академика Академии ВШ Украины, д-ра техн. наук, профессора, заведующего кафедрой оборудования и технологии сварочного производства ПГТУ В. А. Роянова на тему «Роль новых технологий обучения в повышении качества подготовки выпускников на сварочном факультете». Он отметил, что современный уровень развития техники определяет следующую модель специалиста-выпускника: высокий уровень профессиональной подготовки, владение вычислительной техникой, владение одним или несколькими иностранными языками, высокий уровень культуры и физической подготовки.

Интерес слушателей вызвал доклад главного сварщика ОАО «Азовмаш» С. П. Никитченко «Современное состояние и перспективы развития сварочного производства в ОАО «Азовмаш». В докладе очерчены проблемы, над которыми необходимо работать специалистам предприятия и ученым-сварщикам ПГТУ. Деканату и специальным кафедрам сварочного факультета С. П. Никитченко подарил от ОАО «Азовмаш» портрет Президента Национальной академии наук Украины, директора ИЭС им. Е. О. Патона, академика Б. Е. Патона.

Интерес вызвал доклад зав. кафедрой материаловедения ПГТУ, д-ра техн. наук, профессора Л. С. Малинова



Президиум пленарного заседания (слева направо): доктора техн. наук В. В. Чигарев, А. Д. Размышляев, В. А. Роянов

«Разработка экономнолегированных сплавов многоцелевого назначения и способов упрочнения с использованием принципа получения метастабильного аустенита и его управляемой самозакалки при охлаждении и нагружении». В докладе показано, что разработаны экономнолегированные стали и чугуны различных структурных классов и назначения с эффектом самозакалки при охлаждении. Специалистам в области сварки и наплавки весьма полезны эти новые разработки, а использование новых достижений в области материаловедения позволит повысить эффективность процессов сварки и наплавки. Тесное сотрудничество специалистов в области материаловедения и сварки — это необходимое и важное условие для достижения прогресса в машиностроении, ремонте оборудования методами дуговой наплавки.

Обмен научными достижениями между учеными ПГТУ и предприятий г. Мариуполя с учеными других городов и государств послужил мощным импульсом для дальнейшего развития сварки и материаловедения и был полезен всем участникам конференции. Конференция позволила укрепить творческие связи между учеными и представителями производства и будет способствовать внедрению достижений науки в производство, повысит качество подготовки специалистов (студентов) с учетом современных требований.



В зале заседания научно-методической конференции



На конференции приняты решения, из которых наиболее важными являются следующие:

- 1) рекомендовать ряд доложенных разработок к практическому внедрению на предприятиях;
- 2) создать на базе сварочного факультета Региональный координационный центр (в Донецком регионе) с целью согласования исследований по разработке сварочных и наплавочных материалов и внедрения их результатов в производство сварных конструкций и ремонт ме-

таллургического оборудования методами дуговой наплавки и напыления;

- 3) продолжить исследовательские работы по разработке сталей, чугунов, наплавочных материалов, обеспечивающих эффект самозакалки при эксплуатации, с целью внедрения их при производстве сварных конструкций.

А. Д. Размышляев, д-р техн. наук, профессор,
декан сварочного факультета ПГТУ

УДК 621.791:001.12:18



X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК»

С 16 по 21 мая 2005 г. в Яремче (Ивано-Франковская обл.) на базе санатория «Яремче» состоялась X Международная конференция «Физика и технология тонких пленок» (МКФТТП-Х). Ее организаторами выступили Прикарпатский национальный университет им. В. Стефаника, Государственный университет информационно-коммуникационных технологий, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева, Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова, Институт общей и неорганической химии им. В. И. Вернадского, Украинское физическое общество, Ассоциация «Ученые Закарпатья», Люблинский технический университет. Председатель оргкомитета — проф. Д. М. Френк.

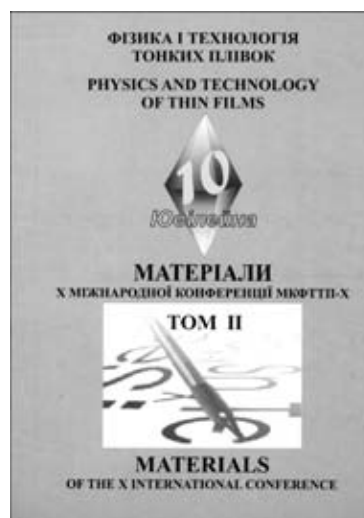
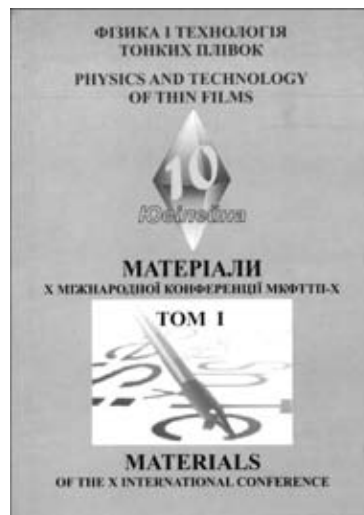
В работе конференции приняли участие более 200 ученых и специалистов.

Тематика конференции отражала результаты теоретических и экспериментальных исследований по следующим основным направлениям: технология тонких пленок (металлы, полупроводники, диэлектрики, проводящие полимеры) и методы их исследования; физико-химические свойства пленок; нанотехнологии и наноматериалы, квантово-размерные структуры; тонкопленочные элементы электронных приборов; информационные технологии.

Работа конференции была организована в виде пленарных и секционных заседаний, устных и стендовых докладов.

Наибольший интерес в участников конференции вызвали пленарные доклады:

«Наносистемы и нанотехнологии полупроводниковых материалов» (Д. М.



Френк); «Характеристики диэлектрических пленок с наноразмерными включениями полупроводника» (В. Г. Литовченко); «Исследование структуры, состава и свойств пленок продуктов твердофазных реакций» (П. И. Игнатченко, А. А. Гончаров, Д. Н. Терпий, Н. А. Кляхина); «Модификация тонких слоев полупроводников лазерными ударными волнами» (М. М. Берченко, В. С. Яковина); «Плавление-кристаллизация и особенности состояния нанодисперсных пленочных систем» (Н. Т. Гладких); «Влияние температурных и деформационных эффектов на электрофизические характеристики многослойных пленочных систем» (И. Ю. Проценко, А. М. Черноус); «Анализ предельно-возможных слоистых структур» (В. А. Нас-тасенко).

На конференции было представлено более 500 докладов из 12 стран мира. Материалы юбилейной X конференции МКФТТП-Х опубликованы в 2-х томах (издатель — Прикарпатский национальный университет им. В. Стефаника, 76000 г. Ивано-Франковск, ул. Шевченко, 57. Тел. (0342) 503752, факс (03422) 31574, E-mail: freik@pu.if.ua).

Ряд докладов конференции были рекомендованы к публикации в журнале «Физика и химия твердого тела».

Очередную международную конференцию МКФТТП-ХІ запланировано провести в Закарпатье в 2007 г.

Г. К. Харченко, д-р техн. наук



МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Ti-2005 В СНГ»

22–23 мая 2005 г. в конгресс-холле гостиницы «Президент-отель» (г. Киев) проходила 3-я Международная конференция «Ti-2005 в СНГ». Ее организаторами выступили ЗАО «Межгосударственная ассоциация «Титан», Национальная академия наук Украины и КП «Запорожский титано-магниевого комбинат». Основные вопросы конференции, в которой участвовало около 200 специалистов и ученых из Украины, России, Беларуси, Казахстана, Таджикистана, Южной Кореи, США и Японии, включала: обзор рынка титана в странах СНГ и мира, национальные программы развития отрасли, тенденции развития сырьевой базы и производства губчатого титана, новые достижения в области металловедения и металлургии титана, динамика развития сфер применения титана, анализ рынка ферротитана, информационные технологии. В работе конференции приняли участие представители ряда институтов НАН Украины (металлофизики, проблем материаловедения, электросварки, физико-механический, Физико-технологический металлов и сплавов), Институт титана, Прикарпатский национальный университет, «Львовская политехника», Ивано-Франковская медицинская академия, КП «Запорожский титано-магниевого комбинат», ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», НПЦ «Титан», Ленинадский комбинат редких металлов, Физико-технический институт НАН Беларуси, ОАО «ВИЛС», ФГУП «ВИАМ», Дэйтонский университет, компании «ANTARES», ФГУП «Гиредмет», ОАО «ГМК Норильский никель», ОАО «Уралредмет», ОАО «Ритм», АНТК им. О. К. Антонова, ФГУП ЦНИИКМ «Прометей», Институт металлургии им. А. А. Байкова, ЗАО «Межгосударственная



Президиум конференции

ассоциация Титан», Запорожская инженерная академия, СЕТАБ-Никополь, ООО «Торговый Дом «Квантом», Airmet International Inc., «МАТИ» — РГУ им. К. Э. Циолковского, Институт проблем сверхпроводимости, Череповецкий государственный университет, ФГУП «ЦИАМ», Запорожский технический университет.

Открывая конференцию, академик Б. Е. Патон поздравил ее участников с началом и с удовлетворением отметил, что выбор места проведения весьма удачен и свидетельствует о признании достижений ученых и специалистов Украины в области производства и материаловедческих аспектов исследования титана и его сплавов. Тематика конференции интересна для многих специалистов содружества и дальнего зарубежья. В Украине произошли заметные позитивные сдвиги в области производства губчатого титана, освоено производство в электрон-



Участники конференции



Во время перерыва

но-лучевых печах титановых слитков из губчатого титана, получение литых заготовок в виде слитков, в том числе, для производства труб. Сегодня только НПЦ «Титан» способен производить от 3 до 5 тыс. т высококачественного титана и его сплавов. Достигнуты большие успехи в науке и производстве титана в России. Главная задача на сегодня наряду с освоением новых технологий производства титана — увеличение объемов его потребления. Б. Е. Патон выразил уверенность в успешном проведении конференции.

Участникам конференции были зачитаны приветствия от Кабинета Министров и Министерства промышленной политики Украины (зам. министра С. Г. Грищенко), в которых отмечено, что подобные конференции являются примером плодотворного сотрудничества ученых и производителей СНГ. Назрела необходимость в более активном использовании титановых сплавов в судостроении, авиационной и космической областях. В Украине ожидается создание вертикально-интегрированной схемы по проблеме получения и применения титана (губка, слитки, сырьевая база).

От имени Украинского НТЦ участников конференции приветствовал г-н Andrew Hood.

В первый день работы на пленарном заседании было заслушано 15 докладов. Отметим наиболее интересное.

А. В. Александров (ЗАО «Межгосударственная ассоциация «Титан») рассказал о деятельности ассоциации в современных условиях рынка титана в СНГ, при этом отметил возросший интерес к титану как в СНГ, так и в мире. Спрос на титановую продукцию увеличивается. Этому способствует динамика цен, благоприятный инвестиционный климат. Вместе с тем в СНГ сейчас лишь 4 % сырья используется для получения титана, остальное — на производство пигментов. Наблюдается дефицит титанового лома — основного сырья для получения ферротитана.

В 2005 г. цена на титан возросла вдвое по сравнению со стоимостью губки. Мировой опыт свидетельствует, что инвестиции до 100 млн дол. в титановую подотрасль окупаются за 3–5 лет. Перед ассоциацией стоят задачи по развитию титановой подотрасли, увеличению объемов потребления титана, содействию нахождения каждым предприятием своей ниши на рынке. Ключевым направлением в настоящее время докладчик считает развитие технологии производства ферротитана из рудного сырья.

Генеральный директор КП «ЗТМК» *В. В. Тэлин* подробно остановился на вопросах развития и совершенствования производства губчатого титана на предприятии за последнее время. Рост цен на губку он объясняет сложностью и несовершенством технологии ее получения. На ЗТМК многое делается для изменения ситуации. Докладчик также отметил, что внутреннее потребление губки в 2005 г. возросло и составило уже 35 % общего объема.

А. Н. Строшков (Корпорация ВСМПО-АВИСМА) в докладе «ВСМПО: состояния и перспективы развития» охарактеризовал производственные мощности Верхне-Салдинского металлургического объединения (крупнейшего в мире плавильного производства, выпускающего до 34 тыс. т губки и имеющего мощное кузнечное производство). ВСМПО единственный поставщик титановой продукции для фирмы «Airbus» (шасси). Имеются заказы и для «Боинга». На предприятии сертифицирована система качества, имеются 24 сертификата на продукцию. Организованы серийные центры в Германии, Великобритании, Швейцарии и в США.

А. Н. Петрунько (Научно-исследовательский и проектный институт титана) остановился на состоянии производства и перспективах развития титановой промышленности Украины, которая занимает достойное место среди производителей титановой продукции. На Алчевском МК производится толстый лист, на ЗТМК — губка, на Никопольском южно-трубном — трубы. Развитие работ по титану в Украине осуществляется по комплексной программе (с 1999 г.), имеющей хорошие перспективы.

М. Г. Халиков (Ленинабадский комбинат редких металлов) рассказал о производстве лигатур и освоении серийного производства низкопроцентного ферротитана.

Большой интерес присутствующих вызвали доклады, представленные *А. И. Гордиенко* «Научные исследования и применение титановых сплавов в Республике Беларусь» и *О. М. Ивасишиным* «Основные направления развития научно-прикладных разработок в области титана в Украине».

И. С. Полькин (ВИЛС) проинформировал о работе института по снижению стоимости производства титана. Это прежде всего создание альтернативной процессу Кролля технологии производства губки (электролитический процесс), увеличение объемов механической обработки титановой продукции на станках с ЧПУ, использование криогенной обработки, создание ресурсосберегающих технологий (лазерная формовка порошка и др.). В ВИЛСе ра-

ботаю и над технологией сварки титана трением с перемешиванием, литьем титановых заготовок в керамические формы (получение фасонного литья с толщиной стенки около 0,5 мм). В будущем большая перспектива у материалов с пористой структурой (пеноалюминий+титан). В заключение докладчик отметил, что сегодня ВСМПО, ИЭС, ВИЛС участвуют в проекте создания нового самолета «Боинг-787». Таких самолетов только в России потребуется почти 1,5 тысячи. В СНГ есть возможности сделать все возможное, чтобы найти себя в этой нише.

С. А. Фирстов (Ин-т проблем материаловедения НАН Украины) остановился на результатах последних исследований по созданию титановых «сталей» и «чугунов», систем Ti-B, Ti-Si-B, Ti-Al-Si-B, Ti-Al-Zr-Se, сочетающих удовлетворительные прочностные и пластические свойства.

Н. А. Ночевная (ВИАМ) рассказала о работе института по созданию титанового сплава для лопаток газотурбинных двигателей с высокими показателями стойкости про-

тив ползучести при температуре 600 °С. Этим требованием удовлетворяет титановый сплав BT-41.

Г. В. Жук (НТЦ «Титан») подробно проинформировал о деятельности центра по применению современных технологий ЭЛП в производстве слитков титановых сплавов.

На второй день работа конференции прошла в трех секциях: сырье, губчатый титан, ферросплавы; технология и исследования в области титановых сплавов; применение и рынок титана.

На секциях было заслушано свыше 30 докладов, после которых состоялся обмен мнениями участников конференции по затронутым вопросам.

На общем собрании ЗАО «Межгосударственная ассоциации Титан» был отмечен высокий научно-технический уровень конференции и ее консолидирующее значение, кроме того, очерчена задача и направления работ на ближайшую перспективу. Принято решение об издании трудов конференции.

В. Н. Липодаев, д-р техн. наук

УДК 621.791.001.12:18

ЗАСЕДАНИЕ СЕКЦИИ «ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СВАРОЧНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ» МЕЖГОСУДАРСТВЕННОГО НАУЧНОГО СОВЕТА ПО СВАРКЕ И РОДСТВЕННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

25–26 мая 2005 г. в Санкт-Петербурге состоялось очередное заседание секции «Источники питания и системы автоматического управления сварочным оборудованием» Межгосударственного научного совета по сварке и родственными технологиям, организованное Институтом элект-

росварки им. Е. О. Патона НАН Украины и Институтом сварки России, которое проводилось в рамках 3-й Международной специализированной выставки «Электротехнология-2005».

В работе секции приняли участие специалисты от Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины: д-р техн. наук Ю. Н. Ланкин, канд. техн. наук А. Е. Коротынский, д-р техн. наук А. В. Лебедев, канд. техн. наук В. Е. Пономарев; от Института сварки России: доктора техн. наук В. В. Смирнов, В. Р. Евсеев, Г. А. Петров, кандидаты техн. наук Н. В. Смирнов, А. Ф. Гарбуль, А. И. Комарчев, А. Л. Рывкин, Л. И. Сахно, О. И. Сахно, П. Д. Федоров, кандидаты техн. наук О. А. Цукуров, В. И. Шерверов; от Минского тракторного завода: В. И. Дьяченко; от Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана: д-р техн. наук Э. А. Гладков, ст. науч. сотр. Р. А. Перковский, от ООО «Промэл-2000», г. Москва: И. И. Юрьев; от НПП «ТехноТрон», г.





Чебоксары: канд. техн. наук Б. Л. Гецкин; от Технического Комитета по стандартизации (ТК-364) Федерального агентства по техническому регулированию, секции «Сварка и родственные технологии» Российской инженерной академии (РИА), редакции журнала «Сварочное производство», Союза разработчиков и производителей сварочной продукции.

Основной целью работы секции было обсуждение проблем по следующим направлениям:

— источники питания для дуговой сварки, резки и газотермического напыления;

— системы автоматического управления сварочным оборудованием;

— разработка новых аппаратов и технологии нанесения упрочняющих и защитных покрытий в различных отраслях промышленности;

— аттестация сварочного оборудования и автоматизированные системы регистрации и протоколирования режимов сварки;

— роль Федерального Законодательства России «О техническом регулировании» на современном этапе развития сварочного оборудования.

На заседании секции было заслушано 19 докладов, которые носили конкретный содержательный характер и вызвали большой интерес среди специалистов-сварщиков и электротехников. Доклады в полном объеме представлены в сборнике под названием «Материалы заседаний секции «Источники питания и системы автоматического управления сварочным оборудованием» 25–26 мая 2005 г.», выпущенном Институтом сварки России к заседанию секции.

Заслушав и обсудив доклады и сообщения, секция «Источники питания и системы автоматического управления сварочным оборудованием» Межгосударственного научного совета по сварке и родственным технологиям решила:

считать целесообразным публикацию представленных на заседание секции докладов и сообщений в национальных научно-технических журналах и сборниках по сварке и родственным технологиям;

одобрить инициативу Межгосударственного научного совета по сварке и родственным технологиям, Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины и Института сварки России о проведении заседаний секции «Источники питания и системы автоматического управления сварочным оборудованием» Межгосударственного научного совета по сварке и родственным технологиям не реже одного раза в два года;

рекомендовать специалистам Межгосударственного научного совета по сварке и родственным технологиям от стран СНГ принять активное участие в подготовке и проведении очередного заседания секции.



С целью реализации научно-технических продуктов (разработок) в области сварочного оборудования, представленных на заседании секции, поддержать предложение Союза разработчиков и производителей сварочного оборудования о создании соответствующей научно-технической программы по внедрению разработок в промышленность.

Рекомендовать Техническому Комитету по стандартизации (ТК-364) через журнал «Сварочное производство» освещать свою работу, в том числе в части реализации Федерального Законодательства России «О техническом регулировании».

Учитывая актуальность прочитанных на секции докладов, рекомендовать авторам последних представить материалы по своим докладам на научно-технической конференции в апреле 2006 г. на 12-й Специализированной выставке «Сварка-2006» в г. Санкт-Петербурге.

Просить членов Межгосударственного научного совета по сварке и родственным технологиям стран СНГ принять более активное участие в мероприятиях, организованных советом, особенно по вопросам, относящимся к новым разработкам в области сварочных и родственных технологий, а также к проблемам создания национальных и межгосударственных стандартов и технических регламентов.

Считать целесообразным согласовывать календарные планы проведения заседаний секции с планами проведения конференций, выставок национальных сварочных организаций.

Л. Ф. Суший, ученый секретарь секции

ПРЕДЛАГАЮТСЯ ИЗДАНИЯ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ**Книги ❖ Монографии ❖ Труды конференций**

- Ryabov V.R., Dobrushin L.D., Jung-Gi Moon. Welding of Bimetals. — 2003. — 130 p., format 140×200 mm, 100 грн./720 руб./38\$*.
- Lysak V.I., Kuzmin S.V. Explosive Welding of Metal Layered Composite Materials. — 2003. — 118 p., format 140×200 mm, 100 грн./720 руб./38\$.
- Juttner B., Vasenin Yu.L. Cathodic Processes of the Metal Vapor Arc. — 2003. — 68 p., format 140×200 mm, 100 грн./720 руб./38\$.
- Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. докл. Междунар. конф., 16–20 сент. 2002 г., пос. Кацивели, Крым / Под ред. проф. В.И. Махненко. — 266 с., формат 200×290 мм, 100 грн./720 руб./38\$.
- Laser Technologies in Welding and Materials Processing: Сб. докл. Междунар. конф., 19–23 мая 2003 г., пос. Кацивели, Крым / Под ред. проф. В. С. Коваленко. — 2003. — 256 с., формат 200×290 мм (англ. яз.), 100 грн./720 руб./38\$.
- Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. докл. Второй Междунар. конф., 13–17 сент. 2004 г., пос. Кацивели, Крым / Под ред. проф. В.И. Махненко. — 256 с., формат 200×290 мм, 100 грн./720 руб./38\$.
- Контактная сварка и другие виды сварки давлением: Сборник. Содержит подборку статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» за 2001–2005 гг., по проблемам различных видов сварки давлением. — 2005. — 128 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 75 грн./720 руб./38\$.
- Трубопроводный транспорт: Сборник. Содержит подборку статей, опубликованных в журналах «Автоматическая сварка» и «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» за 2001–2005 гг., по проблемам трубопроводного транспорта. — 2005. — 178 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 75 грн./720 руб./38\$.
- КАТАЛОГ. Технологии. Материалы. Оборудование. Содержит информацию о разработанных в последние годы в ИЭС технологиях, материалах и оборудовании для сварки, резки, наплавки, пайки, нанесения защитных покрытий и других родственных процессов, предлагаемых для коммерческой реализации. — 2005. — 260 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 100 грн./960 руб./50\$.
- ТИТАН: технологии, оборудование, производство: Сборник. Содержит подборку статей, опубликованных в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за 2001–2004 гг., по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. — 2005. — 196 с., мягкий переплет, формат 200×297 мм, 100 грн./960 руб./50\$.

Готовятся к печати в 2005 г.

- ✓ Письменный А. С. Индукционный нагрев при сварке и родственных технологиях.
- ✓ Гаращук В.П. Вступ до фізики лазерів.
- ✓ Сборник докладов Второй международной конференции «Laser Technologies in Welding and Materials Processing» (23–27 мая 2005 г., пос. Кацивели, Крым) / Под ред. проф. В. С. Коваленко, формат 200×290 мм (англ. яз.).
- ✓ Makhnenko V. I., Pochynok V. E. Strength Calculation of Welded Joints with Adjacent Sharp Cavities (англ. яз.).
- ✓ Бондарев А. А., Лозовская А. В. Атлас структур соединений при электронно-лучевой сварке легких конструкционных материалов (рус., англ. яз.).

По вопросам заказа изданий следует обращаться
в редакцию журнала «Автоматическая сварка»
Тел./факс: (38044) 261 54 03, 529 26 23, 528 04 86
E-mail: journal@paton.kiev.ua

* Цены указаны с НДС соответственно для Украины, России и дальнего зарубежья с учетом доставки заказной бандеролью.