

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, Ю. А. Стеренбоген,
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) 227 6302, 269 2623
Факс: (38044) 268 0486
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Редакторы:
Е. Н. Казарова, В. И. Котляр, Т. В. Юштина.
Электронная верстка:
И. С. Баташева, Л. Н. Герасименко,
И. Р. Наумова,
И. В. Петушков, Т. Ю. Снегирева.

Свидетельство о государственной
регистрации КВ 4788 от 09.01.2001
Журнал входит в перечень
утвержденных ВАК Украины изданий
для публикации трудов соискателей
ученых степеней.

При перепечатке материалов ссылка
на журнал обязательна.
За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности
не несет.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Кархин В. А., Ильин А. С., Плошихин В. В., Приходовский А. А. Влияние теплоты плавления алюминиевого сплава на форму и размеры сварочной ванны 3
Шейко П. П., Жерносеков А. М., Шимановский Ю. О. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с автоматической стабилизацией параметров режимов 8
Махненко В. И., Максимов С. Ю., Королева Т. В. Исследование особенностей переноса водорода при подводной сварке плавлением конструкционных сталей 12
Борисов Ю. С., Зацерковный А. С., Кривцун И. В. Математическое моделирование процесса плазменного напыления композиционных порошков с учетом экзотермической реакции синтеза материала покрытия 23
Киреев Л. С., Шурупов В. В., Пешков В. В., Бесплохотный Г. П. Влияние материала технологической оснастки на прочностные характеристики титана и его соединений при диффузионной сварке 27

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Патон Б. Е., Чепурной А. Д., Саенко В. Я., Медовар Л. Б. Перспективы производства сварных толстостенных биметаллических корпусов сосудов высокого давления 30
Лебедев В. К. Тенденции развития источников питания и систем управления (по материалам патентов США) 40
Кучук-Яценко В. С., Сахацкий А. Г., Наконечный А. А. Контактная сварка гибких серебряно-медных токоподводящих шин 49
Хорунов В. Ф., Максимова С. В., Стефанив Б. В., Караченцев Г. Г., Задирака В. Ю. Применение газопламенной пайки при изготовлении узлов охладителей пива 52

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Загорников В. И. ЭЛС корпуса пламенной трубы стационарной газовой турбины 55
Орлов Л. Н., Голякевич А. А., Новикова Д. П., Пелешко В. Н., Симоненко В. В. Порошковые проволоки для сварки и заварки дефектов литья стали 110Г13Л 57
Информация пресс-службы ИЭС. Европейская программа NOMAD по созданию роботизированной ячейки для высокопроизводительной сварки специализированных конструкций 59
Диссертации на соискание ученой степени 60
По зарубежным журналам 60
Новые книги 63

ХРОНИКА

Международная выставка и конференция в Катовице 65
Обсуждение проблемы остаточного ресурса сварных конструкций (на встрече ученых НАН Украины с журналистами) 66

ИНФОРМАЦИЯ

Национальные и международные мероприятия в области сварки и родственных технологий в 2004 г. 69

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

Каховский завод электросварочного оборудования
Опытный завод сварочных материалов ИЭС им.Е.О.Патона
Ново-Краматорский машиностроительный завод
Опытный завод сварочного оборудования ИЭС им.Е.О.Патона

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, Yu. A. Sterenbogen,
B. V. Khitrovskaya (exec. sec.),
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. Diltey (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)

Address:

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

Editors:

E. N. Kazarova, V. I. Kotlyar,
T. V. Yushina.
Electron galley:

I. S. Batasheva, L. N. Gerasimenko,
I. R. Naumova,
I. V. Petushkov, T. Yu. Snegiryova.

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

- Karkhin V. A., Iljin A. S., Ploshikhin V. V., Prikhodovsky A. A.** Effect of heat of aluminium alloy melting on shape and sizes of weld pool 3
Sheiko P. P., Zhernosekov A. M., Shimanovsky Yu. O. Pulsed-arc consumable electrode welding with automatic stabilization of condition parameters 8
Makhnenko V. I., Maksimov S. Yu., Korolyova T. V. Study of specifics of hydrogen transfer in underwater fusion welding of structural steels 12
Borisov Yu. S., Zatserkovny A. S., Krivtsun I. V. Mathematical modeling of process of plasma spraying of composite powders with allowance for exothermal reaction of synthesis of coating material 23
Kireev L. S., Shurupov V. V., Peshkov V. V., Besplokhotnyi Effect of material of technological fixture on strength characteristics of titanium and its joints in diffusion bonding 27

INDUSTRIAL

- Paton B. E., Chepurnoy A. D., Saenko V. Ya., Medovar L. B.** Prospects of production of welded thick-walled bimetal bodies of high-pressure vessels 30
Lebedev V. K. Tendencies in development of supply sources and control systems (from information of USA patents) 40
Kuchuk-Yatsenko V. S., Sakhatsky A. G., Nakonechnyi A. A. Resistance welding of flexible silver-copper current-carrying busbars 49
Khorunov V. F., Maksimova S. V., Stefaniv B. V., Karachentsev G. G., Zadiraka V. Yu. Application of thermal brazing in manufacture of units of beer coolers 52

BRIEF INFORMATION

- Zagornikov V. I.** EBW of flame tube of stationary gas turbine 55
Orlov L. N., Golyakevich A. A., Novikova D. P., Peleshko V. N., Simonenko V. V. Flux-cored wires for welding and welding-up of defects of 110G13L steel castings 57
Information of press service of PWI. European program NOMAD for the creation of robotic cell for high-efficient welding of specialized structures 59
Theses for scientific degree 60
Review of foreign journals 60
New books 63

NEWS

- International Exhibition and Conference in Katowice 65
Discussion of problems of residual life of welded structures (at the meeting of scientists of the NAS of Ukraine with journalists) 66

INFORMATION

- National and international events in the field of welding and allied technologies in 2004 69

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.



ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОТЫ ПЛАВЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА НА ФОРМУ И РАЗМЕРЫ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ

В. А. КАРХИН, д-р техн. наук, **А. С. ИЛЬИН**, инж. (С.-Петербург. гос. политехн. ун-т, РФ),
В. В. ПЛОШИХИН, **А. А. ПРИХОДОВСКИЙ**, инженеры (Новые материалы Байройт ГмбХ, Германия)

Разработан алгоритм решения квазистационарной температурной задачи с учетом теплоты плавления и затвердевания (кристаллизации), основанный на методе источников (функций Грина). На примере сварки тонких алюминиевых пластин показано, что теплота плавления оказывает существенное влияние на форму и размеры сварочной ванны и твердой зоны. Отмечено, что термический КПД процесса проплавления η пластины линейным источником может значительно превышать 0,4839 при учете теплоты плавления. Известные упрощенные методы учета теплоты плавления могут привести к значительным ошибкам при определении η . Приведено сравнение между расчетной и экспериментальной формой сварочной ванны.

Ключевые слова: сварка плавлением, уравнение теплопроводности, теплота плавления, сварочная ванна, расчет, метод источников

При анализе термических процессов обычно используют известные аналитические решения температурной задачи, которые не учитывают влияние теплоты фазовых переходов [1–3]. Достоинством таких решений является обобщенность и простота реализации, недостатком — значительная погрешность результатов расчета в высокотемпературной области. Если теплота фазовых переходов в твердом состоянии относительно мала и ею можно пренебречь, то доля теплоты плавления в теплоемкости жидкого металла может достигать 40 % и более (например, в случае алюминиевых сплавов). Численные методы позволяют учитывать теплоту плавления и затвердевания (кристаллизации) [4–6]. Однако опубликованные результаты исследований имеют, как правило, частный характер, вследствие чего трудно выявить общие закономерности и ответить на вопрос: когда можно не учитывать теплоту плавления и какова при этом погрешность расчета.

Цель настоящего исследования — анализ влияния теплоты плавления и затвердевания на температурные поля при стыковой сварке тонких алюминиевых пластин и оценка погрешности расчета размеров и формы сварочной ванны при косвенном учете или неучете теплоты плавления.

Решение температурной задачи с учетом теплоты плавления. Сформулируем температурную задачу при следующих допущениях: тело представляет собой однородную неограниченную пластину без перепада температуры по ее толщине h (температурное поле двухмерное); свойства материала (теплопроводность λ , удельная теплоемкость c , плотность ρ и коэффициент поверхностной теплоотдачи α) не зависят от температуры T ; температурный интервал фазового перехода известен, теплота затвердевания равна теплоте плавления, а теплота превращений в твердой фазе не учитывается; источник теплоты движется прямоли-

нейно вдоль оси x с постоянной скоростью v (рис. 1); в подвижной системе координат x, y , связанной с источником теплоты, температурное поле не изменяется (поле квазистационарно); конвективные потоки в жидкой ванне отсутствуют; теплообмен с окружающей средой происходит по закону Ньютона; температура среды постоянна и равна начальной температуре T_0 . Тогда уравнение баланса энергии в подвижной системе координат имеет вид

$$\lambda \nabla^2 T + \rho r \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{2\alpha}{h} (T - T_0) + \frac{q_2}{h} = 0, \quad (1)$$

где $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ — оператор Лапласа; q_2 — плотность эффективной мощности поверхностного источника; H — энтальпия.

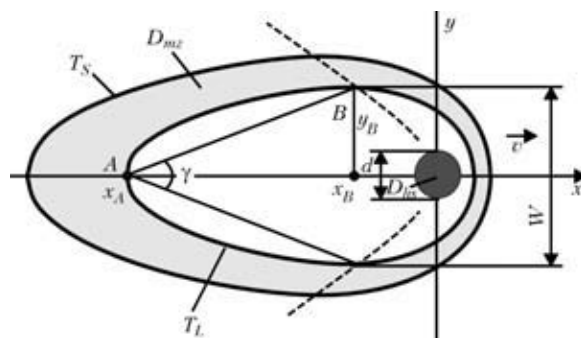


Рис. 1. Схема сварочной ванны и источника теплоты (штриховые линии отделяют зону нагрева от зоны охлаждения; обозначения см. в тексте)

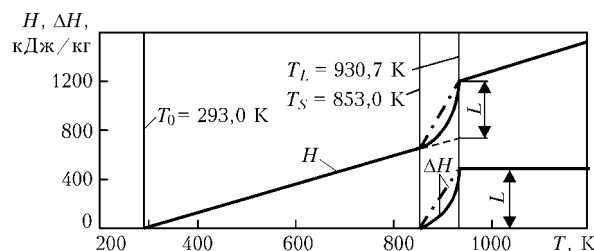


Рис. 2. Температурные зависимости энтальпии H и теплоты плавления ΔH для алюминиевого сплава Al-0,5 % Si (штрихпунктирные линии — упрощенные зависимости)



Выделим из энтальпии H теплоту плавления ΔH (рис. 2):

$$H(T) = c(T - T_0) + \Delta H(T), \quad 0 \leq \Delta H(T) \leq L, \quad (2)$$

где L — полная теплота плавления.

Подставив уравнение (2) в (1), получим

$$\lambda \nabla^2 T + v \rho c \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{2\alpha}{h} (T - T_0) + \frac{q_2}{h} + v \rho \frac{\partial \Delta H}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

Это дифференциальное уравнение является нелинейным (из-за последнего члена, нелинейно зависящего от температуры) и может быть преобразовано методом источников (методом функции Грина) в интегральное уравнение, которое решается с заданной точностью методом итераций

$$T^{(i)}(x, y) - T_0 = \iint_{D_{hs}} q_2(\xi, \eta) f(x, y, \xi, \eta) d\xi d\eta + v \rho h \iint_{D_{mz}} \frac{\partial \Delta H^{(i)}}{\partial x}(\xi, \eta) f(x, y, \xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (4)$$

где

$$f(x, y, \xi, \eta) = \frac{1}{2\pi\lambda h} \exp\left[-\frac{v(x-\xi)}{2a}\right] K_0 \times \left(\beta \frac{v\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}}{2a}\right), \quad \beta = \sqrt{1 + \frac{8a\alpha}{c\rho h v^2}}.$$

Здесь D_{hs} — область действия источника теплоты ($q_2 \neq 0$); D_{mz} — область твердой фазы ($\partial \Delta H / \partial x \neq 0$) (см. рис. 1); i — номер итерации; f — функция Грина (температура в точке x, y от подвижного линейного источника единичной мощности, действующего в точке ξ, η); a — температуропроводность; K_0 — функция Макдональда; β — критерий влияния теплоотдачи на подвижное температурное поле. Функция K_0 бесконечна в точке $x = \xi, y = \eta$, поэтому интегри-

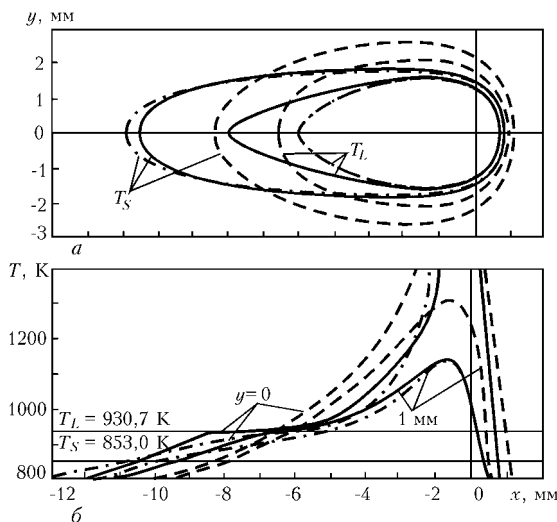


Рис. 3. Влияние теплоты плавления на форму сварочной ванны (а) и распределение температуры (б) при сварке алюминиевого сплава: сплошные кривые — зависимость $\Delta H(T)$ нелинейная; штрихпунктирные — $\Delta H(T)$ линейная; штриховые — теплота плавления не учитывается, $\Delta H(T) = 0$

рование вблизи этой сингулярной точки рекомендуется выполнять численно методом Гаусса в полярной системе координат [7].

Построим итерационный процесс, взяв за основу алгоритм из работы [8]:

1) на i -й итерации по распределению $\Delta H^{(i)}$ последовательно определяется $\partial \Delta H^{(i)} / \partial x$ и по уравнению (4) вычисляется температура $T^{(i)}$;

2) на следующей ($i + 1$)-й итерации вычисляется $\Delta H^{(i+1)}$ с учетом ограничений:

$$\begin{aligned} \Delta H^{(i+1)} &= \Delta H^{(i)} + \omega c [T^{(i)} - T(\Delta H^{(i)})]; \\ \Delta H^{(i+1)} &= \max[0, \Delta H^{(i+1)}]; \\ \Delta H^{(i+1)} &= \min[L, \Delta H^{(i+1)}], \end{aligned} \quad (5)$$

где ω — итерационный параметр, $\omega > 0$; $T(\Delta H)$ — обратная функция (T — функция теплоты плавления ΔH). Из сходимости итерационного процесса ($\Delta H^{(i+1)} = \Delta H^{(i)}$) следует выполнение условия фазового превращения $T = T(\Delta H)$.

Отметим, что теплота затвердевания может отличаться от теплоты плавления, например при легировании сварочной ванны присадочным материалом. Это может быть учтено в уравнениях (4) и (5). Влияние ограниченности пластины по ширине несложно учесть методом отражения [2].

Пример. Рассмотрим температурное поле при лазерной сварке алюминиевого сплава, содержащего 0,5 % Si. Его свойства и режимы лазерной сварки представлены ниже.

Свойства алюминиевого сплава Al-0,5 % Si и режим лазерной сварки

Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	215
Плотность ρ , кг/м ³	2710
Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·К)	1085
Температура солидуса T_S , К	853
Температура ликвидуса T_L , К	930,7
Теплота плавления L , кДж/кг	460
Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м ² ·К)	50
Толщина пластины h , мм	1,5
Эффективная мощность q_{net} , Вт	1450
Диаметр пятна нагрева d , мм	0,5
Скорость сварки v , мм/с	46,67
Начальная температура T_0 , К	293

Теплопроводность определяли лазерным методом. С помощью программы Thermo-Calc [9] и базы данных [10] вычисляли температуру солидуса T_S и ликвидуса T_L , а также c и $\Delta H(T)$. При этом использована модель Гулливера–Шайля [11], а также предполагалась полная химическая однородность жидкой фазы и отсутствие диффузии в твердой фазе. Безразмерная теплота плавления

$$\Lambda = \frac{L}{c(T_L - T_0)}$$

составляла 0,6648, что соответствовало 40 % теплоты плавления в теплосодержании металла при T_L . Эффективную мощность определяли путем решения соответствующей обратной задачи теплопроводности [12, 13]. Низкое значение критерия Прандтля ($Pr < 0,01$) указывает на то, что в жидкой фазе теплота распространяется преимущественно за счет теплопроводности.

При большой скорости сварки алюминиевого сплава сварочная ванна вытянута (рис. 3, а). Длина

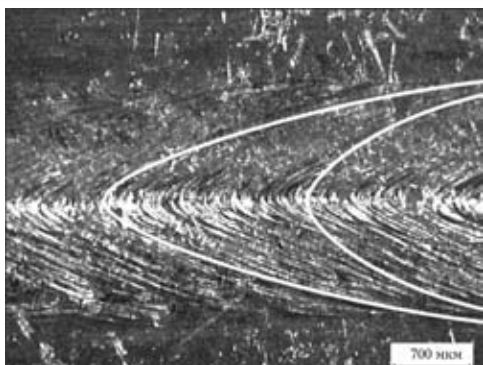


Рис. 4. Внешний вид сварного шва при лазерной сварке алюминиевого сплава со скоростью 46,67 мм/с. На шов нанесены изотермы ликвидуса, рассчитанные с учетом линейной (правая изотерма) и нелинейной (левая изотерма) температурной зависимости теплоты плавления

ванны (изотермы ликвидуса) и особенно ширина твердожидкой зоны в хвостовой части ванны чувствительны к виду температурной зависимости теплоты плавления $\Delta H(T)$. При нелинейной зависимости $\Delta H(T)$ градиент температуры перед фронтом затвердевания мал (рис. 3, б), ванна имеет более вытянутую форму, а ширина твердожидкой зоны более узкая, чем при упрощенной линейной зависимости $\Delta H(T)$ (рис. 3, а).

При сравнении расчетных изотерм ликвидуса с экспериментальными данными, представленными на рис. 4, видно, что нелинейная зависимость теплоты плавления лучше соответствует заостренной форме хвостовой части сварочной ванны (видимым «чешуйкам» на поверхности шва). Похожая расчетная каплевидная форма сварочной ванны получается при лазерной сварке алюминиевого сплава Al-0,4% Mg-1,2% Si со скоростью 117 мм/с, если учитывается нелинейная зависимость доли жидкой фазы от температуры [5].

Отметим, что вид зависимости $\Delta H(T)$ может быть весьма сложным (он зависит от распределения ливирующих элементов и вида равновесной фазовой диаграммы, возможен скачок при температуре образования эвтектики). Любая зависимость $\Delta H(T)$ может быть учтена в (4) по формуле

$$\partial \Delta H / \partial x = (\partial \Delta H / \partial T) \cdot (\partial T / \partial x).$$

Варьирование итерационного параметра ω в (5) показало, что наибольшая скорость сходимости (десятки итераций, когда на последней итерации температура в любой точке изменяется не более чем на 0,01 К) обеспечивается при $\omega = 0,6 \dots 1,2$ (чем больше нелинейность $\Delta H(T)$, тем меньше ω).

Влияние теплоты плавления на ширину шва. Теплота плавления приводит к значительному уменьшению ширины сварочной ванны. Это практически не зависит от вида функции $\Delta H(T)$ (см. рис. 3, а): ширина шва составляет 3 мм при линейной зависимости $\Delta H(T)$ и 3,04 мм — при нелинейной. Ширина шва W также практически не зависит от диаметра равномерно распределенного источника d , если $W > 2d$. Например, изменение d от 0,5 мм до нуля приводит к уменьшению W на 2%. По этой причине далее принимается сос-

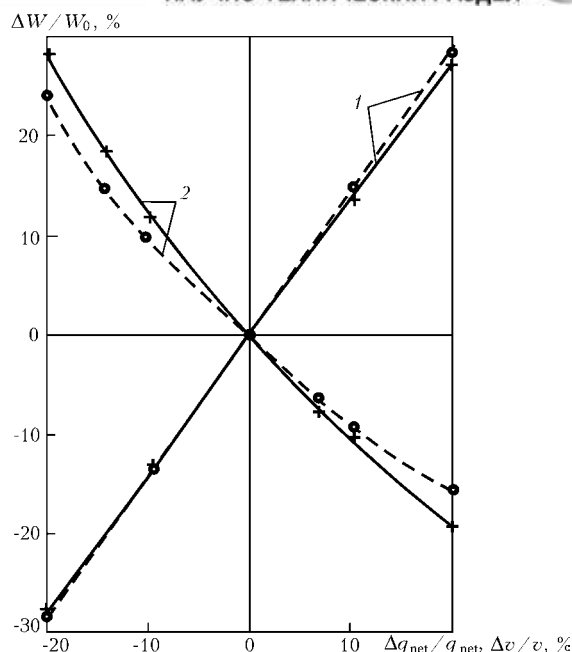


Рис. 5. Зависимость относительного изменения ширины шва $\Delta W/W_0$ от относительного изменения эффективной мощности $\Delta q_{net}/q_{net}$ (1) и скорости $\Delta v/v$ (2) при сварке алюминиевого сплава: сплошные кривые — теплота плавления учитывается, штриховые — не учитывается; средние точки соответствуют ширине W_0 и режиму сварки, приведенным выше

редоточенный линейный источник ($d = 0$) и линейная зависимость $\Delta H(T)$.

При сварке неизбежны случайные отклонения размеров шва от заданных. Для систем управления процессом сварки необходимо получить зависимости размеров шва от параметров регулирования (мощности источника и скорости сварки). Учет скрытой теплоты плавления усложняет и замедляет получение таких зависимостей. Возникает вопрос: в каких случаях можно пренебречь скрытой теплотой? Из рис. 5 видно, что изменение значений мощности в пределах 20% приводит к прямо пропорциональному изменению ширины шва, причем коэффициент чувствительности $\partial(W/W_0)/\partial q_{net}$ (угол наклона прямой) зависит от теплоты плавления несущественно (здесь W_0 — ширина шва при средней мощности). Например, теплота плавления алюминиевого сплава уменьшает коэффициент чувствительности на 2%. В то же время коэффициент чувствительности относительно скорости $\partial(W/W_0)/\partial v$ непостоянен и также слабо зависит от теплоты плавления (рис. 5). Отсюда следует, что при вычислении коэффициентов чувствительности теплотой плавления можно пренебречь. Этот вывод справедлив и для трехмерного случая [6].

Влияние теплоты плавления на термический КПД. Основной характеристикой эффективного использования вводимой энергии является термический КПД (термическая эффективность) процесса проплавления η_t . Эта величина выражает отношение теплоты, затраченной на нагрев металла до T_L , к эффективной (введенной) энергии q_{net} [2]:

$$\eta_t = \frac{v A_L \rho H(T_L)}{q_{net}},$$

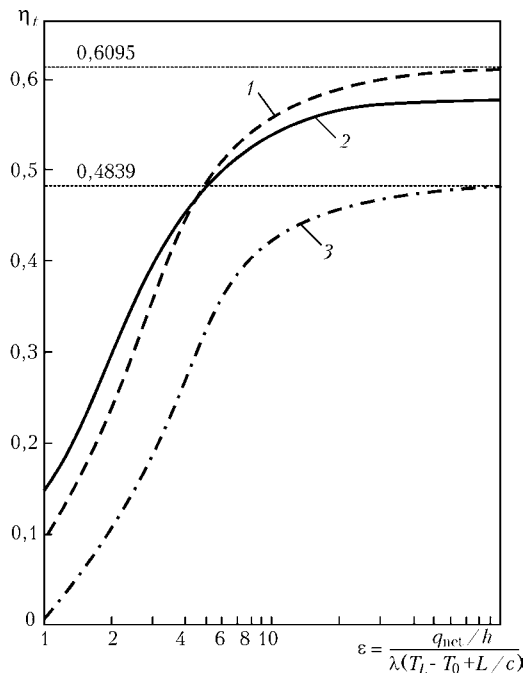


Рис. 6. Влияние теплоты плавления на термический КПД процесса проплавления при сварке теплоизолированных пластин из алюминиевого сплава линейным источником: 1, 3 – решение линейной задачи при условии изменения соответственно эффективной мощности и свойств; 2 – решение нелинейной задачи по (4)

где A_L – площадь поперечного сечения зоны, нагретой до T_L . Для случая сварки пластины и принятой зависимости $H(T)$ (см. рис. 2) имеем

$$\eta_t = \frac{vWh\rho[c(T_L - T_0) + L]}{q_{net}} \quad (6)$$

Проанализируем влияние теплоты плавления на термический КПД при сварке теплоизолированных пластин ($\beta = 1$). Все кривые на рис. 6 получены при варьировании мощности q_{net} (остальные условия приведены на с. 4).

Кривая 2 построена в результате решения нелинейной задачи (3) изложенным методом (уравнения (4) и (5)). Видно, что значение η_t может намного превышать $(\pi e/2)^{-1/2} = 0,4839$. Дополнительное варьирование скорости в широком диапазоне (10...50 мм/с при $\epsilon_1 = 5...30$) практически не изменяет значения термического КПД.

Решение (3) связано с определенными трудностями из-за последнего нелинейного члена $\partial\Delta H/\partial x$, учитывающего теплоту плавления. Возникает вопрос: можно ли исключить этот член (принять $\partial\Delta H/\partial x = 0$), а в оставшемся линейном уравнении приближенно учесть теплоту плавления L по одному из вариантов: изменением коэффициентов в уравнении (свойств материала) или изменением вводимой энергии q_2 ? Оценим погрешность этих двух приближенных методов учета теплоты плавления.

В первом варианте заменим в (3) теплоемкость c на $\bar{c} = c + L/(T_L - T_0)$ и теплопроводность λ на $\bar{\lambda} = \lambda + \alpha\rho L/(T_L - T_0)$, так чтобы температуропроводность a и, следовательно, критерий Пекле Pe не изменились ($a = \lambda/(c\rho) = \bar{\lambda}/(\bar{c}\rho)$ и $Pe = vx/a = const$). Следует заметить, что такая за-

мена равносильна учету теплоты плавления в теплосодержании металла при T_L . Иными словами, $\bar{c}(T_L - T_0) = H(T_L)$, где $H(T_L)$ – заданная энтальпия при T_L (см. рис. 2). Тогда (3) приобретает вид

$$\bar{\lambda}\nabla^2 T + v\rho\bar{c} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{2\alpha}{h}(T - T_0) + \frac{q_2}{h} = 0. \quad (7)$$

Если источник линейный сосредоточенный ($d = 0$) и расположен в начале координат, то решением уравнения (7) является выражение

$$T(x, y) - T_0 = q_{net}f(x, y, 0). \quad (8)$$

Это решение позволяет построить функцию η_t от аргумента

$$\epsilon = \frac{q_{net}/h}{\bar{\lambda}(T_L - T_0)} = \frac{q_{net}/h}{\lambda(T_L - T_0 + L/c)}$$

Кривая 3 на рис. 6 не зависит от скорости и одина для всех материалов с различными значениями теплоты плавления. Этот подход используется в работе [2].

Во втором варианте энергию, идущую на плавление металла и распределенную по фронту плавления, отнесем к центру источника, т. е. формально заменим мощность на $q_{net} - vWh\rho L$ и воспользуемся уравнением (8). Далее определим ширину шва методом итераций и термический КПД по (6) (рис. 6, кривая 1).

Значение асимптоты при таком подходе можно найти аналитически, пользуясь схемой быстро движущегося линейного источника. Ширина шва при отсутствии теплоотдачи определяется по формуле

$$W = \frac{q_{net}/(vh)}{\sqrt{\pi e/2} c\rho(T_L - T_0) + \rho L}$$

Подставляя это выражение в (6), получим

$$\eta_t = \frac{1 + \Lambda}{\sqrt{\pi e/2} + \Lambda}$$

Из этой формулы следует, что значения термического КПД возрастают с увеличением Λ (например, за счет температуры подогрева T_0). Значение асимптоты для алюминиевого сплава составляет 0,6095.

Из рис. 6 видно, что кривые 1–3 не совпадают. Точность второго подхода (кривая 1) значительно выше. Первый подход дает явно заниженные результаты (кривая 3). Отметим, что дополнительное повышение термического КПД может произойти за счет распределенно-теплого источника в поперечном направлении.

Влияние теплоты плавления на форму фронта затвердевания. Зеренная структура металла шва определяется формой фронта кристаллизации, имеющей угол γ [14] (см. рис. 1):

$$\gamma = 2 \arctg \frac{y_B}{x_B - x_A} \quad (9)$$

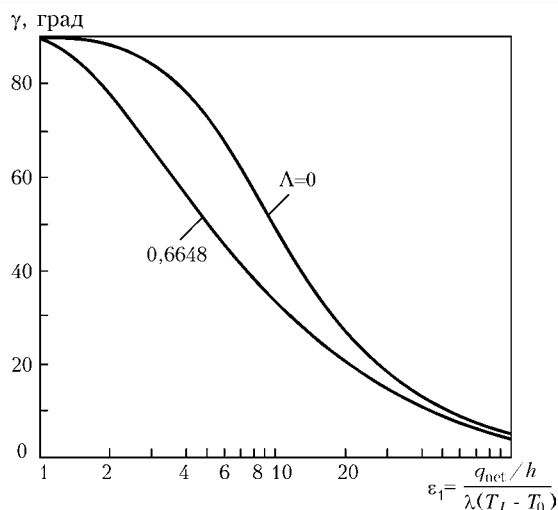


Рис. 7. Влияние теплоты плавления на угол фронта затвердевания при сварке теплоизолированных пластин из алюминиевого сплава линейным источником

Из условия $T(x_B, y_B) = T_L$ и $\partial T / \partial x(x_B, y_B) = 0$ можно найти координату точки B , а из $T(x_A, 0) = T_L$ — координату точки A и, следовательно, угол γ по (9).

Угол фронта кристаллизации γ тем меньше, чем больше мощность источника (рис. 7). Теплота плавления влияет в значительной степени на уменьшение значений γ (отношение ширины ванны к длине хвостовой части ванны).

Отметим, что разработанная методика может учитывать теплоту любых фазовых переходов (например, $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -превращений в стали). Аналогичная расчетная методика может быть разработана для анализа трехмерного температурного поля с учетом теплоты плавления. Принципиальные отличия будут в виде дифференциального уравнения (3) и решения (4) (отличаются функцией Грина f).

Выводы

1. Предложенный алгоритм решения квазистационарного уравнения теплопроводности аналитическим методом источников позволяет учитывать влияние теплоты плавления и затвердевания на температурные поля при сварке.

2. Теплота плавления уменьшает ширину шва. Относительное изменение ширины шва при вариации вводимой энергии или скорости сварки в пределах 20 % зависит от теплоты плавления незначительно. При этом зависимость от энергии носит линейный характер, от скорости — нелинейный.

3. Вид температурной зависимости теплоты плавления оказывает существенное влияние на ширину твердожидкой зоны и форму фронта затвер-

An algorithm is developed for solving the quasistationary temperature problem, taking into account the heat of melting and solidification, based on the method of sources (Green function). The case of welding thin aluminum plates is used to demonstrate, that the melting heat has a significant influence on the shape and dimensions of the weld pool and solid-liquid zone. It is noted, that the thermal efficiency of the process of melting η , of a plate by a linear source can be much higher than 0.4839, allowing for the melting heat. Known simplified methods of allowing for the melting heat may lead to considerable errors in η , determination. A comparison of the calculated and experimental shape of the weld pool is given.

девания жидкого металла. Так, при лазерной сварке алюминиевого сплава Al-0,5 % Si со скоростью 47 мм/с сварочная ванна имеет каплевидную форму.

4. С учетом теплоты плавления значения термического КПД процесса проплавления пластины линейным источником может значительно превышать 0,4839. Известные упрощенные методы учета влияния теплоты плавления могут привести к значительным ошибкам. Из них более точным является метод, связанный с уменьшением эффективной (вводимой) энергии на величину, идущую на плавление металла.

5. С увеличением теплоты затвердевания угол фронта затвердевания уменьшается.

6. Совпадение между расчетной и экспериментальной формой сварочной ванны удовлетворительное.

1. Rosenthal D. Etude theorique du regime thermique pendant la soudure a l'arc // II Congres National des Sciences. — Bruxelles, 1935. — P. 1277-1292.
2. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
3. Махиенко В. И., Кравцов Т. Г. Тепловые процессы при механизированной наплавке деталей типа круговых цилиндров. — Киев: Наук. думка, 1976. — 159 с.
4. Kou S. Simulation of heat flow during the welding of thin plates // Metallurgical Transactions A. — 1981. — 12A, Dec. — P. 2025-2030.
5. Bergmann H. W., Hilbinger R. M. Numerical simulation of centre line hot cracks in laser beam welding of aluminium close to the sheet edge // Mathematical modelling of weld phenomena 4 / Ed. H. Cerjak. — London, 1998. — P. 658-668.
6. Tosello I., Tissot F. X., Barras M. Modelling of weld behaviour for the control of the GTA process by computer aided welding // Ibid. — P. 80-103.
7. Ramachandran P. A. Boundary element methods in transport phenomena // Computational mechanics publications. — London: Elsevier Applied Science, 1994. — 406 p.
8. Prakash C., Samonds M., Singhal A. K. A fixed grid numerical methodology for phase change problems involving a moving heat source // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. — 1987. — 30, № 12. — P. 2690-2694.
9. Thermo-Calc & DICTRA, computational tools for materials science / J.O. Andersson, T. Helander, L. Hoglund // Calculation of phase diagrams. — 2002. — 26. — P. 273-312.
10. COST 507 — Final Report: Thermochemical database for light metal alloys (Vol. 2) / Ed. I. Ansara, A. T. Dinsdale, M. H. Rand. — European Communities, 1998.
11. Saunders N., Miodownik A. P. Calculation of phase diagrams // A comprehensive guide. Pergamon Materials Series. — Oxford; New York; Tokyo: Elsevier Science, 1998. — Vol. 1.
12. Inverse modelling of fusion welding processes / V. A. Karkhin, V. V. Plochikhine, A. S. Ilyin, H. W. Bergmann // Mathematical modelling of weld phenomena 6 / Ed. H. Cerjak. — London: Maney publ., 2002. — P. 1017-1042.
13. Кархин В. А., Пlochихин В. В., Бергман Х. В. Моделирование тепловых и кристаллизационных процессов при лазерной сварке алюминиевых пластин // Автомат. сварка. — 2002. — № 8. — С. 11-15.
14. Plochikhine V., Bergmann H. W. Correlation between the welding parameters and the grain structure for the fast moving high power line heat source in a thin plate // Mathematical modelling of weld phenomena 5 / Ed. H. Cerjak. — London, 2001. — P. 269-281.

Поступила в редакцию 05.02.2003



ИМПУЛЬСНО-ДУГОВАЯ СВАРКА ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ

П. П. ШЕЙКО, канд. техн. наук, А. М. ЖЕРНОСЕКОВ, Ю. О. ШИМАНОВСКИЙ, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты исследований разработанной двухконтурной системы автоматической стабилизации средних значений напряжения на дуге и сварочного тока процесса импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом (ИДСПЭ) с воздействием на параметры импульсов источника питания и скорость подачи электродной проволоки соответственно. Изучено раздельное и совместное влияние возмущающих производственных факторов (изменения вылета электродной проволоки, уменьшения напряжения питающей сети) на процесс ИДСПЭ углеродистых сталей и качество металла швов.

Ключевые слова: импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом, возмущающие факторы, углеродистые конструкционные стали, стабилизация процесса, средние значения напряжения на дуге, средние значения сварочного тока, обратные связи, параметры режимов, качество швов

Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом (ИДСПЭ) в смесях газов на основе аргона эффективно применяется во многих отраслях промышленности развитых стран. Этот способ позволяет уменьшать разбрызгивание электродного металла, а также выполнять сварку во всех пространственных положениях, сварку тонколистового металла и многопроходную. Необходимо отметить высокие механические свойства металла швов, полученным способом ИДСПЭ, что обусловлено измельчением микроструктуры с образованием в ней игольчатого феррита [1–7].

В производственных условиях процесс ИДСПЭ подвержен влиянию различных возмущающих факторов [8, 9], которые изменяют основные энергетические параметры сварки — средние значения сварочного тока $I_{св.ср}$ и напряжения на дуге $U_{д.ср}$,

что приводит к нестабильности геометрических размеров швов и появлению в них дефектов.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан новый вариант построения систем стабилизации процесса ИДСПЭ [9]. В настоящей работе приведены результаты исследований влияния на стабильность показателей качества процесса ИДСПЭ при действии на него как отдельных возмущающих факторов (изменения вылета электродной проволоки, напряжения питающей сети, превышение высоты кромок), так и их одновременном комплексном действии разработанной двухконтурной системы автоматической стабилизации средних значений напряжения на дуге и сварочного тока с воздействием на параметры импульсов тока источника питания и скорость подачи электродной проволоки соответственно. При этом использовался разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона импульсный источник питания с плавной регулировкой параметров импульсов типа И-169. В экспериментах применяли сварочную головку типа ГСУ-7 с системой управления БАРС-2В. Наплавку выполняли на плас-

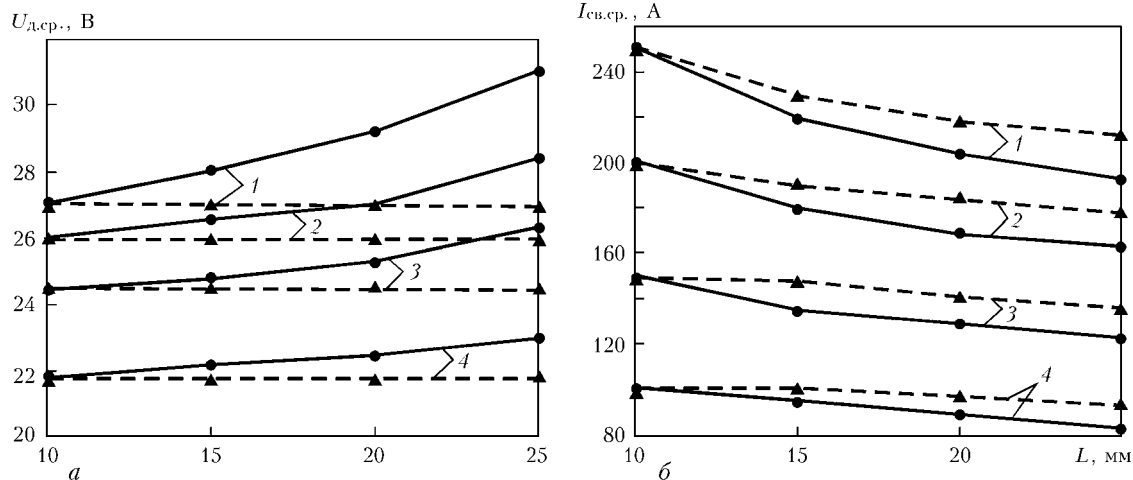


Рис. 1. Зависимость средних значений напряжения на дуге $U_{д.ср}$ (а) и сварочного тока $I_{св.ср}$ (б) (режимы 1–4) от вылета электрода $L = 10...25$ мм при ИДСПЭ стали Ст3 в смеси газов 82 % Ar + 18 % CO₂ проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм без системы стабилизации (●) и со стабилизацией напряжения и тока (▲)

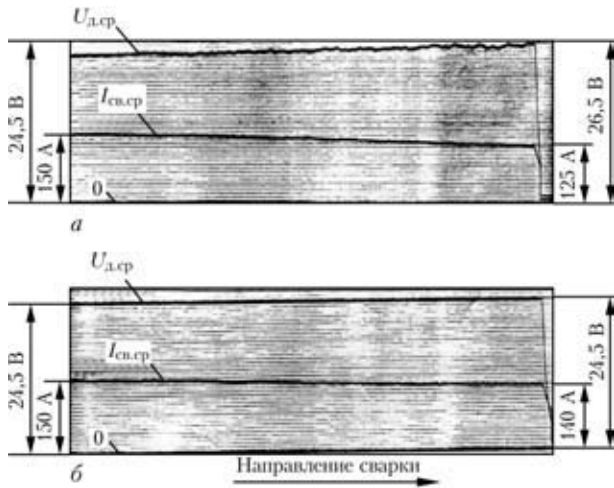


Рис. 2. Осциллограммы средних значений сварочного тока $I_{св.ср}$ и напряжения на дуге $U_{д.ср}$ при изменении вылета электродной проволоки в пределах 10...25 мм без системы стабилизации (а) и со стабилизацией напряжения и тока (б)

тины из стали Ст3 толщиной 10; 20 мм в смеси 82 % Ag + 18 % CO₂ проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм, скорость сварки составляла 21 м/ч.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены зависимости между основными энергетическими параметрами процесса ИДСПЭ ($U_{д.ср}$, $I_{св.ср}$) и наиболее часто действующим в производственных условиях возмущающим фактором — изменением вылета электродной проволоки L . Семейство этих зависимостей, полученных при различных значениях $U_{д.ср}$, $I_{св.ср}$, L при ИДСПЭ без системы стабилизации и со стабилизацией, представлено на рис. 1. На рисунке кривые 1 (●) показывают характер и пределы изменения значений $U_{д.ср}$, $I_{св.ср}$ без применения системы стабилизации (начальные значения $U_{д.ср} = 27$ В; $I_{св.ср} = 250$ А). При этом сварочный ток уменьшается до 195 А. Как видно из рис. 1, изменение $U_{д.ср}$ составило 4 В, а $I_{св.ср}$ — 55 А при максимальном вылете электродной проволоки 25 мм. Кривые 1 (▲) иллюстрируют те же зависимости при тех же начальных условиях, но при использовании системы автоматической стабилизации. Значения $U_{д.ср}$ практически не изменились, а значения $I_{св.ср}$ изменились максимум на 35 А при $L = 25$ мм.

Такие же зависимости $U_{д.ср} = f(L)$, $I_{св.ср} = f(L)$ получены также для других начальных значений $U_{д.ср}$, $I_{св.ср}$ (см. рис. 1). Характер зависимостей аналогичен, как и в случае $U_{д.ср} = 27$ В, $I_{св.ср} = 250$ А. При работе на более низких режимах точность стабилизации повышается.

На рис. 2 приведены осциллограммы $I_{св.ср}$ и $U_{д.ср}$ процесса ИДСПЭ при изменении вылета электродной проволоки L в пределах 10...25 мм. Длительность импульсов тока составляла $3,4 \cdot 10^{-3}$ с, частота их следования — 68 Гц. Как видно из рис. 2, а, увеличение вылета электродной проволоки приводит к повышению напряжения на дуге и уменьшению тока сварки. Причем изменения напряжения на дуге заметно возрастают в конце процесса, поскольку происходит существенное падение напряжения на вылете электродной проволоки, что ха-



Рис. 3. Внешний вид швов при наплавке способом ИДСПЭ в случае изменения вылета электрода в пределах 10...25 мм (а, б — см. рис. 2)

рактерно для стальных проволок [10]. Использование обратных связей позволяет уменьшить влияние вылета электродной проволоки, стабилизировать заданные значения $U_{д.ср}$ и уменьшить снижение значений $I_{св.ср}$ (рис. 2, б). Внешний вид швов, выполненных на указанном выше режиме, приведен на рис. 3. Шов на рис. 3, а имеет неравномерное формирование по длине, в конце шва расположен участок пор, выходящих на поверхность. Это обусловлено повышением напряжения на дуге, что свидетельствует о ее удлинении при увеличении вылета электродной проволоки. Шов на рис. 3, б, выполненный с системой стабилизации, отличается отсутствием пор и других дефектов, стабильной шириной и равномерным формированием по всей длине.

На рис. 4 представлены продольные разрезы швов, показанных на рис. 3. Из рис. 4, а видно, что глубина проплавления нестабильна, ее изменение зависит от вылета электродной проволоки. При этом имеют место непровары или прожоги, а также дефекты типа внутренних пор. Особенно важным результатом данной работы для сварки в производственных условиях является то, что применение разработанной системы автоматической стабилизации позволяет при изменении вылета электродной проволоки стабилизировать глубину

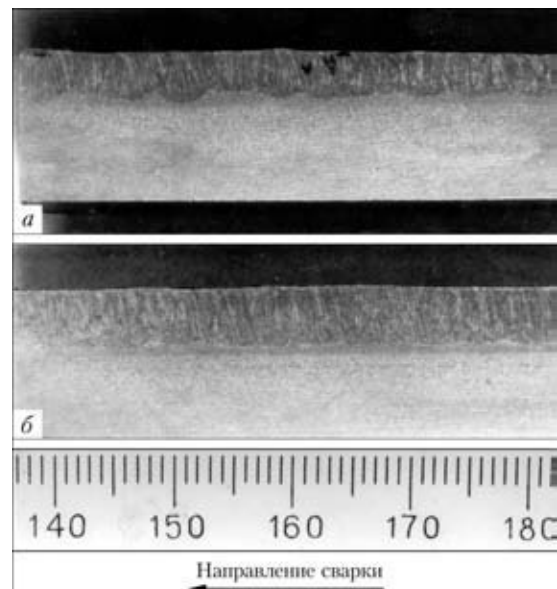


Рис. 4. Изменения глубины проплавления швов, выполненных способом ИДСПЭ при увеличении вылета электродной проволоки (а, б — см. рис. 2)

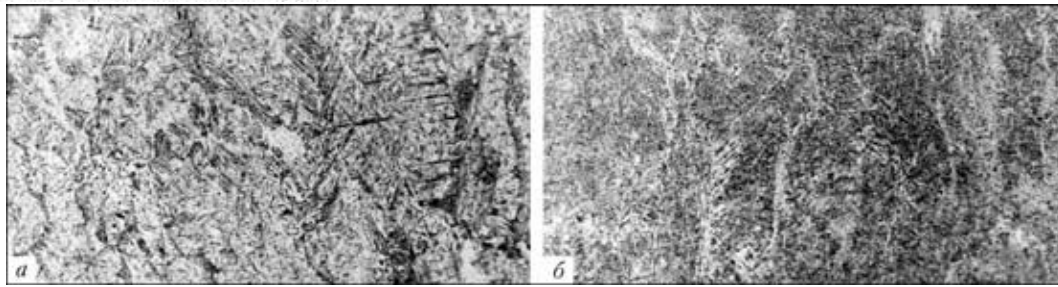


Рис. 5. Микроструктура ($\times 200$) участка в центре металла шва (ближе к окончанию наплавки), выполненного способом ИДСПЭ (*a, б* – см. рис. 2)

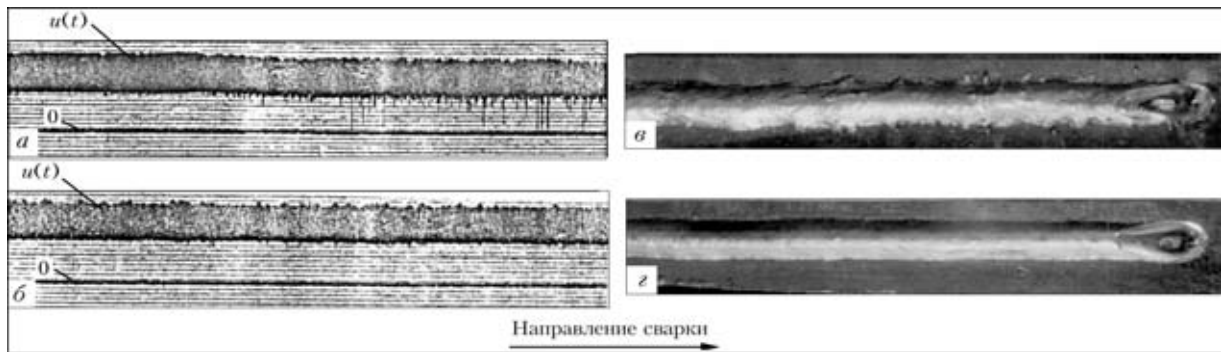


Рис. 6. Осциллограммы текущих значений напряжения (*a, б*) на дуге $u(t)$ и внешний вид швов, полученных способом ИДСПЭ при плавном снижении напряжения от 380 до 350 В без системы стабилизации (*a, в*) и со стабилизацией напряжения и тока (*б, з*)

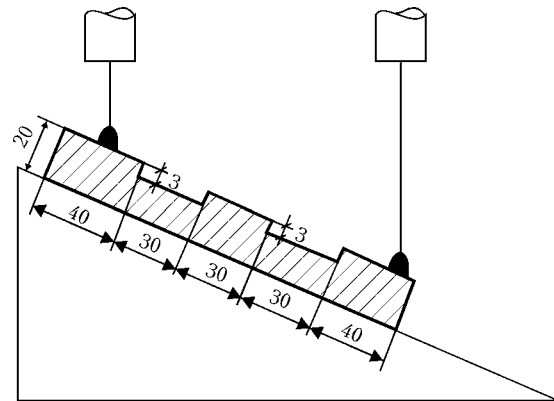


Рис. 7. Схема проведения наплавки при одновременном действии нескольких возмущающих факторов

проплавления по всей длине шва и исключить появление в нем дефектов (рис. 4, б).

Проведенные металлографические и рентгенографические исследования позволяют заключить, что при увеличении вылета электрода более чем на 50 % номинального существенно увеличивается вероятность появления дефектов типа трещин, неплавления, нестабильной ширины шва и глубины провара. Кроме того, увеличивается количество мартенситной составляющей в металле шва (рис. 5, *a*) и уменьшается балл зерна в зоне термического

влияния до 5 (по ГОСТ 5639–82), что приводит к увеличению твердости металла шва и уменьшению его вязкости. При увеличении вылета электродной проволоки на 80 % и выше номинального значения возрастает вероятность появления грубых дефектов типа пор (см. рис. 3, *a*).

При работе системы стабилизации отмечаются равномерная чешуйчатость и плавный переход к основному металлу даже при изменении вылета более чем на 80 % (см. рис. 3, *б*). Микроструктурные составляющие в данном случае мелкодисперсные и однородные по всей длине шва, состоящие из верхнего и нижнего бейнита с участками феррита (см. рис. 5, *б*). Балл зерна в зоне термического влияния равен 8 (по ГОСТ 5639–82).

Для исследования влияния изменений напряжения питающей сети на процесс ИДСПЭ применяли потенциал-регулятор, осуществляющий плавную регулировку выходного напряжения, которое использовали как входное напряжение импульсного источника питания И-169. В таблице представлены изменения режимов наплавки при снижении напряжения питающей сети. На рис. 6, *a, б*, приведены осциллограммы текущих значений напряжения на дуге $u(t)$ при плавном снижении напряжения сети от 380 до 350 В. Как видно из рис. 6, *a*, уменьшение напряжения сети приводит к снижению напряжения на дуге и возникновению коротких замыканий, т. е. к нарушению процесса переноса по принципу «1 импульс–1 капля». Внешний вид швов, наплавленных при снижении напряжения сети, представлен на рис. 6, *в, з*. Валик, показанный на рис. 6, *в*, имеет грубочешуйчатое формирование со значительными изменениями ширины шва и повышенным уровнем набрызгивания. Применение системы стабилизации устраняет короткие замыкания, связанные с понижением напряжения питания (рис. 6, *б*), что позволяет по-

Изменение параметров режима ИДСПЭ при понижении напряжения питающей сети

Напряжение питающей сети, В	Напряжение на дуге, В	Сварочный ток, А	Частота следования импульсов тока, Гц
380	26,0	220	92
350	23,5	230	68

Примечание. Длительность импульсов тока составляла $3,2 \cdot 10^{-3}$ с.

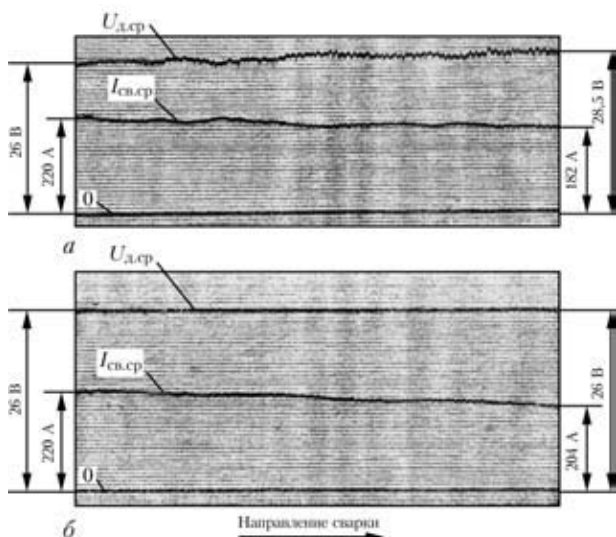


Рис. 8. Осциллограммы $I_{св,ср}$ и $U_{д,ср}$ при наплавке способом ИДСПЭ по схеме рис. 7 (*а, б* — см. рис. 2)

лучать равномерные по всей длине мелкочешуйчатые валики с плавным переходом к основному металлу и без набрызгивания (рис. 6, *з*).

Исследовано одновременное действие нескольких возмущающих факторов — изменения вылета электродной проволоки в пределах 10...25 мм, уменьшения напряжения питающей сети до 350 В, превышения высоты кромок до 3 мм — при ИДСПЭ по схеме рис. 7. Начальные условия сварки: напряжение питающей сети 350 В; напряжение на дуге 26 В; сварочный ток 220 А; длительность импульсов тока $3,2 \cdot 10^{-3}$ с; частота следования импульсов 87 Гц; скорость сварки 21 м/ч.

На рис. 8 представлены осциллограммы средних значений напряжения на дуге и сварочного тока при ИДСПЭ по схеме рис. 7. Как видно из рис. 8, *а* при комплексном действии указанных возмущающих факторов без системы стабилизации изменения значений $I_{св,ср}$ и $U_{д,ср}$ существенно возрастают. Следствием этого являются значительное разбрызгивание и набрызгивание металла, изменения ширины шва и некачественное его формирование, образование наплывов и неравномерность перехода от шва к основному металлу (рис. 9, *а*).

При автоматической стабилизации средних значений напряжения на дуге и сварочного тока с помощью разработанной двухконтурной системы возможно получение швов с хорошим формированием даже при одновременном действии ряда возмущающих факторов (рис. 9, *б*).

Выводы

1. Применение разработанной системы автоматической стабилизации $U_{д,ср}$ и $I_{св,ср}$ процесса ИДСПЭ при изменениях вылета электродной проволоки поз-

The paper gives the results of studying the influence of a two-loop system for automatic stabilization of average values of arc voltage and welding current in pulsed-arc welding on the parameters of the power source pulses and electrode wire feed rate. Separate and combined influence of the disturbing production factors (change of the electrode stick-out, lowering of mains voltage) on the process of consumable-electrode pulsed-arc welding of low-alloyed steels and quality of weld metal has been studied.

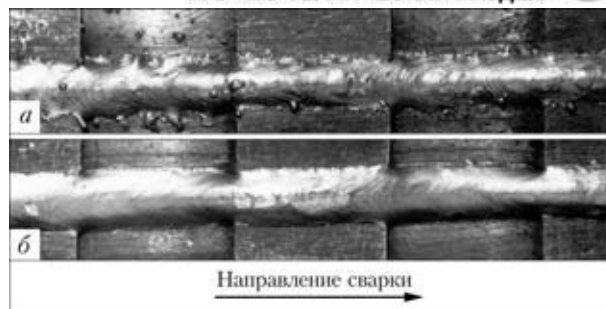


Рис. 9. Внешний вид швов при наплавке способом ИДСПЭ по схеме рис. 7 при одновременном действии нескольких возмущающих факторов (*а, б* — см. рис. 2)

воляет избежать появления дефектов типа пор, несплавлений, неравномерностей формирования швов, обеспечивает стабильность глубины проплавления.

2. С помощью системы стабилизации можно компенсировать понижение напряжения на дуге, вызванное уменьшением напряжения питающей сети, устранить короткие замыкания и вызванные ими нарушения капельного переноса металла, уменьшить разбрызгивание и набрызгивание, а также улучшить качество формирования швов.

3. При одновременном комплексном действии нескольких возмущающих факторов разработанная двухконтурная система автоматической стабилизации позволяет получать без разбрызгивания и дефектов швы, имеющие стабильные геометрические параметры.

1. Импульсно-дуговая сварка низколегированных сталей плавящимся электродом в смеси аргона с углекислым газом // С. Т. Римский, В. Г. Свещинский, П. П. Шейко и др. // Автомат. сварка. — 1993. — № 2. — С. 38–41.
2. Шейко П. П., Жерносеков А. М., Шевчук С. А. Технологические особенности сварки плавящимся электродом низколегированных сталей с чередующейся подачей защитных газов // Там же. — 1997. — № 8. — С. 32–36.
3. Бучинский В. Н., Воронай Н. М. Особенности импульсно-дуговой сварки сталей в смеси аргона с углекислым газом // Там же. — 1978. — № 3. — С. 42–45.
4. Aiechele G. Use of the pulsed technique-active-gas metal-arc welding // Schweissen und Schneiden. — 1990. — № 4. — С. 62–63.
5. Dorling D. Applying pulsed GMA welding to pipeline construction // Welding J. — 1992. — № 10. — P. 39–44.
6. Di Pietro D., Young J. Pulsed GMAW helps John deer meet fume requirements // Ibid. — 1996. — № 10. — P. 57–58.
7. Pereira W. A., Ferraresi V. A. Estudo dos Parametros que Influenciam a Instabilidade do Cordao em Soldagem MIG Pulsada Automatizada // Soldagem & Inspecao. — 2000. — № 12. — P. 25–30.
8. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. — М.: Машиностроение, 1966. — 359 с.
9. Стабилизация процесса импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом // Б. Е. Патон, П. П. Шейко, А. М. Жерносеков, Ю. О. Шимановский // Автомат. сварка. — 2003. — № 8. — С. 3–6.
10. Лебедев А. В. Влияние тепловыделения в вылете на процесс саморегулирования дуги // Там же. — 1978. — № 7. — С. 10–15.

Поступила в редакцию 10.10.2003



ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЕРЕНОСА ВОДОРОДА ПРИ ПОДВОДНОЙ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **С. Ю. МАКСИМОВ**, канд. техн. наук, **Т. В. КОРОЛЕВА**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

С помощью расчетно-экспериментального метода рассматриваются особенности транспорта водорода при мокрой подводной дуговой сварке корневого прохода стыкового шва из малоуглеродистой и низколегированной стали. Показано влияние глубины сварки и типа присадочного металла на концентрацию водорода в металле шва и ЗТВ.

Ключевые слова: подводная сварка плавлением, математическое моделирование, транспорт водорода, концентрация водорода, холодные трещины

Введение. При мокрой подводной сварке электрическая дуга горит в парогазовом пузыре, который на 85...92 % состоит из водорода [1 и др.]. С увеличением глубины сварки давление в нем растет, что приводит к повышению парциального давления водорода над сварочной ванной, а это, в свою очередь, к увеличению насыщения водородом жидкого металла каплей и сварочной ванны [2 и др.]. Последнее может приводить к интенсивному порообразованию в зоне плавления (ЗП), а также к насыщению водородом зоны термического влияния (ЗТВ) и, следовательно, к увеличению риска образования водородных (холодных) трещин.

В настоящее время научились бороться с порами путем соответствующих металлургических воздействий на жидкий металл сварочной ванны [3]. Однако в ЗТВ возможности воздействия более ограничены, поэтому проблема водородных трещин здесь достаточно актуальна.

Экспериментально оценить кинетику насыщения металла ЗТВ диффузионным водородом [4, 5] довольно сложно, поэтому необходимо привлечение для этих целей расчетных методов. Известен ряд работ [6–8 и др.] применительно к условиям сварки в обычных атмосферных условиях. Для мокрой подводной сварки применение таких подходов требует соответствующей адаптации. Этому вопросу и посвящается настоящая статья.

Постановка задачи и экспериментальные наблюдения на модельном образце. Рассматривается конкретная задача мокрой подводной сварки стыковых соединений из сталей Ст3 и 17Г1С, химический состав которых приведен в табл. 1. Дуговая механизированная сварка порошковой проволокой на металлической остающейся подкладке (рис. 1) пластин толщиной 14 мм выполняется слоями. Наибольшее беспокойство с позиций холодных трещин в металле ЗТВ вызывает сварка корневого шва, поэтому дальнейшие рассуждения связаны только с этим слоем. В рассматриваемом случае использован следующий режим: $I_{св} = 160...180$ А; $U_{св} =$

$$= 30...32 \text{ В}; v_{св} = 6 \text{ м/ч}; \alpha_n = 9 \text{ г/(А·ч)}; T_{ср} = 20 \text{ }^\circ\text{С}.$$

В табл.1 для указанного химического состава приведено значение эквивалента углерода $P_{см}$, рассчитанного по формуле

$$P_{см} = C + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Si}{30} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B + \frac{Ni}{60}. \quad (1)$$

Там же указаны критические концентрации диффузионного водорода $H_{кр}$, при которых возникает риск образования холодных (водородных) трещин, для толщин 14 мм в условиях свободного $H_{кр}^{св}$ и жесткозакрепленного образца $H_{кр}^{зак}$ [4]:

$$\log_{10} H_{кр} = P_{\omega}^{кр} - 12P_{см}, \quad (2)$$

где $P_{\omega}^{кр}$ — индекс чувствительности. Обычно $P_{\omega}^{кр} = 4,1$ и $43,6$ при сварке соответственно в свободном и закрепленном состоянии.

Видно, что критические значения $H_{кр}$ в металле ЗТВ даже низкоуглеродистой стали Ст3 при сварке в закрепленном состоянии (что характерно для ремонтных работ под водой) достаточно низкие — порядка $10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, для низколегированной ста-

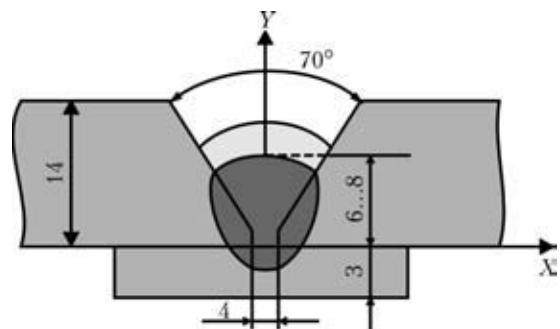


Рис. 1. Схема сварного соединения с корневым швом

Таблица 1. Химический состав сталей Ст3 и 17Г1С

Марка стали	Массовая доля элементов, %			$P_{см}$	$H_{кр}^{св}$, $\text{см}^3/100 \text{ г}$	$H_{кр}^{зак}$, $\text{см}^3/100 \text{ г}$
	C	Si	Mn			
Ст3	0,18	0,21	0,55	0,215	32	10
17Г1С	0,16	0,45	1,50	0,250	12	4



ли 17Г1С — 4 см³/100 г, т. е. риск появления водородных трещин достаточно велик.

В качестве модельных образцов, на которых выполняли экспериментальную часть работы, использовали образцы (размер 15×10×25 мм, ГОСТ 23338–91) для определения диффузионного водорода хроматографическим методом [9]. Сварку выполняли на указанном выше режиме в гидробарокамере с имитацией глубин от 0,1 до 100 м. Кроме $N_{диф}$, по этим же образцам определяли содержание остаточного водорода $N_{ост}$ и химический состав наплавленного металла. Полученные результаты для разных глубин приведены в табл. 2.

Результаты экспериментальных наблюдений показывают, что металл ЗП достаточно интенсивно окисляется, что приводит к низкому содержанию углерода, кремния и марганца. Влияние основного металла образца незначительное. В наплавленном металле содержание диффузионного и остаточного водорода возрастает с увеличением глубины сварки. Естественно ожидать увеличения содержания водорода и в металле ЗТВ, однако измерить его стандартным методом (учитывая малые размеры ЗТВ) затруднительно. Применение методики локального анализа [5] позволило бы получить только качественные оценки, поскольку условия охлаждения исследуемого соединения (см. рис. 1) и модельного образца (рис. 2) заметно отличаются, а проводить измерения на натурном образце достаточно большого сечения затруднительно.

Полученные данные по нагреву модельного образца и результатам измерения содержания водорода в наплавленном металле позволяют в определенной степени определить граничные условия для математического моделирования.

Моделирование температурного поля. Для описания распределения температур в сечении $z = \text{const}$ (см. рис. 1) использовали компьютерную программу в рамках 2D, разработанную в ИЭС им. Е. О. Патона. Распределение температуры $T(x, y, t)$ определяется решением следующей краевой задачи:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + W(x, y, z) = c\gamma \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\text{при } t = 0 \quad T = T_0(x, y, 0) = \begin{cases} T_{сп}^{пл} \approx 1700 \text{ }^\circ\text{C} \text{ в ЗП,} \\ 20 \text{ }^\circ\text{C} \text{ за пределами ЗП,} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{при } y = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0. \quad (5)$$

На остальной границе теплообмен по закону Ньютона имеет вид

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha (T - T_{сп}) \quad (6)$$

при $\alpha = \alpha_в$ — вне парогазового пузыря, $\alpha = \alpha_{п.г}$ — в пределах парогазового пузыря.

Условия существования парогазового пузыря определяются температурой поверхности $T_{п}$ и глубиной сварки L :

Таблица 2. Результаты экспериментальных наблюдений на модельных образцах

Глубина сварки, м	Химический состав металла ЗП	$N_{диф}$, см ³ /100 г	$N_{ост}$, см ³ /100 г
0,1	0,034C; 0,04Si; 0,07Mn	14,3	7,8
50	0,053C; 0,04Si; 0,04Mn	15,2	23,4
100	0,046C; 0,04Si; 0,05Mn	19,9	—

Примечание. Состав парогазового пузыря: $O_2 < 0,52 \%$; $H_2 = 85...92 \%$; $CO + CO_2 = 8...15 \%$.

$$\begin{aligned} T_{п} &> 100 \text{ }^\circ\text{C} \text{ при } L = 0 \text{ м;} \\ T_{п} &> 120 \text{ }^\circ\text{C} \text{ при } L = 10 \text{ м;} \\ T_{п} &> 160 \text{ }^\circ\text{C} \text{ при } L = 50 \text{ м;} \\ T_{п} &> 185 \text{ }^\circ\text{C} \text{ при } L = 100 \text{ м.} \end{aligned} \quad (7)$$

В формуле (3) λ и $c\gamma$ — теплофизические свойства материала. В температурном интервале кристаллизации металла ЗП используются значения $c\gamma$ с учетом скрытой теплоты кристаллизации материала $q_{ск}$ и эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_э \cong 5\lambda(T_S)$; $c\gamma_э = c\gamma(T_S) + q_{ск}/(T_L - T_S)$, где T_S, T_L — соответственно температура солидуса и ликвидуса в ЗП.

Распределенный источник W в пределах ЗП вычисляется по формуле

$$W = \left[\frac{q_{п}}{F_{ЗП}} - c\gamma(T_{сп}^{пр} - T_0) - q_{ск} \right] \frac{1}{t_0},$$

где $q_{п} = \frac{I_{св} U_{св}}{v_{св}} \eta_{п}$; $F_{ЗП}$ — площадь сечения ЗП;

$\eta_{п}$ — эффективный КПД; t_0 — время ввода тепла.

Значения $\eta_{п}$, $\alpha_в$, $\alpha_{п.г}$ определяли из опытов на модельных образцах. Хорошее согласование с экспериментом получено при $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\alpha_в \approx \alpha_{п.г} \approx 0,208 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ и $\eta_{п} = 0,50; 0,45; 0,40$ соответственно при $L = 0...10; 50; 100 \text{ м}$.

Математическая модель транспорта водорода. Использована компьютерная программа, предложенная авторами [6]. Основные положения расчетного алгоритма заключаются в следующем.

Рассматривается транспорт диффузионного водорода в металле сварного соединения на основе диффузионной модели [6–8] для неоднородной среды, транспортные свойства которой характеризуются коэффициентом диффузии D и коэффициентом растворимости K (либо коэффициентом проницаемости KD). Движущей силой транспорта является градиент потенциала концентрации Π (по

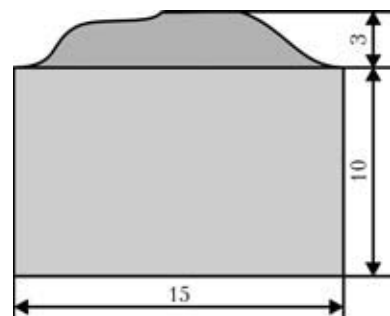


Рис. 2. Схема модельного образца



Таблица 3. Результаты расчета и экспериментальные данные измерения средних концентраций $H_{диф}$ и $H_{ост}$ для модельного образца в зависимости от глубины сварки

L, м	t, с	T _{max} , °C	ЗП		ЗТВ
			H _{диф} , см ³ /100 г	H _{ост} , см ³ /100 г	H _{диф} , см ³ /100 г
0,1	10	258	16,5	5,5	8,5
	20	78	13,5	7,9	6,8
	28	38	13,0 (14,3)	8,2 (7,8)	6,6
100	10	—	21,3	3,7	10,0
	20	—	19,03	5,6	8,5
	28	—	18,6 (19,9)	5,9	8,2

Примечание. В скобках приведены экспериментальные данные.

закону Сиверса $P = \sqrt{P}$, где P — парциальное давление водорода соответствующей концентрации в единице объема при температуре 20 °C [6]). Начальное состояние при $t = 0$ характеризуется заданными средними значениями концентрации диффузионного водорода в основном металле и металле ЗП на основе модельного эксперимента. При этом не учитывается физика кратковременного процесса поступления водорода в металл ЗП.

Для рассматриваемой области определяется потенциал концентрации $P(x, y, t)$ диффузионного водорода $H(x, y, t)$ решением краевой задачи

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(KD \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(KD \frac{\partial P}{\partial y} \right) - Q(x, y, t) = \frac{\partial}{\partial t} (KP), \quad (8)$$

$$\text{при } t = 0 \quad P(x, y, 0) = \frac{H(x, y, 0)}{K(x, y, 0)}, \quad (9)$$

$$\text{при } x = 0 \quad \frac{\partial P}{\partial x} = 0, \quad (10)$$

где Q — изменение содержания водорода в ловушках (обратимых и необратимых), вычисляемое при 20 °C и атмосферном давлении по формуле

$$Q = \mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\beta \frac{100 \text{ г}}{\gamma_m} \frac{P^2}{1 \text{ атм}} \frac{293}{(273 + T)} \right), \quad (11)$$

где β — относительный объем ловушек в единице объема; γ_m — плотность металла.

Коэффициент μ определяем следующим образом:

$$\mu = 0 \text{ при } T < T_{об} \text{ и } \frac{\partial \beta}{\partial t} - \frac{2\beta}{P} \frac{\partial P}{\partial t} - \beta \frac{\partial T}{\partial t} \frac{1}{T + 273} < 0, \quad (12)$$

$$\mu = 1 \text{ во всех остальных случаях}, \quad (13)$$

$T_{об}$ — температура, ниже которой ловушка становится необратимой.

На границе с водой $P(x, y, t) \equiv 0$; на границе в парогазовом пузыре $P(x, y, t) = \sqrt{P_H}$, где P_H — парциальное давление водорода в парогазовом пузыре. Потенциал концентрации диффузионного водорода $H(x, y, 0) = H_0$ в ЗП, в остальной части $H(x, y, 0) = 0,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$.

В работе [6] предложено величины $K(x, y, t)$, $D(x, y, t)$ и $\beta(x, y, t)$ определять в зависимости от микроструктуры в данной точке металла ЗП либо ЗТВ в виде

$$J(x, y, t) = \sum_j J_j(T) V_j(x, y, t), \quad (14)$$

где $J = K, D, \beta$; $j = a, f, p, b, m$ — соответственно для аустенита, феррита, перлита, бейнита и мартенсита; $V_j(x, y, t)$ — массовая доля j -й микроструктуры в точке (x, y) в момент времени t . Значения $K_j(T)$, $D_j(T)$, $\beta_j(T)$ определяли, используя зависимости, предложенные в работе [6].

Неопределенные в данной модели H_0 , β_j определяли на модельных образцах. В табл. 3 приведены результаты расчета по описанному алгоритму для модельного образца при $H_0 = 25 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, $\beta_a = 0$; $\beta_{fp} = 0,005$; $\beta_m = 0,05$ в сопоставлении с экспериментальными данными для металла ЗП.

Выбранные параметры H_0 и β_j позволяют получить удовлетворительное согласование расчета с экспериментом. В металле ЗТВ модельного образца содержание диффузионного водорода достаточно близко к критическому по табл. 1.

Результаты численных исследований. На рис. 3 представлены расчетные данные по размерам ЗП и ЗТВ для рассматриваемого соединения при режиме сварки: $I_{св} = 180 \text{ А}$; $U_{св} = 32 \text{ В}$; $v_{св} = 0,17 \text{ см/с}$ (теплофизические свойства сталей Ст3 и 17Г1С примерно одинаковы, что определяет незначительное их различие по размерам ЗП и ЗТВ при сварке на разных глубинах). Видно, что с увеличением глубины L уменьшаются ЗП и ЗТВ, что естественно при постоянном режиме,

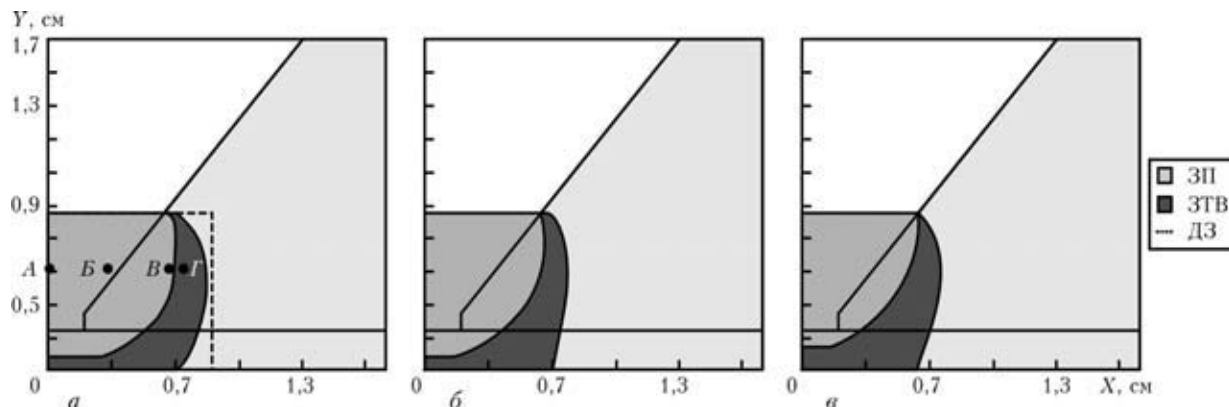


Рис. 3. ЗП, ЗТВ и диффузионная зона (ДЗ) на глубине 0,1 (а), 50 (б) и 100 м (в) (А, Б, В, Г — характерные точки)

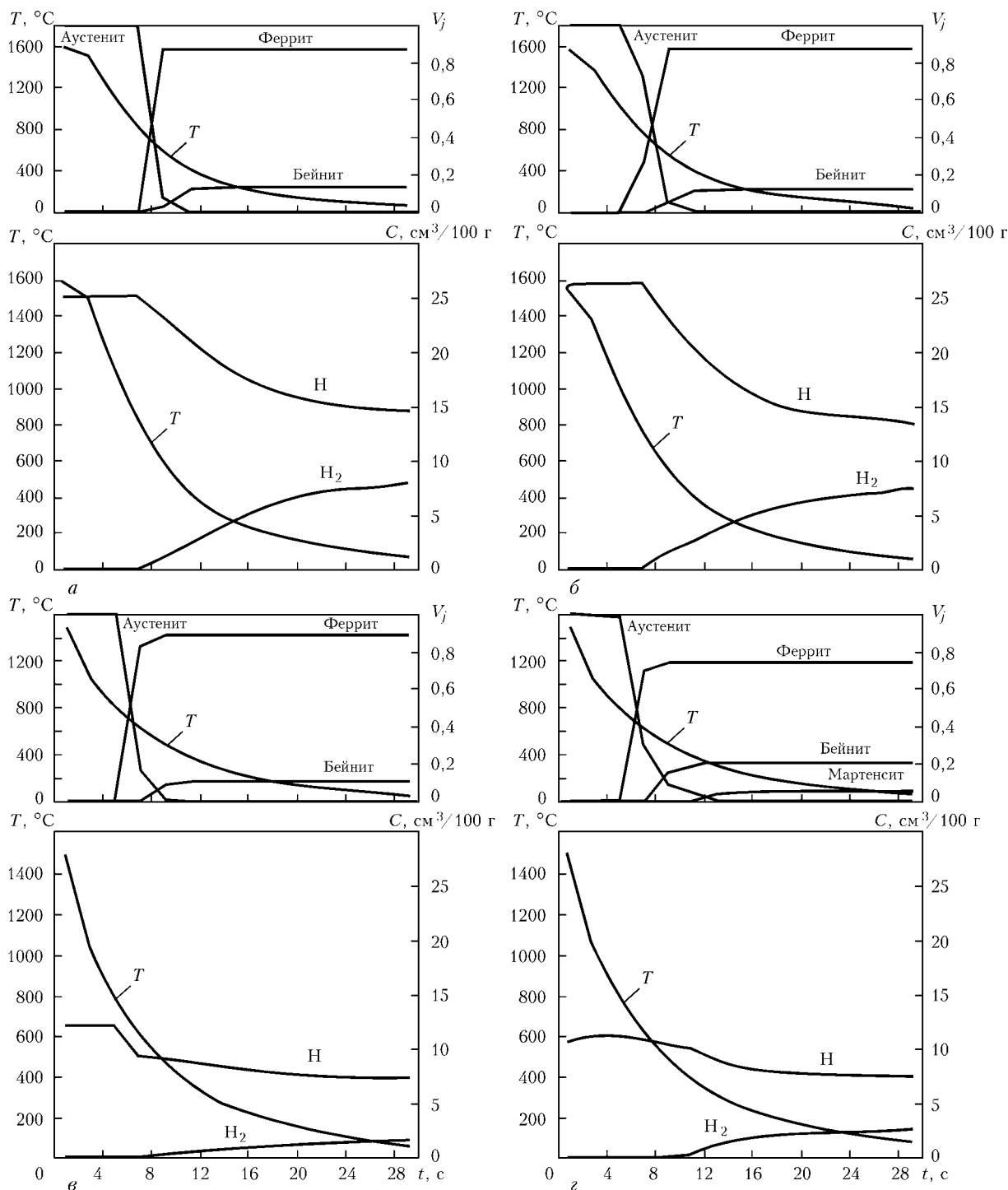


Рис. 4. Кинетика изменения во времени температур, микроструктурных составляющих V_j (j – аустенит, бейнит, феррит, мартенсит), диффузионного водорода H , водорода в ловушках H_2 для сварного соединения из стали Ст3 в характерных точках А (а), Б (б), В (в), Г (г) на глубине 0,1 м

поскольку снижается $\eta_{\text{н}}$, увеличиваются энергетические затраты на образование парогазового пузыря вокруг дуги.

Для характерных точек А, Б, В в ЗП и Г в ЗТВ на рис. 4–7 представлены расчетные данные по кинетике изменения температур, микроструктур (использовали методику работы [6]), диффузионного водорода H и водорода в ловушках H_2 при сварке на глубинах 0,1... 100 м. Данные на рис. 4, 5 относятся к стали Ст3, а на рис. 6, 7 – к 17Г1С. Анализ данных показывает, что с увели-

чением глубины L в зоне плавления (точки А–В) изменение микроструктуры (низкое содержание углерода и легирующих примесей) незначительное. Соответственно мало меняется и кинетика изменения H и H_2 в точках А–В для рассматриваемых сталей. Небольшое отличие имеет точка Г в ЗТВ. Для стали Ст3 это отличие выражается в увеличении H и H_2 в пределах 10 % с увеличением L от 0,1 до 100 м (рис. 4, 5). Для стали 17Г1С это отличие более заметно и выражается в увеличении H_2 в точке Г с 7 до 9,5 $\text{см}^3/100 \text{ г}$ (рис. 6, 7)



Таблица 4. Средние показатели концентрации Н и Н₂ в металле ЗП и ЗТВ в зависимости от глубины сварки L в различные моменты времени охлаждения t

L, м	t, с	Н, см ³ /100 г				Н ₂ , см ³ /100 г			
		Ст3		17Г1С		Ст3		17Г1С	
		ЗП	ЗТВ	ЗП	ЗТВ	ЗП	ЗТВ	ЗП	ЗТВ
0,1	10	14,5	4,1	14,5	4,6	0,9	0,07	0,9	0,05
	20	9,6	3,9	9,5	3,5	3,5	0,8	3,5	1,9
	30	8,8	3,7	8,7	3,2	4,3	1,0	4,3	2,3
50	10	16,4	6	16,3	6,9	1,5	0,14	1,5	0,1
	20	11,4	5,1	11,2	4,4	4,6	1,3	4,5	3
	30	10,8	5	10,7	4,2	5,2	1,5	5,1	3,3
100	10	15,2	5,9	15	6,4	2,2	0,43	2,1	0,8
	20	11,4	5,2	11,3	4,3	4,9	1,48	4,8	3,2
	30	10,9	5	10,9	4,1	5,5	1,63	5,4	5,3

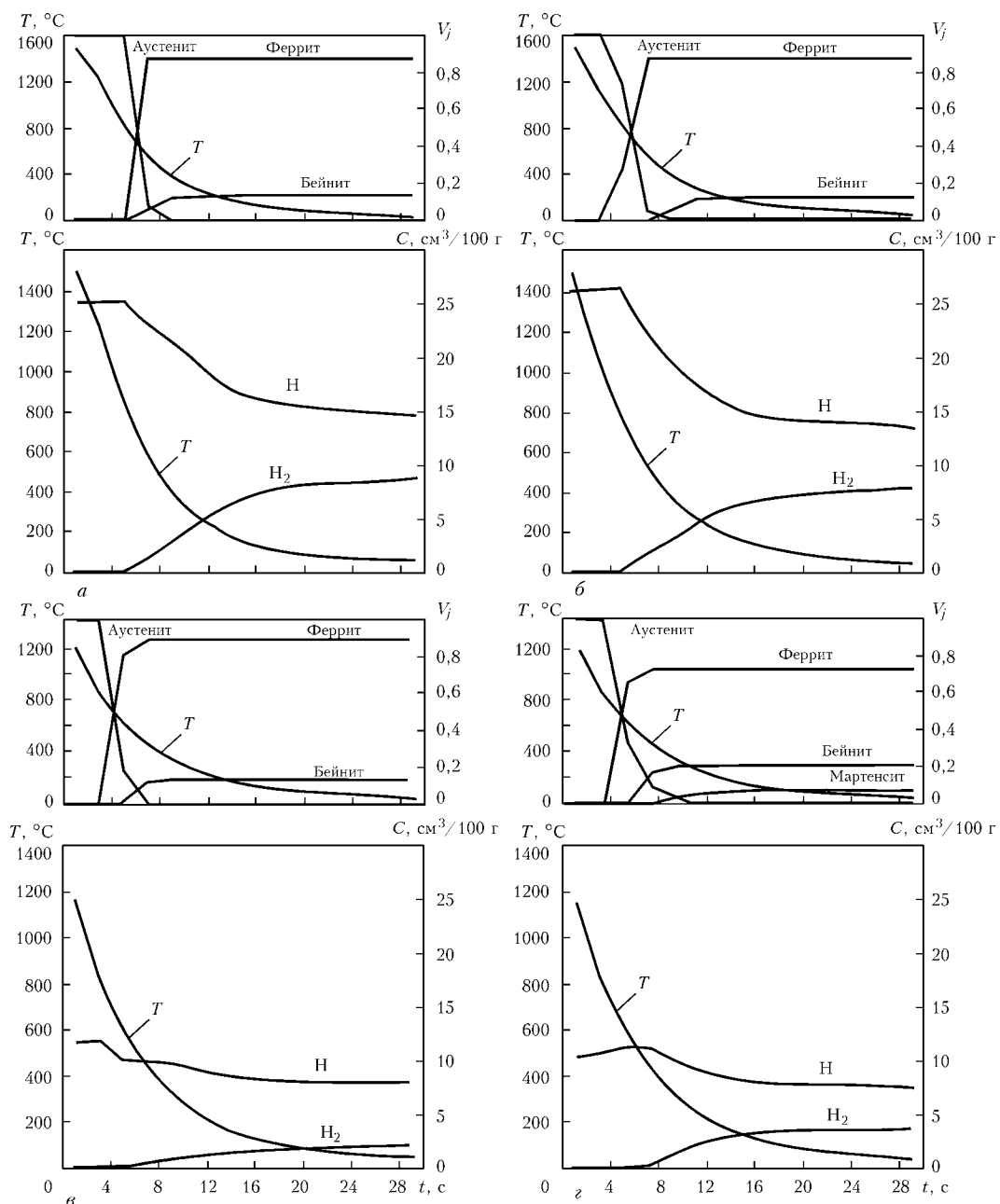


Рис. 5. Кинетика изменения во времени температур, микроструктурных составляющих V_j, диффузионного водорода Н, водорода Н₂ в ловушках Н₂ для сварного соединения из стали Ст3 в характерных точках А (а), Б (б), В (в), Г (г) на глубине 100 м

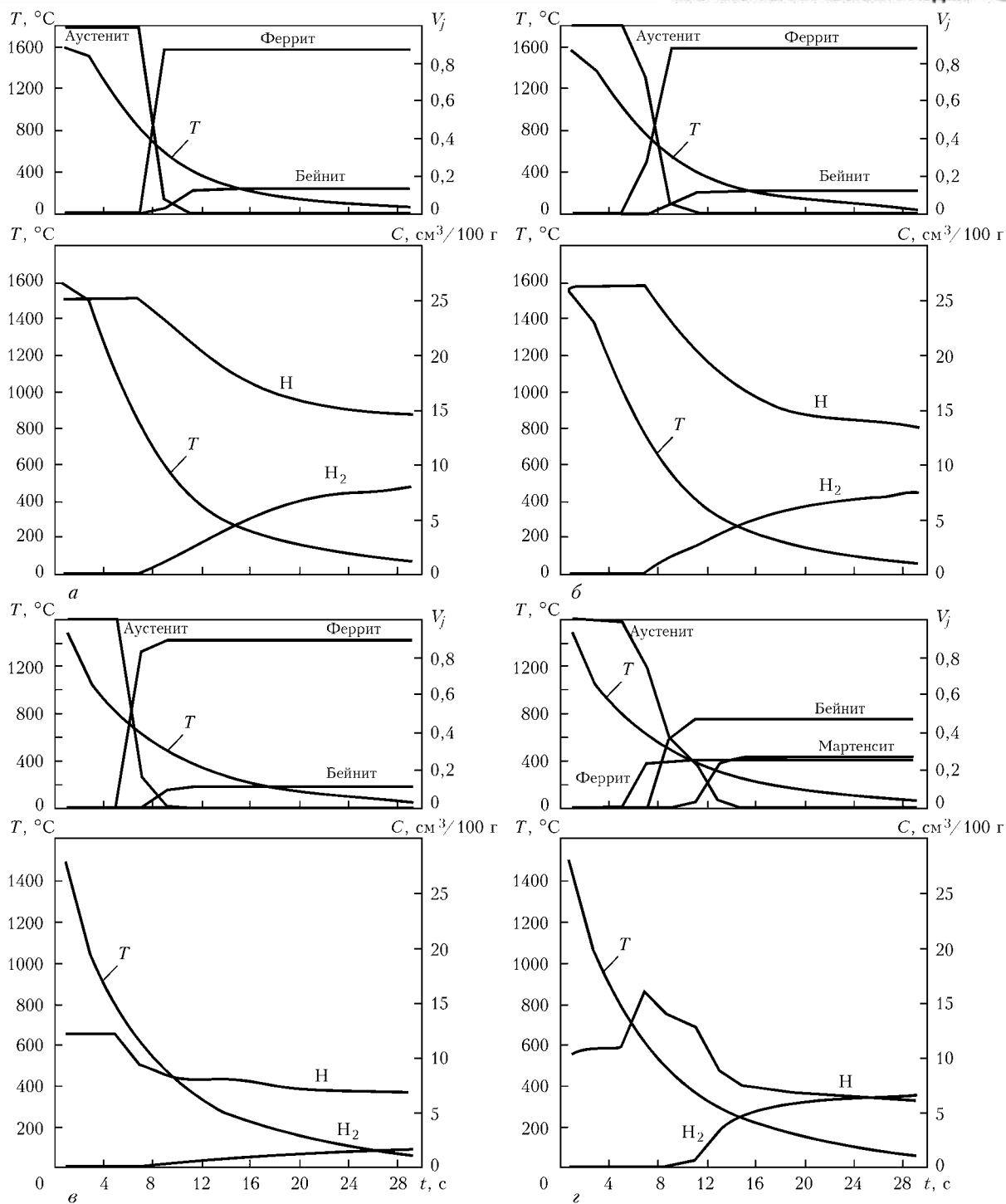


Рис. 6. Кинетика изменения во времени температур, микроструктурных составляющих V_j , диффузионного водорода Н, водорода в ловушках H_2 для сварного соединения из стали 17Г1С в характерных точках А (а), Б (б), В (в), Г (г) на глубине 0,1 м

при примерно постоянном Н на уровне $7 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, что обусловлено более высоким содержанием мартенсита (около 30 % по сравнению со сталью Ст3, где $V_m \approx 0,07 = 7 \%$).

Средние показатели концентрации $N_{\text{диф}} = Н$ и $N_{\text{ост}} = H_2$ в металле ЗП и ЗТВ для рассматриваемых сталей в различные моменты времени охлаждения при сварке на различных глубинах приведены в табл. 4. Из этих данных также видно,

Таблица 5. Химический состав металла ЗП для варианта с аустенитным присадочным материалом

Область в ЗП	Массовая содержание элементов, %						Cr^{eq}	Nieq
	C	Ni	Mn	Cr	Mo	Si		
Основная масса металла ЗП	0,066	14,7	5,0	14,2	2,8	0,5	17,7	19,2
Слой у границы с основным металлом	0,066	8,74	3,85	7,32	1,86	0,45	9,7	12,8

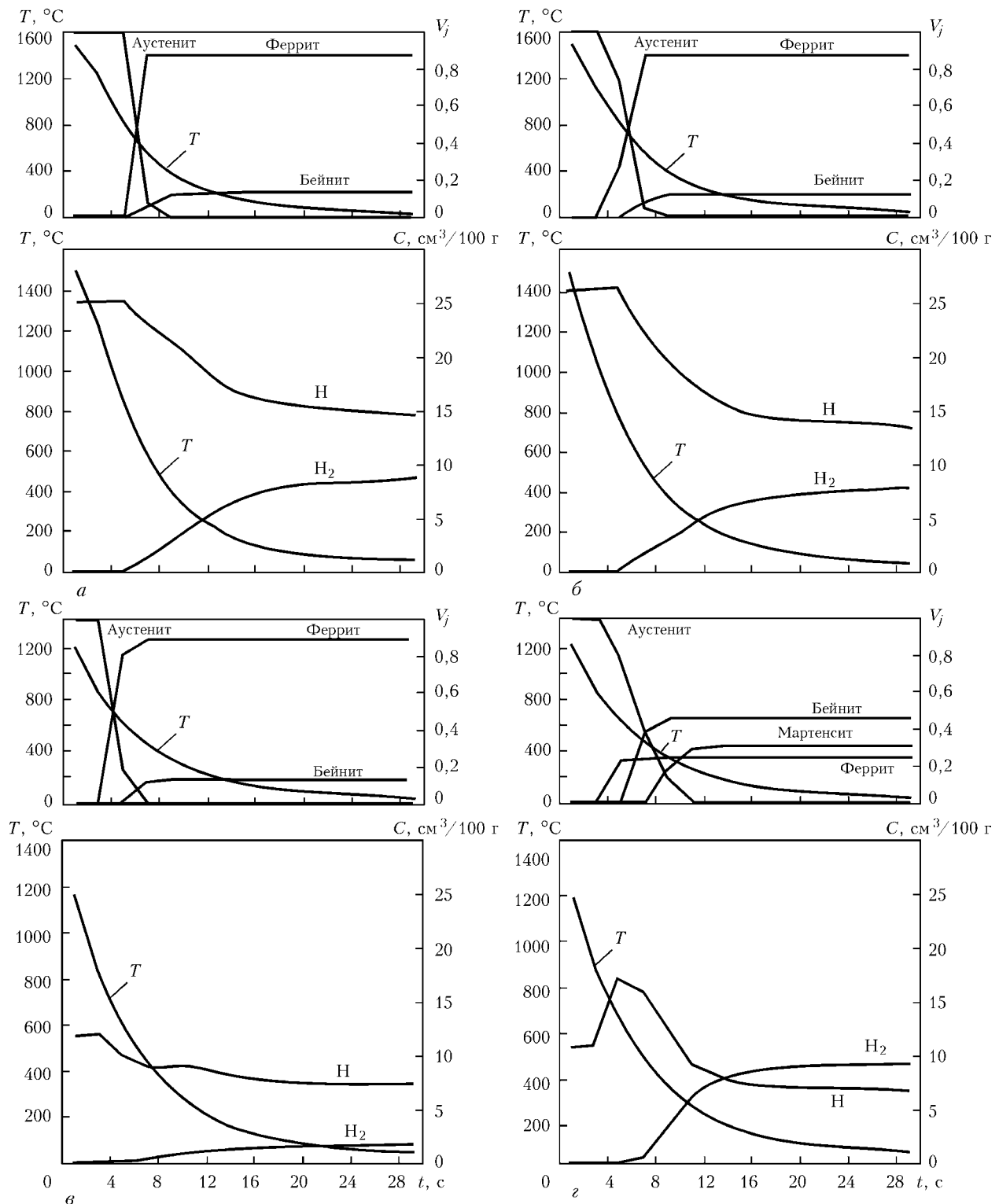


Рис. 7. Кинетика изменения во времени температур, микроструктурных составляющих V_j , диффузионного водорода Н, водорода в ловушках H_2 для сварного соединения из стали 17Г1С в характерных точках А (а), Б (б), В (в), Г (г) на глубине 100 м

что увеличение глубины приводит к возрастанию средних значений Н и H_2 в металле ЗП и ЗТВ при охлаждении сварного соединения, однако при рассматриваемых режимах сварки оно не превышает 10 %.

Поскольку в рассматриваемой схеме рост поступления водорода определяется парциальным давлением последнего в парогазовом пузыре и временем существования этого пузыря в конкретном

участке сварного соединения, рассматривался вариант сварки корневого шва соединения, представленного на рис. 1, на увеличенной в 2 раза погонной энергии. Расчеты показали, что существенные различия концентрации водорода наблюдаются только в тонком поверхностном слое в моменты времени активного массообмена с парогазовым пузырем (рис. 8, 9). Видно, что общее содержание водорода увеличивается в результате

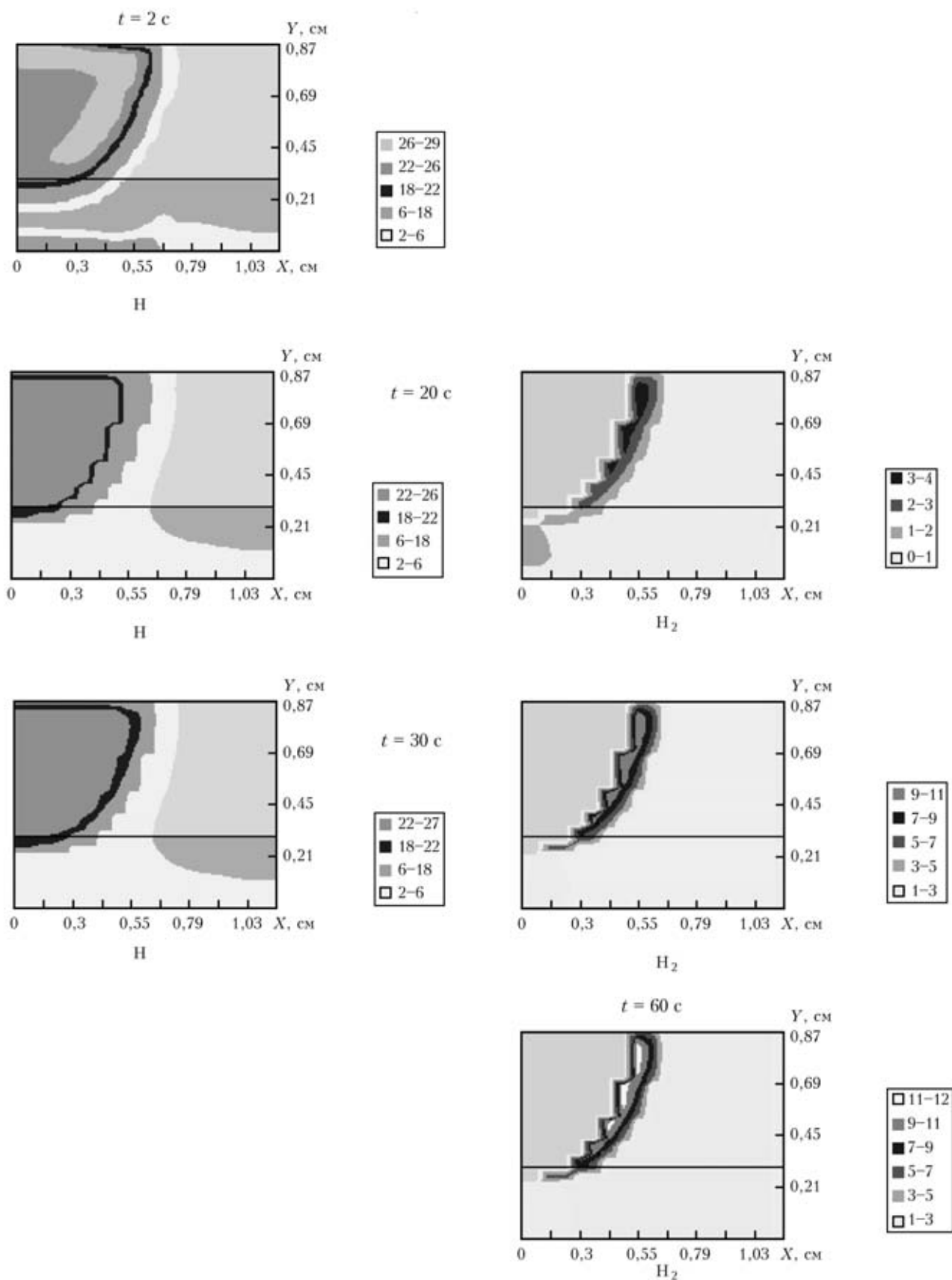


Рис. 8. Распределение H и H₂ в сечении корневого шва в различные моменты времени t при штатном режиме

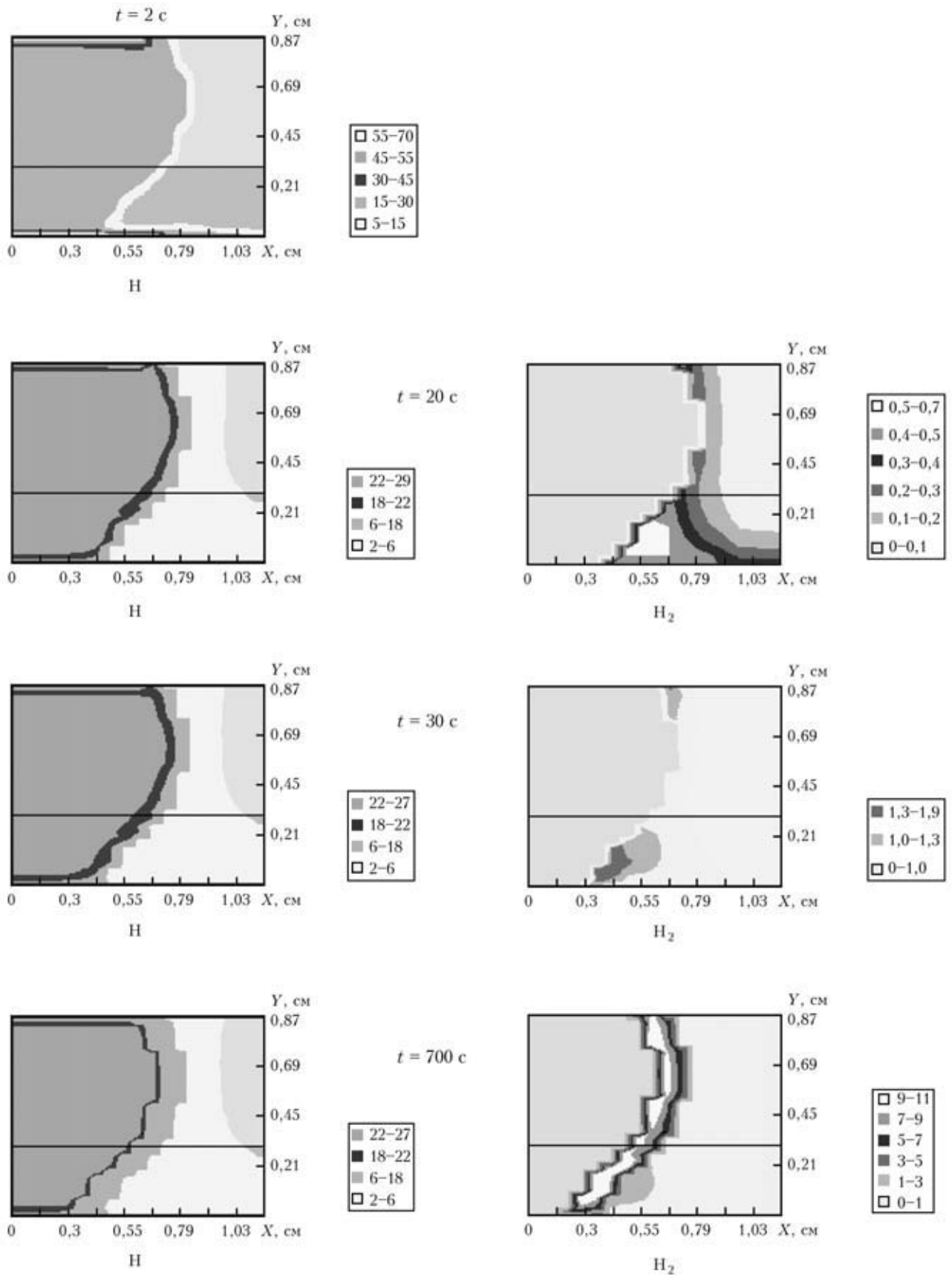


Рис. 9. Распределение H и H_2 в сечении корневого шва в различные моменты времени t и при увеличении погонной энергии в 2 раза

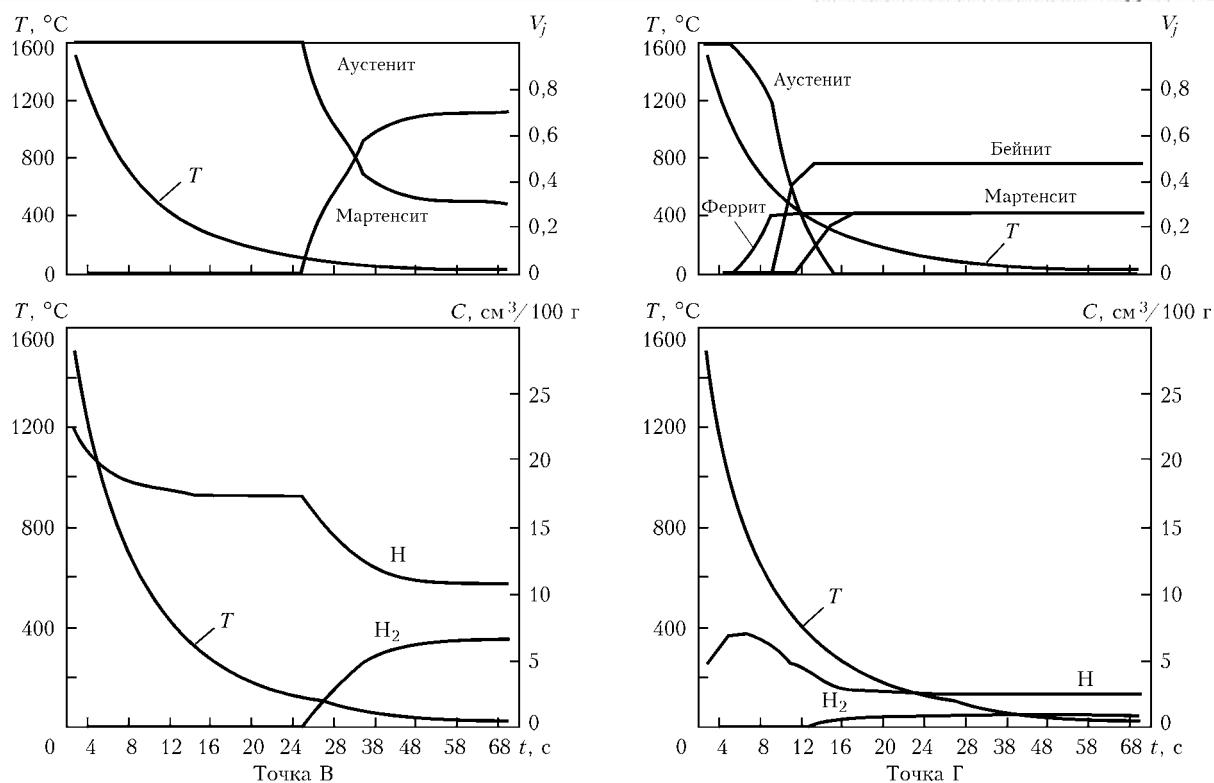


Рис. 10. Кинетика изменения во времени температуры, микроструктурных составляющих V_j (j — аустенит, бейнит, феррит, мартенсит), диффузионного водорода H , водорода в ловушках H_2 в характерных точках B и Γ на глубине 0,1 м сварного соединения из стали 17Г1С с аустенитной присадкой

роста ЗП, средняя концентрация водорода в которой меняется незначительно, что связано с кратковременностью периода активного массообмена с парогазовым пузырем.

Из приведенных в табл. 4 данных видно, что содержание среднего диффузионного водорода H в металле ЗТВ стали 17Г1С вполне достаточно для образования холодных трещин. В этой связи рассматривали достаточно известный прием, связанный с использованием аустенитного присадочного материала для снижения концентрации диффузионного водорода в металле ЗТВ. Необходимые для расчета данные по химическому составу металла ЗП получены экспериментально на модельном образце и приведены в табл. 5.

В металле ЗП у границы с основным металлом находится небольшой слой толщиной 0,1... 0,2 мм, химический состав которого существенно отличается от среднего в металле ЗП.

В табл. 5 приведены значения $C_{\Gamma_i^{eq}}$ и Ni_i^{eq} составов для диаграммы Шеффлера, позволяющие оценить микроструктуру после полного охлаждения (основная масса металла ЗП имеет аустенитную микроструктуру, а слой у границы — мартенситно-аустенитную). При этом начало мартенситного превращения наблюдается при температуре +115 °С, окончание — при -15 °С. В конце превращения содержание мартенсита составляет ~ 70 %, т. е. $V_m = 0,7$. На рис. 10 приведены расчетные данные по кинетике изменения температуры, микроструктуры и концентрации водорода H и H_2 в характерных точках: B — слой с конечной мартенситно-аустенитной структурой, Γ — точка металла ЗТВ (см. рис. 3). Сравнивая данные на

рис. 8, 9 с аналогичными на рис. 6, видим, что концентрация диффузионного водорода в металле ЗТВ в точке Γ снизилась с 7,0 до 1,0 $cm^3/100\text{ г}$ за счет аккумуляции его в аустенитном металле шва, т. е. при мокрой подводной сварке применение аустенитного присадочного металла является эффективным средством снижения содержания водорода в металле ЗТВ углеродистых и низколегированных сталей.

Выводы

1. Увеличение глубины мокрой подводной сварки малоуглеродистых и низколегированных сталей в пределах 0,1... 100 м способствует увеличению содержания диффузионного водорода в металле ЗП. Однако оно невелико (в пределах 10 %) при $H_{диф}^{cp} \approx 9... 11\text{ см}^3/100\text{ г}$ в металле ЗП и $3,2... 5,0\text{ см}^3/100\text{ г}$ в металле ЗТВ.

2. Повышение погонной энергии сварки приводит к общему увеличению содержания водорода в сварном соединении в основном за счет роста размеров ЗП. Роль массообменных процессов в парогазовом пузыре оказывает влияние на концентрацию водорода только в тонком поверхностном слое.

3. Содержание $H_{диф}$ в металле ЗТВ стали СтЗ недостаточно для образования холодных трещин даже при сварке рассматриваемого соединения в жестких условиях.

4. Содержание диффузионного водорода в металле ЗТВ стали 17Г1С вполне достаточно для образования холодных трещин при сварке рассматриваемого соединения в жестких условиях (см. табл. 1).



5. Использование аустенитного присадочного материала является эффективным приемом снижения концентрации диффузионного водорода в металле ЗТВ низколегированных сталей при мокрой подводной сварке.

1. Suga J., Hasui A. On formation of porosity in underwater wet weld metal (the first report) // Trans. Jap. Weld. Soc. — 1986. — 17(1). — P. 58–64.
2. Ando S., Asahami T. A study on the metallurgical properties of steel welds with underwater gravity welding // Proc. conf. «Underwater welding». — Pergamon press, 1983. — P. 225–261.
3. Rowe M. D., Liu S., Reynolds T. J. The effect of ferroalloy additions and depth on the quality of underwater wet welds // Welding J. — 2002. — August. — P. 156–166.
4. Welding Handbook. Materials and Applications. — Miami: AWS, 1998. — Vol. 4, pt. 2. — 620 p.

A calculation-experimental method is used to analyze the features of hydrogen transport in wet underwater arc welding of the root pass on low-carbon and low-alloyed steel. The influence of the penetration depth and type of filler metal on hydrogen concentration in the weld metal and HAZ is shown.

5. The determination of hydrogen distribution in high-strength steel weldments. Part 1: Laser ablation methods / R. D. Smith, G. P. Landis, I. Maroff et al. // Welding J. — 2001. — № 5. — P. 115–122.
6. Махиенко В. И., Королева Т. В., Лавринец И. Г. Влияние микроструктурных изменений на перераспределение водорода при сварке плавлением конструкционных сталей // Автомат. сварка. — 2002. — № 2. — С. 7–13.
7. Michailov V.G., Thomas K., Vohlhardt H. Numerische Simulation der Wasserdampfverteilung in mehrlagigen Schweißverbindungen // Schweißen und Schneiden. — 1996. — № 48. — S. 47–50.
8. An analysis of effect of microstructure, strain and stress on the hydrogen accumulation in the weld heat affected zone / N. Jurioka, S. Ohwhita, H. Nakamura, K. Asamo. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IX-1161–80).
9. Походня И. К., Пальцевич А. П., Явдоцин И. Р. Хромографический метод определения количества диффузионного водорода в сварных швах. — Киев, 1978. — [4] с. — (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; № 37).

Поступила в редакцию 04.12.2002

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ (НПМ) — 2004

20–23 сентября 2004

г. Волгоград, Россия

- Секция «Наноматериалы и технологии (НМТ)»
- Секция «Слоистые композиционные материалы (СКМ)»
- Секция «Порошковая металлургия (ПМ)»

В работе конференции, ставящей своей целью стимулировать контакты между специалистами, работающими в области наноматериалов и технологий, слоистых композиционных материалов, порошковой металлургии и других отраслях материаловедения, примут участие ведущие ученые и инженеры России и других стран.

В рамках конференции планируется работа следующих секций:

• **Наноматериалы и технологии — 2004** (подсекции: Структура металлических, керамических и композиционных наноматериалов; Прочностные, трибологические, магнитные и другие свойства наноматериалов; Методы получения наноматериалов и изделий из них). Координатор — ИМЕТ им. А. А. Байкова РАН.

• **Слоистые композиционные материалы — 2004** (подсекции: Физико-химические аспекты соединения разнородных материалов; Математическое моделирование и механика слоистых композитов; Структура, свойства и технология слоистых композиционных материалов). Координатор — ВолгГТУ.

• **Порошковая металлургия — 2004** (подсекции: Функциональные порошковые материалы; Организация производства порошковых изделий — пример эффективности инновационной деятельности). Координатор — НЦ ПМ, г. Пермь.

Планируется издание сборника трудов к открытию конференции.

Адрес оргкомитета конференции:

400131, Волгоград, пр. Ленина, 28, Волгоградский государственный технический университет
+7(8442) 34-99-41 Кидалов Николай Алексеевич
34-06-42 Кузьмин Сергей Викторович
34-16-00 Адаменко Нина Александровна
34-99-41 (факс)
e-mail: weld@vstu.ru, lysak@vstu.ru
www.vstu.ru



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ С УЧЕТОМ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ СИНТЕЗА МАТЕРИАЛА ПОКРЫТИЯ

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)

Разработана математическая модель для расчета динамики нагрева в плазменной струе композиционных порошкообразных частиц с учетом выделения тепла в результате химической реакции между исходными компонентами композиционных материалов. Создано программное обеспечение для компьютерной реализации разработанной модели. Проведен численный анализ особенностей нагрева и движения в струе плазмы композиционных частиц Ni-Al при учете тепловыделения в объеме частиц за счет экзотермической реакции образования интерметаллида.

Ключевые слова: плазменное напыление, композиционный порошок, нагрев частиц, экзотермическая реакция, интерметаллид, математическая модель, программное обеспечение

Правильный выбор совокупности технологических параметров, определяющих режим напыления, играет важную роль для получения качественных покрытий. Детальное теоретическое исследование отдельных физико-химических явлений, происходящих при нанесении покрытий плазмой, и создание на его основе соответствующих математических моделей позволяет предсказать влияние различных факторов на ход процесса в целом и во многих случаях избежать излишних финансовых затрат на проведение прямых экспериментов.

Для поиска оптимальных условий нагрева и движения напыляемых частиц необходимо прогнозировать динамику взаимодействия частицы с плазменной струей, а также процессы, протекающие внутри частицы. Важная технологическая особенность напыления с возможностью экзотермической реакции между наполнителями композиционных порошков заключается в использовании внутренних энергетических ресурсов частиц порошка при протекании реакции синтеза материала покрытия. В этом случае возможность прогнозирования и управления результирующими характеристиками покрытий может быть обеспечена путем создания специализированной математической модели плазменного нагрева частицы композиционного порошка с учетом термохимических преобразований внутри нее и их влияния на процесс плазменного напыления. Принципиальное отличие такой модели от разработанной ранее состоит в том, что она должна описывать нагрев частицы под воздействием двух источников тепла — внешнего (в виде теплового потока от плазменной струи) и внутреннего (в виде теплоты реакции синтеза). Кроме того, состав и структура частицы, а следовательно, и ее теплофизические характеристики

могут существенно изменяться в процессе нагрева по мере протекания химической реакции.

Рассмотрим модель нагрева сферической частицы, состоящей из экзотермически реагирующего композиционного материала, движущейся в плазменной струе с известными (предварительно вычисленными) распределениями температуры и скорости плазмы. Для расчета траектории и скорости движения частицы в струе используем разработанную ранее математическую модель [1], основанную на решении уравнения движения частицы в потоке плазмы под действием силы аэродинамического сопротивления. Для нахождения температурного поля в объеме частицы используем нестационарное уравнение теплопроводности с объемным источником тепла [2, 3]:

$$\rho \bar{C} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \chi \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \rho W_p \Phi(T, \eta). \quad (1)$$

Здесь $\rho(T)$ — массовая плотность частицы; $\bar{C}(T)$ — ее эффективная удельная теплоемкость; $T(r, t)$ — пространственно-временное распределение температуры в частице (где r — координата; t — время); $\chi(T)$ — коэффициент теплопроводности композиционного материала; W_p — удельная теплота экзотермической реакции синтеза материала покрытия; $\Phi(T, \eta)$ — скорость выделения тепла в результате протекания указанной реакции. Для ее определения можно использовать, например, закон, справедливый для гомогенных реакций [2]:

$$\Phi(T, \eta) = K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (1 - \eta)^n, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \Phi(T, \eta), \quad (3)$$

где η — степень превращения исходных компонентов в конечный продукт; K_0 — предэкспоненциальный фактор; E — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; n — порядок реакции.



Уравнение (3) решается при начальном условии $\eta|_{t=t_n} = 0$, где t_n — время начала химической реакции, определяемое как время достижения материалом частицы температуры начала реакции T_p (с учетом времени ретардации [4]).

Уравнение (1) решается при начальном условии

$$T(r)|_{t=0} = T_0 \quad (4)$$

(здесь T_0 — исходная температура частицы), а также при следующих граничных условиях:

$$\frac{\partial T}{\partial r}|_{r=0} = 0; \quad \left(\chi \frac{\partial T}{\partial r}\right)|_{r=a} = q, \quad (5)$$

где $q(t)$ — плотность теплового потока, вводимого плазмой через поверхность частицы [1]; $a(t)$ — ее текущий радиус. При начальном радиусе $a_0 = d_0/2$, где d_0 — начальный диаметр частицы, который может изменяться во времени в результате химического превращения пористого композиционного материала в плотный конечный продукт реакции, его плавления или испарения.

Предполагаем, что исходная частица композиционного порошка представляет собой смесь более мелких частиц двух различных материалов и имеет начальную пористость v_0 . Тогда для определения плотности такого композиционного материала можно использовать выражение

$$\rho = \frac{1 - v_0}{m_1/\rho_1 + m_2/\rho_2}, \quad (6)$$

где ρ_1, ρ_2 — плотность исходных компонентов композиционного порошка; m_1, m_2 — их массовая доля.

Эффективная удельная теплоемкость композиционного материала, рассчитываемая с учетом степени его превращения, может быть записана в виде

$$\bar{C}(T) = (1 - \eta)\bar{C}_n(T) + \eta\bar{C}_n(T). \quad (7)$$

Эффективная удельная теплоемкость прореагировавшей $\bar{C}_n(T)$ и непрореагировавшей $\bar{C}_n(T)$ части материала частицы, рассчитывается по следующим формулам:

$$\bar{C}_n(T) = c_n(T) + W_n^m \delta(T - T_n^m) + m_1 W_1^b \delta(T - T_1^b) + m_2 W_2^b \delta(T - T_2^b), \quad (8)$$

где $c_n(T)$ — удельная теплоемкость прореагировавшего материала; W_n^m — его скрытая теплота плавления; W_1^b, W_2^b — скрытая теплота кипения каждого из компонентов; T_n^m — температура плавления прореагировавшего материала; T_1^b, T_2^b — температура кипения каждого компонента смеси;

$$\bar{C}_n(T) = [c_1(T) + W_1^m \delta(T - T_1^m)]m_1 + [c_2(T) + W_2^m \delta(T - T_2^m)]m_2, \quad (9)$$

где $c_1(T), c_2(T)$ — удельная теплоемкость компонентов смеси; W_1^m, W_2^m — их скрытая теплота плавления; T_1^m, T_2^m — соответствующие температуры плавления. Везде под $\delta(x)$ понимается δ -функция.

С помощью описанной математической модели проведены расчеты траектории, скорости движения и температурного поля композиционных частиц Ni-Al, содержащих исходные компоненты в массовых долях $m_1 = 0,69$ (Ni) и $m_2 = 0,31$ (Al), имеющих начальную пористость $v_0 = 0,3$ и исходный диаметр 40...70 мкм, применительно к условиям напыления в плазменной струе смеси Ag + 20 % H₂, генерируемой плазмотроном с диаметром канала сопла-анода $d = 6$ мм, при токе дуги $I = 450$ А, расходе плазмообразующей смеси $G = 55$ л/мин (при этом напряжение на дуге составляет $U_d = 64,2$ В, электрическая мощность плазмотрона $P = 28,9$ кВт, КПД 62 %) и дистанции напыления 10 см. Расчет пространственных распределений температуры и скорости плазмы в рассматриваемой струе выполнен с помощью программного обеспечения CASPSP [1]. Для численного решения уравнения теплопроводности (1) использовали метод Кранка-Николсона [5] с дроблением шага по времени для полного учета скрытой теплоты плавления и испарения материала.

Значения коэффициентов лобового сопротивления и теплообмена частицы с плазмой, необходимые для решения уравнения движения и уравнения теплопроводности, вычисляли с помощью известных критериальных зависимостей, полученных для случая обтекания сферической частицы [6]. Значения теплофизических параметров алюминия и никеля, используемые для расчетов, приведены в таблице.

Теплопроводность χ пористого композиционного материала Ni-Al принималась равной $\chi_{Ni}(0,8 - v_0)$

Теплофизические свойства компонентов

Компоненты композиционного материала	Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·К)	Плотность ρ , кг/м ³	Теплопроводность χ , Вт/(м·К)	Скрытая теплота, Дж/кг		Температура, К	
				плавления $W^m \cdot 10^{-6}$	парообразования $W^b \cdot 10^{-7}$	плавления T^m	кипения T^b
Алюминий:							
твердый	$766 + 0,459T$	2620	$254,7 - 0,0412T$	0,397	1,089	934	2720
жидкий	1178	2080	106,4				
Никель:							
твердый	$506,2 + 0,71T - 1,59 \cdot 10^{-7}/T^2$	8900	$67,3 - 0,033T + 8,8 \cdot 10^{-6}T^2$	0,302	0,638	1726	3073
жидкий	662,6	7910	69				

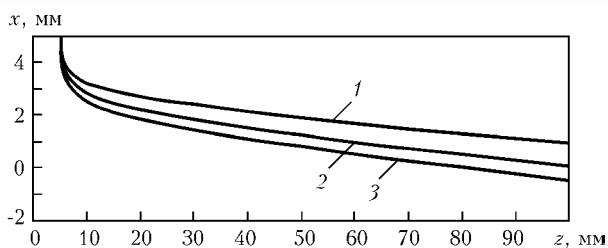


Рис. 1. Траектории движения частиц композиционного порошка Ni-Al различного диаметра в плазменной струе: 1 — $d_0 = 40$; 2 — 55; 3 — 70 мкм

[7], удельная теплота реакции образования интерметаллида AlNi составляла $W_p = 1,66 \cdot 10^6$ Дж/кг, порядок реакции $n = 1$; энергия активации — $E = 76 \cdot 10^3$ Дж/моль; фактор K_0 , определяющий скорость выделения тепла в процессе реакции, варьировался в диапазоне от 0 до $1 \cdot 10^6$ с⁻¹ [2]. Плотность образующегося интерметаллида AlNi выбиралась равной 5945 кг/м³, его теплопроводность — 90 Вт/(м·К), а удельная теплоемкость прореагировавшего материала $c_{п}(T) = 526,67 + 113,32 \cdot 10^{-3}T - 13,19 \cdot 10^{-5}T^2$ Дж/(кг·К) [2].

Условия ввода частиц в струю были следующими: расстояние точки ввода от оси плазмотрона составляет $x_0 = 5$ мм, а от его среза — $z_0 = 0,5$ см; угол ввода, отсчитываемый от горизонтали, $\phi = 0^\circ$; диаметр транспортирующего канала $d_c = 2$ мм; расход транспортирующего газа $g_c = 2,2$ л/мин, порошка $M_p = 1 \dots 10$ кг/ч.

На рис. 1 представлены рассчитанные траектории движения частиц композиционного порошка Ni-Al разного диаметра, которые свидетельствуют о существенном влиянии начального диаметра (массы) частицы на ее траекторию. Условия ввода частиц в струю выбирали таким образом, чтобы при среднем значении диаметра частицы ($d_0 = 55$ мкм) получить минимальное отклонение ее конечного положения на дистанции напыления от оси струи (рис. 1, кривая 2). За счет большей инерции частицы с диаметром $d_0 = 70$ мкм попадают в более горячие участки плазменной струи, благодаря чему обеспечивается их лучшее прогревание, и наоборот, у частиц с меньшим диаметром ($d_0 = 40$ мкм) происходит теплообмен с менее горячими участками, что позволяет избежать перегрева и потерю массы на испарение.

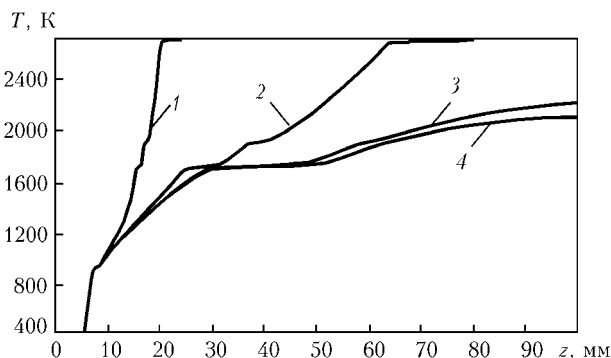


Рис. 2. Влияние скорости выделения теплоты реакции в частице композиционного порошка Ni-Al ($d_0 = 55$ мкм) на динамику ее нагрева в плазменной струе: 1 — $K_0 = 1 \cdot 10^6$; 2 — $1 \cdot 10^5$; 3 — $1 \cdot 10^4$ с⁻¹; 4 — без учета выделения теплоты реакции

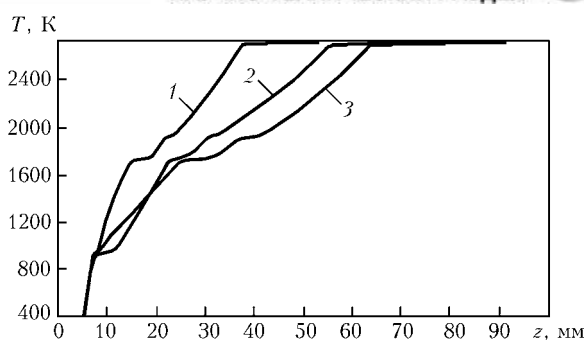


Рис. 3. Влияние исходного диаметра частиц композиционного порошка Ni-Al на динамику их нагрева в плазменной струе ($K_0 = 1 \cdot 10^5$ с⁻¹): 1 — $d_0 = 40$; 2 — 70; 3 — 55 мкм

При фиксированном диаметре частицы ($d_0 = 55$ мкм) проводили расчеты температурного поля в частице для различных значений предэкспоненциального фактора K_0 , характеризующего скорость выделения тепловой энергии за счет протекания химической реакции. Из рис. 2 следует, что при $K_0 = 1 \cdot 10^6$ с⁻¹ внутренний источник тепла вносит существенный вклад в динамику нагрева частицы уже на начальном участке ее движения (на рис. 2–4 приведены расчетные кривые температуры в центре и на поверхности частиц по дистанции напыления). Совместное действие двух источников тепловой энергии приводит в этих условиях к излишнему перегреву частицы вплоть до кипения, т. е. к неэффективному использованию теплоты реакции синтеза.

Снижение значений K_0 до $1 \cdot 10^5$ с⁻¹ сдвигает достижение зоны перегрева до точки 6,5 см по пути движения частицы, что означает увеличение полезной доли тепла, вносимого внутренним источником. При $K_0 = 1 \cdot 10^4$ с⁻¹ развитие процесса экзотермического синтеза затормаживается настолько, что температурная кривая для такой частицы мало отличается от частицы Ni-Al без учета выделения тепла за счет реакции синтеза. Эти результаты позволяют заключить, что изменение интенсивности развития процесса экзотермического синтеза в композиционных частицах в условиях плазменного напыления может существенно сказаться на динамике нагрева напыляемого материала.

На рис. 3 представлены результаты оценки влияния размера частиц композиционного порошка

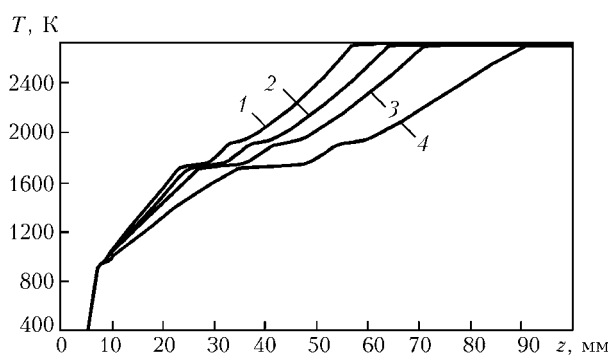


Рис. 4. Динамика нагрева частиц композиционного порошка Ni-Al в плазменной струе при различной загрузке струи порошком ($d_0 = 55$ мкм, $K_0 = 1 \cdot 10^5$ с⁻¹): 1 — $M_p = 1$; 2 — 3; 3 — 5; 4 — 10 кг/ч



на динамику их нагрева. Хотя в этом случае отличие кривых нагрева для частиц диаметром 40, 55 и 70 мкм не так велико, как при изменении K_0 , однако следует отметить, что увеличение размера частиц способствует некоторой задержке в развитии процесса синтеза. При определенных условиях это может привести к тому, что в момент достижения поверхности напыляемой основы частицы разного диаметра будут иметь не только различную температуру, но и различную степень завершенности процесса синтеза.

Аналогичный эффект достигается при увеличении расхода порошка напыляемого материала (рис. 4). При повышении расхода порошка происходит замедленное развитие процесса синтеза. Поскольку при этом срабатывает эффект охлаждения плазменной струи, то очевидно, что аналогичный результат будет иметь место и при снижении полезной мощности плазмотрона.

Таким образом, результаты численных экспериментов свидетельствуют о значительном влиянии теплоты химической реакции синтеза материала покрытия на динамику плазменного нагрева частиц в процессе напыления композиционного порошка. Математическая модель, предложенная в настоящей работе, позволяет учитывать вклад термохимического взаимодействия компонентов частиц порошка и прогнозировать динамику нагрева, ско-

рость движения и траекторию напыляемых частиц в зависимости от различных входных параметров. Программная реализация этой модели дает возможность автоматизировать процесс проведения численных экспериментов по плазменному напылению экзотермически реагирующих композиционных порошков и может служить инструментом для решения инженерных задач по выбору оптимальных параметров получения покрытий из материалов такого типа.

1. *Компьютерное моделирование процесса плазменного напыления* / Ю. С. Борисов, И. В. Кривцун, А. Ф. Мужиченко и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 12. — С. 42–51.
2. *Итин В. И., Найбороденко Ю. С.* Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1989. — 212 с.
3. *Shaw K. G., McCoy K. P., Trogolo J. A.* Fabrication composite spray powders using reaction synthesis // Proc. of 7th National thermal spray conf., June 20–24, 1994. — Boston, 1994. — P. 509–514.
4. *Шориоров М. Х.* Физико-химическое взаимодействие компонентов в композиционных материалах // Композиционные материалы. — М.: Наука, 1981. — С. 11–18.
5. *Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р.* Вычислительная гидромеханика и теплообмен. — М.: Мир, 1990. — Т. 1. — 384 с.
6. *Цветков Ю. В., Папфилов С. А.* Низкотемпературная плазма в процессах восстановления. — М.: Наука, 1980. — 359 с.
7. *Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П.* Теплопроводность смесей и композиционных материалов. — Л.: Энергия, 1974. — 264 с.

A mathematical model is developed for calculation of the dynamics of heating of composite particles in a plasma jet, taking into account the evolution of heat as a result of a chemical reaction between the initial components. Software is developed for computer implementation of the developed model. Numerical analysis was performed of the features of heating and motion of Ni-Al composite particles in the plasma jet, taking into account the heat evolution in the particle volume through exothermal reaction of intermetallics formation.

Поступила в редакцию 31.01.2003

НОВОСТИ НКМЗ

НКМЗ изготавливает гидротехническое оборудование для Мексики

НКМЗ приступил к выполнению крупного заказа промышленников Мексики — созданию гидромеханического оборудования для строящейся в Эль-Кахоне гидроэлектростанции.

В активе новокраматорцев — порядка 200 т сложнейших наукоемких агрегатов, в числе которых — гидроцилиндры, гидроприводы управление к ним, гидронагружатели и другое.

Отгрузка этого уникального оборудования будет осуществляться поэтапно, начиная с июля текущего года, и завершится в июле 2005 г.

Это уже второй заказ, поступивший на НКМЗ с североамериканского континента, на изготовление гидротехнического оборудования. В 1994 г. новокраматорцы поставили для мексиканского гидроузла в Сан-Рафаэле 100 т аналогичных агрегатов.

В изготовлении гидротехнического оборудования на НКМЗ накоплен сорокалетний опыт. Гидротехника с новокраматорской маркой хорошо известна в десятках стран мира. Она многие годы надежно эксплуатируется на таких ГЭС, как Асуанская (Египет), Нурекская (Таджикистан), Красноярская, Волжанская, Саратовская, Куйбышевская и другие (Россия), на гидроузлах Анголы, Вьетнама, Алжира, Марокко, Болгарии и др.



ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИТАНА И ЕГО СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКЕ

Л. С. КИРЕЕВ, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
В. В. ШУРУПОВ, канд. техн. наук, В. В. ПЕШКОВ, д-р техн. наук, Г. П. БЕСПЛОХОТНЫЙ, инж.
(Воронеж. гос. техн. ун-т, РФ)

Установлено влияние материала технологической оснастки, используемой при диффузионной сварке тонкостенных слоистых конструкций из титана, на его служебные характеристики. По данным фрактографических исследований и механических испытаний, показано, что эксплуатационные свойства соединений титана улучшаются при применении оснастки из стали 20 по сравнению с оснасткой из стали 12Х18Н10Т.

Ключевые слова: диффузионная сварка, технологическая оснастка, титановые конструкции, схватывание, охрупченный слой, механические испытания

Как установлено ранее [1, 2], в условиях диффузионной сварки происходит контакт и взаимодействие свариваемых титановых заготовок с технологической оснасткой. Это приводит к значительным изменениям физико-химического состояния контактируемых поверхностей вследствие развития процессов схватывания между титаном и сталью, а также диффузионного насыщения поверхностных слоев титана материалом оснастки. При отделении оснастки от изделия (стали от титана) происходит разрушение очагов схватывания и образование на контактных поверхностях вырывов. Формирование диффузионных слоев на титане сопровождается изменением их химического состава, что приводит к охрупчиванию.

После диффузионной сварки титановых конструкций с сотовым наполнителем несущие обшивки, находящиеся при сварке в контакте со стальной оснасткой, имеют небольшую (до 0,8 мм) толщину и не подвергаются дополнительной механической обработке. В связи с этим необходимо получить количественные оценки влияния состояния поверхности титана и его приповерхностных слоев на эксплуатационные характеристики титановых конструкций — механические свойства и коррозионную стойкость.

Перед механическими испытаниями титановые листовые образцы из сплава ВТ6 для получения на их поверхностях диффузионных слоев отжигали при температуре 900...950 °С в вакууме не хуже $1 \cdot 10^{-2}$ Па в контакте с прямоугольными листовыми образцами (оснастками) толщиной 2 мм и размером 120×145 мм (или 180×60 мм) из стали 20 и стали 12Х18Н10Т. Они были собраны в пакеты по 5 шт. так, чтобы каждый титановый образец находился между стальными образцами. Развитие процесса схватывания титана со сталью при отжиге приводило к значительной деформации образцов при их отделении от оснастки. В связи с этим при-

лаживаемое сжимающее давление было уменьшено до 0,1 МПа.

Фрактографические исследования поверхности титановых образцов после их отжига в контакте со стальными образцами выявили, что слаборазвитые участки схватывания образуются только после взаимодействия титана со сталью 12Х18Н10Т. При этом на поверхности титана вырывы практически отсутствовали.

Толщина диффузионных слоев на титане количественно характеризовалась глубиной охрупченной зоны, которая определялась по методике, изложенной в работе [3]. Толщина охрупченных слоев на поверхности титана не превышала 15...17 мкм.

При испытании образцов на одноосное растяжение влияние присутствующих на поверхности титана охрупченных слоев на его служебные характеристики выявлено не было. Во всех случаях уровень их свойств оставался не ниже допустимого для сплава ВТ6.

Испытания на циклическую усталость проводили согласно методике Б. А. Дроздовского по схеме изгиба плоского образца с консольным закреплением. Для испытаний использовали титановые образцы с надрезом (рис. 1, а).

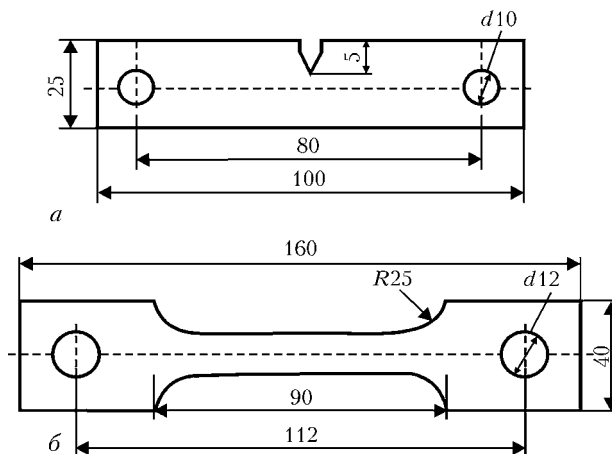


Рис. 1. Схемы образцов для испытаний на циклическую усталость изгибом (а) и повторно-статическое растяжение (б)

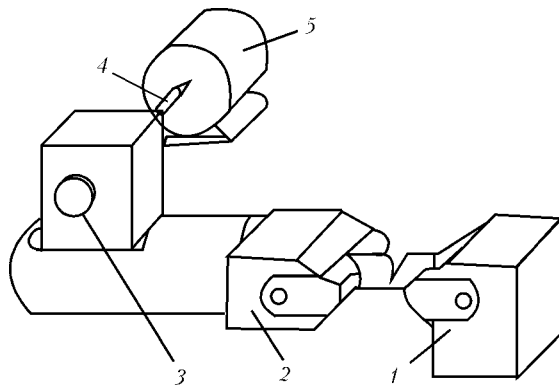


Рис. 2. Схема установки для создания трещин на листовых образцах (1-5 — см. объяснения в тексте)

При исследованиях измеряли время работы образцов до момента зарождения трещины длиной до 3 мм. Для испытания на циклическую усталость листовых образцов была изготовлена установка, оборудованная вибратором и специальными зажимами (рис. 2). Исследуемый образец закрепляли одним концом в неподвижном 1, а другим — в подвижном 2 зажиме, внутри которого находился эксцентрик 3 (диск с грузиками), который приводился во вращение через гибкий вал 4 от электродвигателя 5. Расстояние от точки надреза образца до оси вращения эксцентрика во всех опытах оставалось неизменным.

Зарождение трещины происходило в результате постоянной вибрации подвижного зажима, свобод-

но висящего на образце, с частотой 47 цикл/с. Момент возникновения трещины фиксировали по скачкообразному возрастанию амплитуды колебаний подвижного зажима. Автоматическое выключение установки происходило с помощью концевого выключателя, расположенного на заданном расстоянии от оси вибратора. Зная время работы образца до зарождения трещины и частоту вибрации, можно определить количество циклов нагружения N_T образца до возникновения трещины.

Результаты усталостных испытаний на циклический изгиб показали, что при наличии на образцах из сплава ВТ6 охрупченных слоев толщиной $\delta_{охр} = 0,1...0,5$ мкм, образующихся в контакте со сталью 20, наблюдается незначительное снижение их циклической долговечности по сравнению с материалом в состоянии поставки.

При увеличении толщины охрупченного слоя происходит уменьшение количества циклов нагружения N_T до образования трещины. При этом значения показателей долговечности образцов находятся в малоцикловой области ($N_T < 50000$) и убывают с увеличением толщины охрупченного слоя (рис. 3).

Поскольку усталостные трещины возникают в поверхностных слоях образцов, то их состояние играет важную роль. Поэтому получение высоких усталостных характеристик титановых образцов при толщине охрупченного слоя до 0,5 мкм связано с тем, что его толщина соизмерима или меньше критического размера образующейся трещины. В то же время можно предположить, что образование охрупченного слоя небольшой толщины на поверхности титана способствует ее упрочнению и созданию дополнительных сжимающих напряжений, которые тормозят развитие усталостных трещин.

Помимо усталостных испытаний на изгиб, указанные образцы подвергали также испытаниям по стандартной методике на повторно-статическое растяжение (см. рис. 1, б). Испытания проводили на машине УММ-10 (частота $f = 0,7...0,8$ Гц и коэффициент асимметрии цикла $R = +0,1$).

Результаты испытаний образцов на повторно-статическое растяжение (рис. 4) свидетельствуют о схожем характере зависимости долговечности титановых

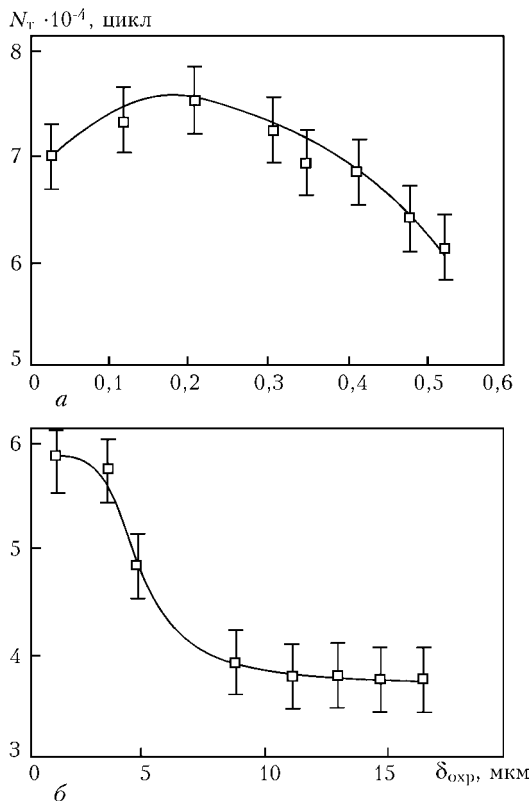


Рис. 3. Зависимость количества циклов нагружения N_T до появления трещины от толщины охрупченного слоя $\delta_{охр}$ при испытаниях на циклический изгиб образцов из сплава ВТ6 после отжига в контакте со сталью 20 (а) и сталью 12Х18Н10Т (б)

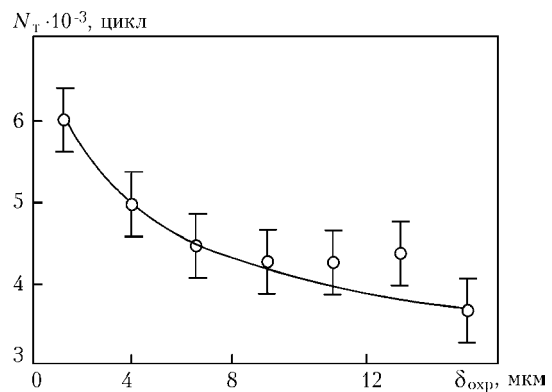


Рис. 4. Зависимость количества циклов нагружения N_T до появления трещины от толщины охрупченного слоя при испытании на повторно-статическое растяжение образцов из сплава ВТ6 после отжига в контакте со сталью 12Х18Н10Т



образцов от толщины охрупченного слоя с установленной выше.

Следует отметить, что в условиях диффузионной сварки титановых конструкций с сотовым наполнителем сжимающее удельное давление в зоне контакта несущих обшивок с технологической оснасткой в 20 раз больше используемого при отжиге образцов для механических испытаний. Поэтому в реальных условиях происходит более интенсивное развитие процесса схватывания титана с оснасткой, чем при экспериментах. В случае отделения оснастки от свариваемого изделия на поверхности титана могут формироваться дефекты в виде вырывов. При циклических нагрузках они будут являться концентраторами напряжений и источником зарождения усталостных трещин.

Исходя из изложенного выше часть образцов для испытаний на повторно-статическое растяжение (см. рис. 1, б) изготавливали непосредственно из несущих обшивок (толщиной 0,8 мм) панелей с сотовым наполнителем размером 20×150×500 мм. Сварку этих панелей осуществляли в низком вакууме. При последующем испытании на изгиб разрушение происходило по зоне диффузионного соединения обшивки с сотовым наполнителем, при этом обшивка отделялась от наполнителя.

На внешней поверхности несущих обшивок, контактирующих со стальной оснасткой при диффузионной сварке, отчетливо наблюдались следы непосредственного взаимодействия оснастки с изделием — контактные участки. С помощью фрактографических исследований этих участков на поверхности несущих титановых обшивок было выявлено существенное влияние на их топографию материала технологической оснастки.

При использовании оснастки из стали 12Х18Н10Т на контактных участках появлялись следы вырывов и хрупкого разрушения, которое происходило не только по титану, но и по стали. В технологических листах из стали 20 на контактных участках титана выявлены пленки (очевидно, содержащие карбиды титана) со слабыми следами взаимодействия оснастки с изделием.

Необходимо отметить, что в случае повторного применения технологических листов как из стали 12Х18Н10Т, так и стали 20 при диффузионной сварке количество и размер дефектов в контактных участках увеличивался. При этом возрастало и усилие, необходимое для отделения оснастки от изделия.

Применительно к оснастке из стали 12Х18Н10Т это объясняется насыщением ее поверхности титаном, а из стали 20 — обеднением ее углеродом и подавлением реакции образования карбидов титана.

Effect of the material of fixture used for diffusion bonding of thin-walled laminated structures of titanium on its performance has been established. Fractography data and mechanical test results show that performance of the bonds in titanium is higher in the case of using the fixture of steel 20, compared with steel 12Kh18N10T.

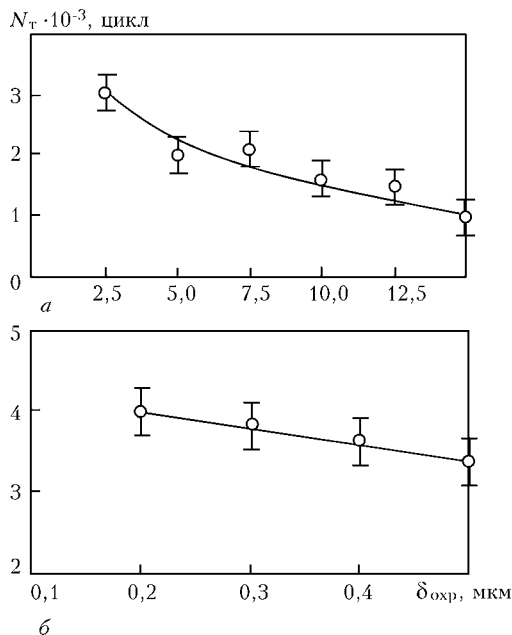


Рис. 5. Зависимость количества циклов нагружения N_T до появления трещины от толщины охрупченного слоя при испытаниях на повторно-статическое растяжение образцов из сплава ВТ6 после сварки при 950 °С в контакте со сталью 12Х18Н10Т (а) и со сталью 20 (б)

Результаты испытания образцов на повторно-статическое растяжение приведены на рис. 5. Из них следует, что, во-первых, существует и сохраняется ранее установленная зависимость $N_T = f(\delta_{\text{окр}})$: при $\delta_{\text{окр}} \leq 0,5$ мкм количество циклов нагружения N_T изменяется незначительно; дальнейшее увеличение $\delta_{\text{окр}}$ сопровождается существенным снижением значений N_T . Во-вторых, долговечность образцов, изготовленных из несущих обшивок сотовых панелей, подвергнутых термомеханическому циклу сварки, значительно ниже, чем образцов из листового материала и отожженных (по существу без деформации) в контакте со стальями: после взаимодействия титана со сталью 20 значения N_T снижаются примерно в 2 раза, а со сталью 12Х18Н10Т — в 7...9 раз. Такое уменьшение значений N_T обусловлено микрогеометрией поверхности (образованием вырывов, подрезов и пр.).

1. Схватывание деталей из титана со стальной оснасткой при диффузионной сварке / С. Н. Федоров, А. В. Бондарь, В. В. Пешков, В. В. Шурупов // Автомат. сварка. — 2000. — № 1. — С. 23–26, 32.
2. Образование охрупченных слоев на титане при его взаимодействии со стальной технологической оснасткой в условиях диффузионной сварки / В. В. Шурупов, В. В. Пешков, М. Н. Шушпанов, Л. С. Киреев // Там же. — 2000. — № 2. — С. 17–20.
3. Определение глубины охрупченной части окисленного слоя на поверхности титана / В. В. Пешков, Г. Д. Дель, Л. М. Орлова, В. Н. Милютин // Завод. лаб. — 1986. — № 9. — С. 75–77.

Поступила в редакцию 08.11.2002



ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА СВАРНЫХ ТОЛСТОСТЕННЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОРПУСОВ СОСУДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Академик **Б. Е. ПАТОН** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
А. Д. ЧЕПУРНОЙ, д-р техн. наук (Мариупольский завод тяжелого машиностроения),
В. Я. САЕНКО, **Л. Б. МЕДОВАР**, доктора техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены основные этапы создания в нашей стране технологии производства сварных толстостенных биметаллических сосудов высокого давления, рассмотрены перспективы развития производства биметаллических сосудов на современном этапе.

Ключевые слова: биметаллические корпуса, сосуды высокого давления, штамповарные сосуды, биметаллические заготовки, биметаллические листы, реакторы для переработки нефтепродуктов, раскатные многослойные обечайки, барабаны паровых котлов, электрошлаковая сварка, плакирование при штамповке, плакирование взрывом

В середине XX столетия в процессе создания новой техники, прежде всего, атомной энергетики, военного судостроения, космонавтики, нефтехимической промышленности, перед наукой и производством были поставлены сложные задачи, связанные с необходимостью разработки эффективной технологии изготовления толстостенных биметаллических сосудов высокого давления, способных работать в условиях повышенных температур и давлений, периодических теплосмен, длительного воздействия сильноагрессивной среды, радиации и др.

Дело в том, что в большинстве случаев нет необходимости изготавливать толстостенный сосуд

или аппарат высокого давления целиком из нержавеющей высоколегированной стали или сплава. Достаточно защитить его внутреннюю поверхность от агрессивного воздействия рабочей среды сравнительно тонким (3...8 мм) коррозионностойким слоем из этой стали или сплава. Только в отдельных случаях, например при изготовлении трубных досок теплообменных химических аппаратов, нужно наносить защитный слой на внутреннюю и внешнюю поверхность. При этом интерес к биметаллическим сосудам обуславливается не только необходимостью экономии остродефицитных материалов. Применение биметалла с основным слоем из низко- или среднелегированной стали повышенной или высокой прочности позволяет существенно уменьшить толщину стенки сосуда. В результате масса такого биметаллического корпуса, а также трудоемкость его изготовления становятся

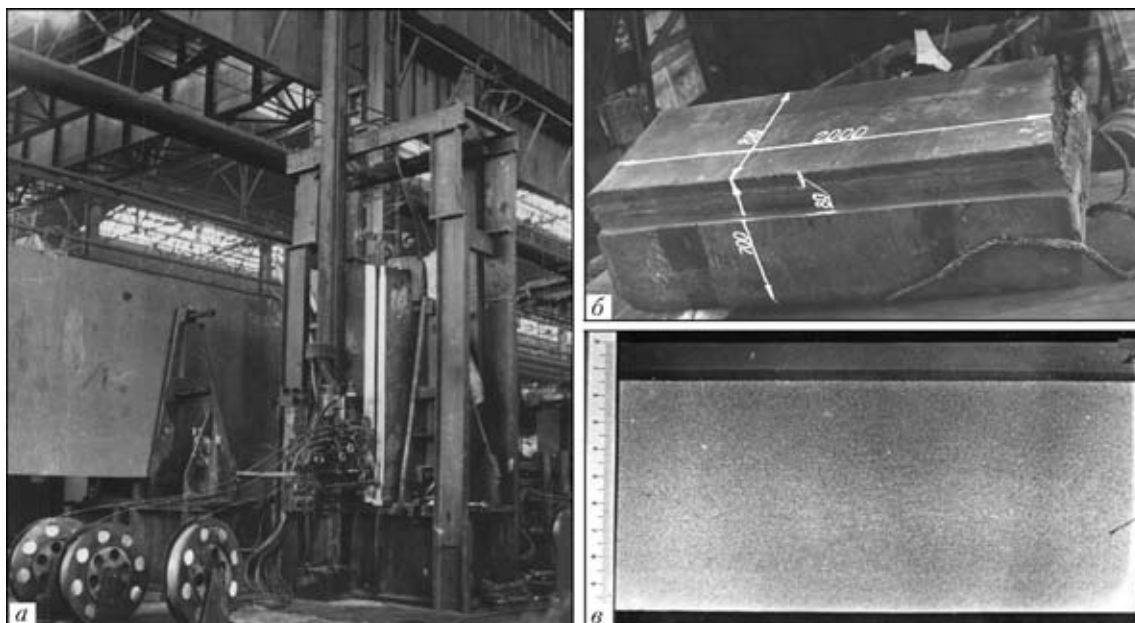


Рис. 1. Двухслойная заготовка, подготовленная к ЭШС с применением электродов (6 шт.) двумя аппаратами А-535 одновременно в общую сварочную ванну (а), двухслойная заготовка после ЭШС (б) и макрошлиф биметалла 09Г2ДТ + 1Х18Н10Т ($\delta = 100$ мм), прокатанного из указанной двухслойной заготовки (в)



Рис. 2. Штамповарной шарообразный баллон ($P_{\text{раб}} = 35$ МПа; $T_{\text{раб}} = -70...100$ °С; $d_{\text{нар}} = 1000$ мм) из биметалла 09Г2С + 0Х18Н10Т ($\delta = 100$ мм)

намного меньше, чем однослойного, например выполенного целиком из нержавеющей стали 08Х18Н10Т.

Производство толстостенных биметаллических сосудов путемковки на прессе и последующей наплавки коррозионностойкой стали на внутреннюю поверхность в начале 1960-х гг. являлось единственным способом получения, например, корпусов энергетических атомных реакторов. Вместе с тем, применяемый технологический процесс производства цельнокованных и ковочно-сварных биметаллических корпусов отличался низким коэффициентом использования материалов (в среднем 0,3), высокой трудоемкостью и длительностью цикла изготовления, что сдерживало выпуск указанных изделий.

Следует отметить, что еще в 1952 г. на Таганрогском заводе «Красный котельщик» (ТКЗ) в тесном содружестве с ИЭС им. Е. О. Патона впервые в мировой практике способом электрошлаковой сварки (ЭШС) изготовлены толстостенные барабаны паровых котлов тепловых электростанций из листового проката. Сначала освоили сварку только продольных швов, а затем и кольцевых. В 1954 г. производство штамповарных барабанов котлов с применением ЭШС было начато на Барнаульском котельном заводе (БКЗ). При освоении новой технологии производства барабанов котлов на ТКЗ обечайки из листовой стали марки 22К толщиной 90 мм вальцевали, а на БКЗ изготавливали из двух полуобечайек (корыт), которые штамповали на специальном прессе [1].

Для промышленной реализации штамповарного варианта изготовления толстостенных биметаллических корпусов требовались крупногабаритные биметаллические листы толщиной 80...300, шириной до 2500 и длиной до 6000 мм с гарантированной прочностью сцепления между плакирующим и основным слоями по всей площади листа,

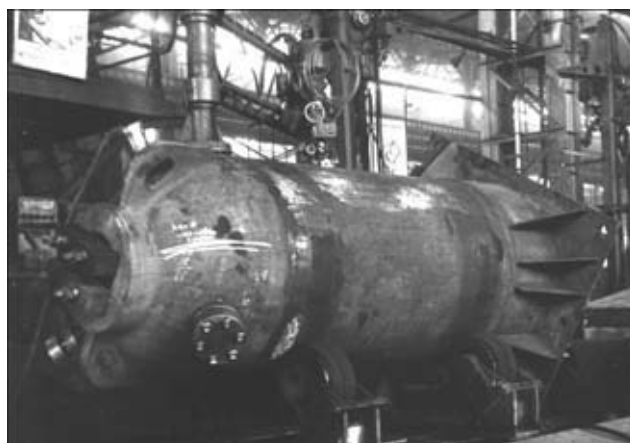


Рис. 3. Штамповарной цилиндрический сосуд ($P_{\text{раб}} = 32$ МПа; $T_{\text{раб}} = -40...100$ °С; $d_{\text{нар}} = 1500$ мм) из биметалла 09Г2С + 0Х18Н10Т ($\delta = 170$ мм)

которые наша промышленность в то время не производила.

В результате совместных экспериментов, проведенных в 1959–1960 гг. ИЭС им. Е. О. Патона Кузнецким металлургическим комбинатом и БКЗ, в опытно-промышленных условиях был предложен способ производства биметаллических листов на основе применения ЭШС [2]. Сущность этого способа заключалась в том, что плакирующая плита из нержавеющей высоколегированной стали или сплава приваривалась способом ЭШС к одной или двум широким плоскостям слитка или поковки из углеродистой, низко- или среднелегированной стали, а затем такая сварная заготовка нагревалась и прокатывалась на стане до получения двух-, трехслойного листа необходимых размеров (рис. 1).

В 1961 г. на Ждановском заводе тяжелого машиностроения — ЖЗМТ (в настоящее время — Мариупольский завод тяжелого машиностроения — МЗТМ), Металлургическом заводе им. Ильича и Коммунарском металлургическом заводе (ныне — Алчевский металлургический комбинат, АМК) совместно с ИЭС им. Е. О. Патона были продолжены работы по совершенствованию способа получения на основе ЭШС двух-, трехслойного листового проката. В результате на ЖЗМТ и Металлургическом заводе им. Ильича совместно с ИЭС им. Е. О. Патона было освоено производство листов из биметалла 09Г2С + 0Х18Н10Т толщиной 100...170 мм способом ЭШС. При этом биметаллические заготовки массой до 15 т сваривали на ЖЗМТ, а затем прокатывали на стане 4500 Металлургического завода им. Ильича [3, 4]. Важным преимуществом указанного способа является то, что антикоррозионные и другие свойства плакирующего слоя, определяемые химическим составом металла плакирующей плиты, могут быть заданы еще до изготовления биметаллической сварной заготовки. Кроме того, применение ЭШС для получения биметалла позволяет обеспечивать надежное сцепление слоев, не зависящее от степени обжатия при прокатке и достигаемое в результате проплавления свариваемых кромок при ЭШС.

В бывшем СССР первые толстостенные сосуды высокого давления в штамповарном исполнении



Рис. 4. Штамповварной корпус транспортного атомного энергетического реактора биметаллического проката 18Х2МА + 00Х18Н10Т в стенде после окончательной механической обработки

из биметалла были изготовлены в 1962 г. на ЖЗТМ в соответствии с технологическим процессом, разработанным совместно с ИЭС им. Е. О. Патона. Это были шарообразные баллоны [5] с толщиной стенки 100 мм и диаметром 1000 мм из биметалла 09Г2С + 0Х18Н10Т, предназначенные для работы при давлении 35 МПа и температуре от -70 до 100 °С (рис. 2). В 1963 г. на этом же заводе освоено производство цилиндрических баллонов [6] (с полусферическими днищами) из биметалла 09Г2С + 0Х18Н10Т толщиной 170 и диаметром 1500 мм для работы при давлении 32 МПа и температуре от -40 до 100 °С (рис. 3).

В 1967 г. на ЖЗТМ впервые в отечественной практике изготовлен штамповварной корпус транспортного атомного энергетического реактора ОК-350 из биметаллического проката 18Х2МА + 00Х18Н10Т (рис. 4). В создании биметаллического штамповварного корпуса ОК-350, кроме ИЭС им. Е. О. Патона, ЖЗТМ и Металлургического завода им. Ильича, принимали участие НИКИЭТ, ИАЭ им. И. В. Курчатова, ЦНИИ «Прометей» и другие организации.

Большая заслуга в создании новых способов и технологии получения на основе сварочных процессов и штамповварного варианта для производства толстостенных биметаллических сосудов вы-

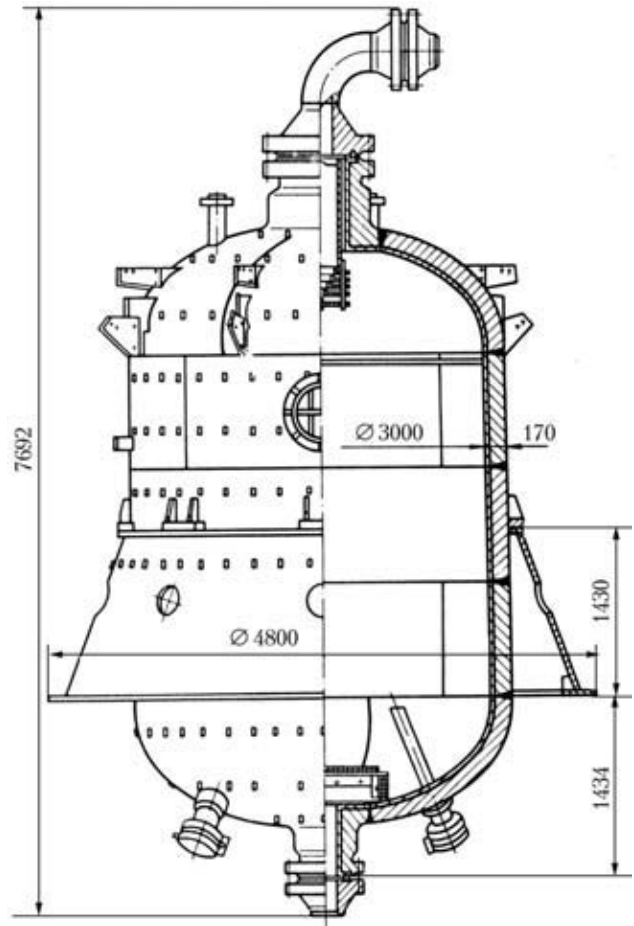


Рис. 5. Схема штамповварного реактора для реформинга ($P_{\text{раб}} = 4,7$ МПа; $T_{\text{раб}} = 525$ °С; $d_{\text{вн}} = 3000$ мм) из биметалла 12ХМ + 08Х18Н10Т ($\delta = 170$ мм). Масса аппарата в рабочем состоянии 83,7 т

сокого давления принадлежит академику НАН Украины Б. И. Медовару, под научным руководством и с непосредственным участием которого проводились эти работы в течение многих лет.

Способ производства толстостенового биметалла с применением ЭШС получил признание как у нас в стране, так и за рубежом. Из биметалла, полученного этим способом, был изготовлен ряд ответственных сосудов высокого давления. Вместе с тем широкое применение способа ЭШС при производстве биметалла на ЖЗТМ сдерживалось сравнительно высокой трудоемкостью и сложностью применяемой в то время технологической схемы ЭШС биметаллических заготовок толщиной 800...1000 и высотой до 2500 мм. С целью обеспечения равномерного и минимального проплавления свариваемых кромок ЭШС выполняли шестью электродами диаметром 3 мм двумя сварочными аппаратами А-535. При этом все шесть электродов через мундштуки подавали одновременно в общую сварочную ванну (по три с каждой стороны сварочного зазора) (см. рис. 1, а). В процессе сварки осуществлялось возвратно-поступательное перемещение мундштуков вдоль сварочного зазора по толщине стыка — от боковой кромки до середины и обратно для каждого аппарата А-535.

В конце 1960-х гг. производство толстостенового биметалла способом ЭШС для сосудов вы-

сокого давления было прекращено в связи с разработкой и освоением на указанных заводах новой технологии получения биметалла способом автовакуумной сварки давлением (АСД) путем прокатки несимметричных пакетов. Новая технология, по сравнению с применяемой ранее на основе ЭШС, характеризовалась более высокими технико-экономическими показателями [7–9].

Весьма эффективно применение толстостенных биметаллических сосудов высокого давления в нефтехимической промышленности. Производство штампованных реакторов для гидроочистки и риформинга из полученного способом АСД биметалла с коррозионностойким слоем из стали 08X18H10T и основным слоем из теплоустойчивой стали марок 12ХМ, 20Х2М и др. с 1965 г. было освоено на ПО «Ждановтяжмаш» [10], что позволило сократить сроки их изготовления, монтажа и ввода в эксплуатацию, а также повысить надежность и безопасность в работе. Следует отметить, что биметаллические реакторы для продуктов нефтепереработки, по сравнению с применяемыми однослойными реакторами с торкрет-бетонной внутренней футеровкой, не требуют обязательных периодических остановок в процессе эксплуатации для ремонта и замены футеровки.

Реакторы для риформинга и гидроочистки представляют собой вертикальные цилиндрические штампованные сосуды высокого давления с полушарообразными или эллиптическими днищами. Биметаллические корпуса свободно устанавливаются на конические опоры, прикрепленные анкерными болтами к бетонным постаментам. Размеры их по диаметру доходят до 4000 мм, длина — до 16 м, масса — до 160 т, толщина стенки — до 150 мм.

Реакторы для риформинга (рис. 5) предназначены для проведения реакции риформинга нефтепродуктов в среде водородсодержащего газа в слое катализатора. Рабочее давление при реакции в зависимости от конструкции реактора и катализатора составляет 2,3...4,9 МПа, а температура — 480...540 °С. Реакторы для гидроочистки (рис. 6) предназначены для ведения процесса гидроочистки дизельных топлив в ходе взаимодействия водорода с олефинами, которые в слое алюмоплатинового катализатора переводятся в насыщенные углеводороды. Рабочее давление при реакции в зависимости от конструкции реактора составляет 2,6...6,0 МПа, а температура — 350...500 °С. При регенерации эти параметры равны соответственно 0,3...3,0 МПа и 480...550 °С. Разработку проектной технической документации на изготовление реакторов для продуктов нефтепереработки проводили с участием ВНИИНефтемаш, Ленгипро-нефтемаш и др.

В процессе разработки штампованного варианта изготовления толстостенных биметаллических корпусов на ЖЗТМ потребовалось решение ряда технических вопросов по штамповке, сварке, термической и механической обработке отдельных узлов (обечаек, днищ, патрубков и др.) из биметалла и биметаллических сосудов в сборе. Многие технологические вопросы пришлось решать впервые

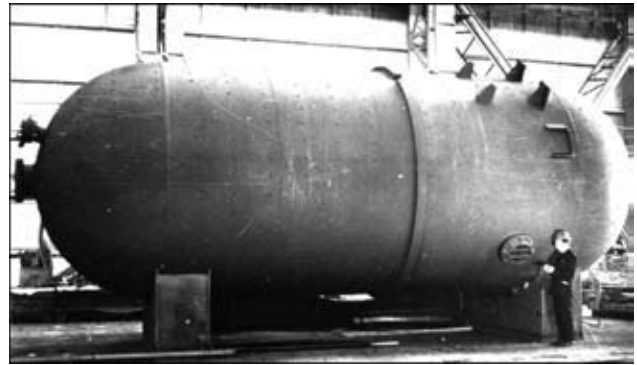


Рис. 6. Штампованной реактор для гидроочистки ($P_{\text{раб}} = 6,0$ МПа; $T_{\text{раб}} = 425...500$ °С; $d_{\text{вн}} = 3560$ мм) из биметалла 12ХМ + 08Х18Н10Т ($\delta_{\text{корн}} = 135$ мм; $\delta_{\text{днищ}} = 80$ мм). Масса аппарата в рабочем состоянии 138,7 т

в отечественной практике. Для примера остановимся на одном из них.

Наибольшие трудности при производстве толстостенных полушарообразных днищ (не только биметаллических) возникают в том случае, если их невозможно получить цельноштампованными ввиду ограниченности штамповального пространства прессов или ограниченной мощности прессы. Обычно такие днища изготавливают сварными из предварительно отштампованных лепестков длиной $1/3\pi R$ (где R — радиус шара) и сферического диска. Существенный недостаток указанного способа заключается в трудности получения днищ заданной геометрической формы из-за неравномерности усадки после штамповки, а также неравномерной деформации при сварке. Однако эти факторы трудно поддаются расчету и практически не могут быть учтены в процессе изготовления толстостенных днищ, что особенно касается днищ из толстостенового биметалла, у которых термическая усадка вследствие различия коэффициентов расширения слоев достигает значительных размеров.

Для облегчения получения заданной сферической формы был разработан способ изготовления сварных крупногабаритных толстостенных полушарообразных лепестковых днищ [11], который заключается в сборке симметричного шарового пояса, составленного из лепестков, по длине не менее $2/3\pi R$. После чего производят сварку лепестков шарового пояса, например способом ЭШС. Затем к шаровому поясу приваривают два сферических диска и производят термообработку шара. Полученный шар разрезают на два равных полушарообразных днища по экваториальной плоскости, перпендикулярной к оси симметрии, проходящей через центры сферических дисков. Существенным достоинством этого способа является возможность осуществления штамповки лепестков и сферического диска в одном штампе. При этом отпадает необходимость в специальном калибровочном штампе. Указанный способ [11] был успешно применен на ЖЗТМ при производстве крупногабаритных днищ биметаллических корпусов реакторов для продуктов нефтепереработки.

Одновременно с разработкой технологии производства штампованных днищ и обечаек из толстостенового биметалла были решены вопросы

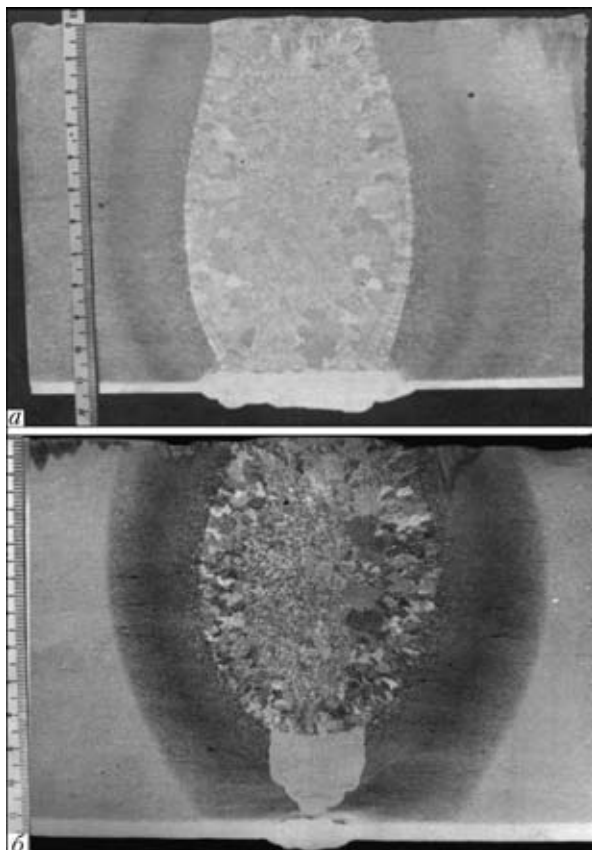


Рис. 7. Макроструктура продольного шва штампованного сосуда из биметалла 09Г2С + 0Х18Н10Т ($\delta = 170$ мм) с полным удалением плакирующего слоя в зоне сварки (а) и с комбинированной разделкой кромок, предусматривающей предварительную подварку основного слоя (б). Масса аппарата в рабочем состоянии 138 т

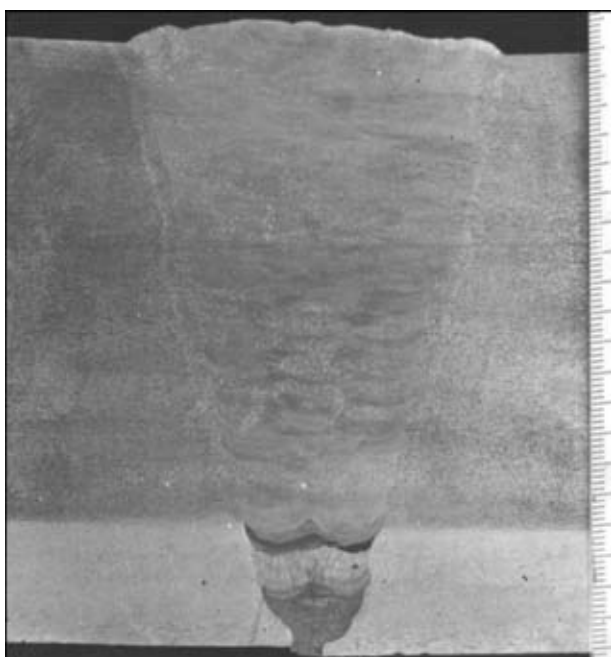


Рис. 8. Макроструктура кольцевого диаметального шва шарообразного баллона из биметалла 20Х2МА + 0Х18Н10Т ($\delta = 120$ мм), выполненного автоматической сваркой при одностороннем доступе к свариваемым кромкам (только снаружи) со стороны основного металла

сварки сосудов. Применение ЭШС для сварки толстостенных биметаллических корпусов наиболее целесообразно.

Недостатком данного способа является обязательная нормализация изделия после сварки. При термообработке крупногабаритных сосудов такой высокотемпературный нагрев может привести к потере формы изделия. По этой причине нормализацию небольших сосудов или отдельных узлов (длиной до 4 м) по возможности проводят в вертикальном положении. Затем отдельные нормализованные после ЭШС узлы свариваются автоматической многослойной сваркой под флюсом с последующим отпуском готового изделия.

Следует отметить, что на БКЗ для штампованных герметизируемых сосудов после ЭШС применяли высокотемпературный нагрев с избыточным внутренним давлением. Для этого в сосуд перед нагревом под нормализацию загружали древесину, затем сосуд герметизировали. В результате сухой перегонки древесины при нагреве внутри сосуда создается достаточное давление, чтобы предотвратить его провисание и коробление [1].

Для ЭШС продольных и кольцевых швов биметаллического корпуса рекомендована разделка кромок (рис. 7, а) с полным удалением строжкой плакирующего слоя (шириной 20... 40 мм на каждую кромку) по длине шва. Кроме того, для продольных швов была опробована комбинированная разделка кромок (рис. 7, б) с предварительной подваркой основного слоя внутри сосуда, которая легко обеспечивает требуемую геометрическую форму обечаек и значительно уменьшает объем наплавочных работ внутри корпуса. Такая технология внедрена при сварке цилиндрического сосуда с толщиной стенки 170 мм из двухслойной стали 09Г2С + 0Х18Н10Т.

Однако применительно к сварке корпусов из биметалла 18Х2МА + 0Х18Н10Т этот тип разделки оказался неприемлемым, поскольку при дуговой подварке основного слоя требуются предварительный подогрев, а также последующий отпуск, что усложняло технологический процесс.

Форма подготовки кромок с полным удалением плакирующего слоя в зоне сварки (рис. 7, а) является наиболее технологичной, поскольку позволяет получить равнопрочное сварное соединение без подплавления нелегированными швами аустенитной плакировки, предотвратив тем самым образование хрупких закалочных структур в зоне сплавления разнородных сталей. Сварку основного слоя выполняют по обычно принятой для основного металла технологии ЭШС, затем в местах выборки наплавку коррозионностойкого слоя в два или более проходов, например ленточным электродом автоматической сваркой под флюсом.

Разработан также вариант односторонней сварки диаметального шва, внедренный в 1963 г. при производстве на ЖЗТМ шарообразных биметаллических баллонов из стали 09Г2С + 0Х18Н10Т и 20Х2МА + 0Х18Н10Т толщиной 120 мм (рис. 8). Это связано с тем, что доступ внутрь шарообразного баллона из-за малого отверстия в горловине ока-

заялся невозможен. В таком случае корневой шов, расположенный в аустенитном плакирующем слое, выполняют механизированной сваркой в углекислом газе проволокой типа Х20Н9С2БТЮ, обеспечивающей высокую стойкость металла шва против межкристаллитной коррозии. Сварку корневого шва производят в вертикальном положении со сквозным проплавлением и обратным формированием на весу за счет сил поверхностного натяжения. Затем та часть, которая выполнена в плакирующем слое, заполняется аустенитными электродами, после чего на поверхность аустенитного наплавленного металла накладывают разделительный слой (два прохода) электродной проволокой из армо-железа. Поверх разделительного слоя многопроходную сварку под флюсом проводят по обычной технологии. Ферритный разделительный слой обеспечивает минимальное снижение пластических свойств наплавленного металла, легируемого хромом и никелем, в результате неизбежного проплавления аустенитного металла, а также предотвращает образование трещин в металле переходной зоны шва (рис. 8).

В результате проведения на ЖЗТМ большого комплекса экспериментальных исследований на натурных образцах и опытных изделиях был разработан оптимальный процесс изготовления биметаллических корпусов в штампованном исполнении, освоены на производстве технологии гибки, штамповки, сварки и термообработки, обеспечивающие получение требуемой геометрии корпуса (максимальная несоосность стыкуемых обечаек корпуса и днища составляет не более 2,5 мм).

Как известно, для изготовления весьма обширной группы сварных сосудов высокого давления технически наиболее целесообразно и экономически выгодно использовать низко- и среднелегированные стали повышенной или высокой прочности. Действительно, применение сталей с высокой прочностью, пластичностью и вязкостью позволяет не только существенно уменьшить габариты сварных изделий, снизить расход металла, но и способствует созданию новых конструктивных и технологических решений, реализация которых без использования подобных сталей была бы невозможной. Проведенные в середине 1960-х гг. с нашим участием комплексные опытно-исследовательские работы в целях повышения качества металла основного слоя биметаллических корпусов сосудов высокого давления показали, что толстолистовой прокат сталей 09Г2С, 16ГНМ, 18Х2М ($\delta = 80...115$ мм) после электрошлакового переплава (ЭШП) характеризуется улучшенными (по сравнению с исходным мартеновским металлом) свойствами — в нем содержится значительно меньше серы, немагнитических включений, газов, отсутствует анизотропия пластических свойств, ударная вязкость поперечных образцов увеличивается на 40...80 %, а по толщине листа (по оси Z) — на 300...400 % по сравнению с исходным металлом. Порог хладноломкости образцов металла ЭШП, вырезанных по оси Z, смещается на 30° в сторону отрицательных температур для нормализованного металла и на 50° для закаленного металла. Сварные соединения

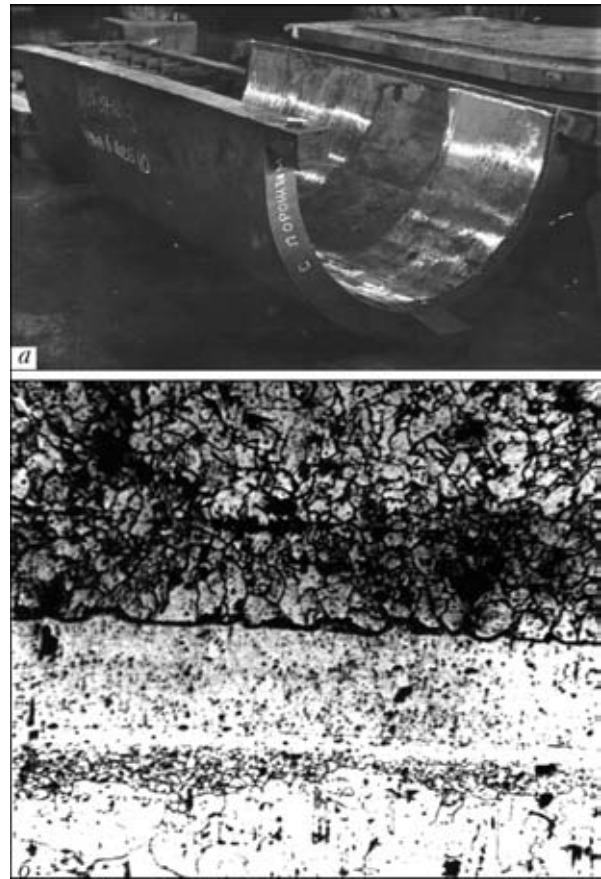


Рис. 9. Внешний вид (а) биметаллической полуобечайки ($d_{нар} = 1800$ мм; $\delta = 120$ мм), полученной в процессе горячей штамповки с применением прослойки Ni-Mn и микроструктура ($\times 100$) зоны соединения слоев в биметалле 18Х2МА + 0Х18Н10Т после штамповки (б)

стали 09Г2С после ЭШС можно подвергать лишь высокому отпуску, который обеспечивает требуемую ударную вязкость в металле ЗТВ [12].

Как показали исследования [13], весьма перспективным при производстве биметаллических корпусов сосудов высокого давления из толстолистовой низко- и среднелегированной стали ЭШП может оказаться применение электронно-лучевой сварки (ЭЛС), для реализации которой нормализация не обязательна. Так, при ЭЛС стали 18Х2МАШ толщиной 80 мм для получения практически равнопрочного соединения с высоким уровнем ударной вязкости металла шва и ЗТВ при -70 °С достаточен только отпуск после сварки. Кроме того, при ЭЛС биметаллических корпусов ширина дорожки удаляемого перед сваркой плакирующего слоя не превышает 5 мм на сторону, что дает возможность существенно уменьшить объем наплавочных работ внутри сосуда после ЭЛС основного слоя.

На ЖЗТМ в процессе освоения промышленного производства биметаллических штампованных сосудов одновременно проводили поисковые работы по созданию принципиально новых, более дешевых и эффективных способов их изготовления, не требующих для своей реализации биметаллического проката. Остановимся на некоторых из этих разработок, которые по разным причинам не были доведены

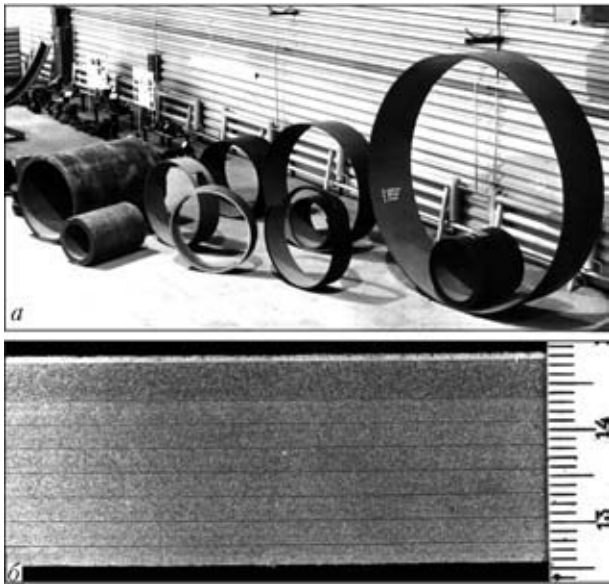


Рис. 10. Внешний вид кольцевых КСМ обечаек (более тонкие и большего диаметра), полученных способом горячей раскатки на кольцераскатном стане, МС заготовок (более толстые и меньшего диаметра), изготовленных путем канонической навивки рулонной ленты из стали 09Г2СФ (а), макроструктура металла КСМ обечаек с коррозионностойким внутренним слоем (б)

до промышленного внедрения, но и сегодня через много лет еще не утратили своего значения.

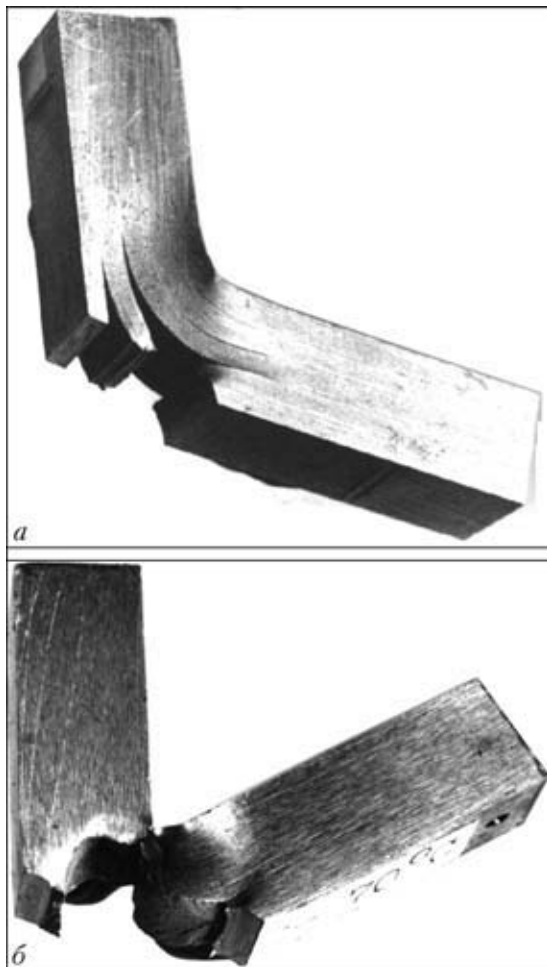


Рис. 11. Характер разрушения образцов Шарпи при ударном изгибе из стали 09Г2СФ КСМ (а) и 09Г2СФ (б)

В предложенном способе [14] процесс плакирования поверхности заготовки (изделия) совмещают в одной технологической операции с процессом ее горячей штамповки, т. е. две операции, а именно: образование прочного сцепления между слоями и изготовление требуемой заготовки или изделия из биметалла объединяют в одну операцию. На рис. 9, а приведен внешний вид биметаллической (18Х2МА + 08Х18Н10Т) полуобечайки толщиной 120 мм, диаметром 1800 мм, изготовленной в производственных условиях ЖЗТМ непосредственно в процессе горячей штамповки с применением разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона [9] способа прессовой сваркопайки (ПСР). При нагреве под штамповку ($T_{шт} = 1150...1170\text{ }^{\circ}\text{C}$) порошок марганценикелевого сплава (60Mn-40Ni) с $T_{пл} = 1018\text{ }^{\circ}\text{C}$, помещенный в зазор между основным и плакирующими слоями двухслойной заготовки, герметизированной по периметру сваркой, расплавляется, растворяя поверхностные оксидные пленки и обеспечивая надежный контакт между соединяемыми плоскостями. В процессе штамповки происходит выдавливание прослойки на периферию в специальные копильники и толщина ее в готовой биметаллической заготовке не превышает 0,25 мм, что обеспечивает гарантированное сцепление между слоями ($\sigma_{среза} > 300\text{ МПа}$). Макро- и микроисследования зоны сплавления в биметалле показали его высокое качество по всей поверхности плакирования (рис. 9, б).

В начале 1980-х гг. в ИЭС им. Е. О. Патона была предложена принципиально новая технология получения цилиндрических заготовок для сосудов высокого давления из раскатных многослойных заготовок [15]. Сущность этой технологической схемы состоит в том, что многослойную (МС) заготовку, полученную путем канонической навивки под прямым углом рулонной ленты толщиной 3...6 мм, нагревают в печи, а затем осуществляют раскатку такой МС заготовки на кольцераскатном стане до получения сцепления между слоями на основе АСД. В связи с тем, что диаметр МС заготовки в процессе горячей деформации увеличивается, для раскатки берут МС заготовки с диаметром меньшим, чем требуемый конечный диаметр цилиндрической обечайки, и большей суммарной толщиной.

Использование рулонной стали, не требующей специальной подготовки поверхности перед намоткой МС заготовки, а также совмещение процессов соединения слоев и формирования обечайки заданных размеров позволяют получать сравнительно дешевые бесшовные кольцевые заготовки. Опытно-промышленные испытания [16, 17] показали, что специальная конструкция МС заготовки и оптимальная технология ее раскатки обеспечивают надежное сцепление между слоями и получение монолитного металлического материала с особой макроструктурой, названного квазислоистым металлическим материалом (КСМ) (рис. 10). Основная особенность КСМ состоит в организованном слоистом внутреннем строении. Такой материал характеризуется свойствами многослойных металлических материалов при динамических нагрузках

и низких температурах, а также обычных монолитных металлических материалов при статической нагрузке. При испытаниях на ударный изгиб, если надрез нанесен на поверхность КСМ, металл образца не удается разрушить (рис. 11). Сопротивление материала распространению трещины обеспечивается расщеплением металла КСМ на ряд слоев у ее вершины. Достоинством технологии горячей раскатки КСМ обечаек является возможность получения квазислоистой структуры с коррозионностойким плакирующим слоем (внутренним или наружным или одновременно и с тем, и с другим).

Металл КСМ поддается всем видам и способам сварки, как и обычный монолитный металл. На основе горячей раскатки МС заготовок можно получить различные кольцевые заготовки сосудов высокого давления, труб для энергетических установок, в том числе биметаллических с коррозионностойким внутренним слоем, а также для других изделий ответственного назначения, материал которых должен отличаться высокой стойкостью против хрупких разрушений, особенно при отрицательной температуре. Однако для организации промышленного производства таких обечаек требуется создание станов для раскатки заготовок высотой 2000 мм и более, поскольку существующие позволяют раскатывать обечайки высотой до 750 мм [18].

В этой связи заслуживает внимания работа [19], в которой предлагается технология раскатки кольцевых заготовок для производства оборудования АЭС. С использованием раскатного стана (радиального или вертикального типа) изготавливают крупногабаритные заготовки реакторов высокой точности (с минимальными припусками) диаметром до 8 м и высотой до 4 м, что позволяет резко (почти на 30 %) сократить расход металла. Наряду с этим уменьшается на 20...25 % трудоемкостьковки и в 1,5...2 раза механической обработки, снижается расход режущего инструмента, сокращается цикл изготовления крупногабаритных кольцевых изделий, частично высвобождаются производственные мощности сталеплавильного, кузнечно-прессового и механообрабатывающего производства. Одновременно, как показано в статье [17], в процессе горячей раскатки кольцевых заготовок на раскатном стане решается проблема получения биметаллических обечаек.

Полученные результаты дают основание для проведения комплекса работ по созданию раскатного оборудования и промышленной технологии производства различных кольцевых заготовок сосудов высокого давления, корпусов атомных реакторов, биметаллических труб для энергетических установок и других изделий ответственного назначения, материал которых должен иметь улучшенные характеристики вязкости и сопротивления хрупкому разрушению в условиях работы при низких температурах, а также воздействия агрессивной коррозионной среды и нейтронного облучения.

Проблема плакирования внутренней поверхности толстостенных сосудов, в том числе изготавливаемых из раскатных обечаек, также может быть

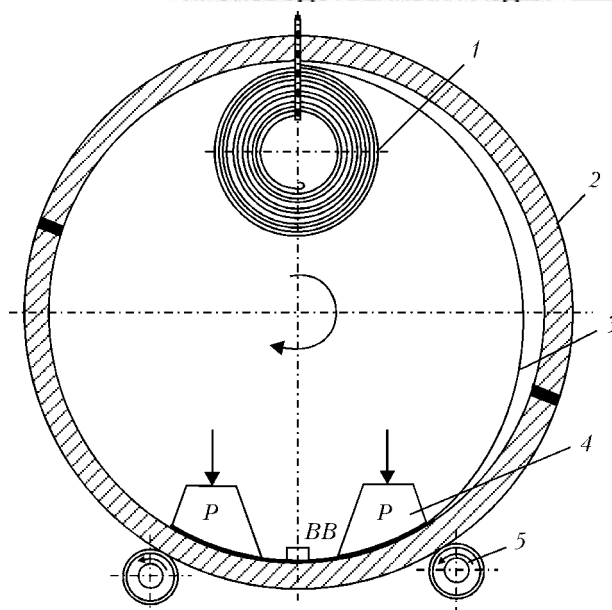


Рис. 12. Принципиальная схема плакирования внутренней поверхности цилиндрических сосудов с использованием сварки взрывом: 1 — рулон, свернутый из полотна плакирующего металла; 2 — корпус сосуда; 3 — полотно плакирующего металла; 4 — прижимы; 5 — роликовый стенд

решена путем использования сварки взрывом. Согласно разработанному на ЖЗТМ совместно с ИЭС им. Е. О. Патона способу [20], плакирующий материал, например коррозионностойкая сталь марки 12Х18Н10Т в виде полотна (ленты) толщиной 0,5...1,5 мм, предварительно свернутого в рулон, помещают внутрь сосуда и закрепляют в обойме (рис. 12). Сосуд с целью вращения устанавливают на роликовом стенде. Рулон постепенно разворачивают и в нижнем положении накладывают на внутреннюю поверхность сосуда, в двух местах по всей длине сосуда закрепляют прижимами. Между прижимами по всей длине сосуда располагают линейный заряд взрывчатого вещества (ВВ), который инициируют. Таким образом, происходит локальная сварка взрывом. Затем прижимы убирают и на роликовом стенде поворачивают на шаг, равный 50...200 мм. При этом постепенно разматывают рулон и повторяют указанные выше операции. Периодически, в момент остановки вращения, производят локальную сварку взрывом первого плакирующего слоя с поверхностью сосуда, а также всех последующих слоев в шахматном порядке. Количество слоев, а также общая толщина плакирующего слоя определяются условиями работы сосуда.

При замыкании каждого плакирующего слоя, равного по длине соответствующей окружности, наносят герметизирующий шов по всей длине образующей сосуда, который предотвращает возможное проникновение агрессивной среды в зазор между плакирующими слоями в случае повреждения одного из верхних слоев. Плакирующий слой можно получить за счет как спиральной укладки витков, так и концентрических витков металлического полотна.

Благодаря многослойной конструкции плакирующего слоя и применению локальной сварки



взрывом облицовочной ленты с корпусом и отдельных слоев друг с другом обеспечиваются условия для компенсации температурных напряжений в зоне соединения разнородных материалов, возникающих обычно из-за разности коэффициентов линейного расширения металла основного и плакирующего слоев биметаллического корпуса. Вместе с тем при реализации указанного способа плакирования в производстве биметаллических сосудов необходимо разработать надежную систему контроля, которая сигнализировала бы о нарушении герметичности межслойного пространства (как на стадии изготовления изделия, так и в процессе его эксплуатации) из-за возможного разрушения герметизирующих сварных соединений или повреждения одного из плакирующих слоев.

В середине 1990-х гг. появились многочисленные публикации [21–24], посвященные различным аспектам применения и получения толстостенового биметалла способами, основанными на применении электрошлаковой наплавки (ЭШН) плакирующего слоя из коррозионностойкой стали на основу из конструкционной стали. В этих работах отмечается, что при производстве коррозионностойких биметаллических заготовок способом ЭШН обеспечивается наиболее высокая по сравнению с другими способами получения биметалла (пакетным способом или сваркой взрывом) прочность соединения плакирующего и основного слоев. Так, сопротивление срезу, определяемое в месте контакта слоев, составляет 400...450 МПа, что соизмеримо с пределом текучести основного слоя [23]. Сообщается о разработке технологии вертикальной ЭШН биметаллических заготовок прямоугольного и квадратного сечения на действующих печах ЭШП, которые, по данным работы [24], используются для этой цели практически без переделки основных элементов и узлов. При этом отмечается, что производство биметаллических заготовок массой до 15 т на специально созданных для ЭШН установках наклонного типа оказалось весьма трудо- и энергоемким из-за наличия трех расходоуемых составных электродов и подвижного кристаллизатора, для которого требуются специальные шлаки и датчики передвижения.

Кроме того, по мнению авторов [24], непараллельное взаимное расположение расходоуемых электродов и сляба основного слоя не позволяет получить одинаковую глубину проплавления в зонах под и между электродами, поскольку на распределение тепла оказывает действие капельный перенос металла в шлаке.

Следует отметить, что характерной особенностью однопроходной ЭШН как при наклонном, так и вертикальном расположении наплавляемой заготовки является использование для двух различных технологических процессов (расплавления электродного металла и проплавления основного металла) единого источника тепла, т. е. между ними существует жесткая связь. Это создает определенные сложности в обеспечении минимального и равномерного проплавления основного слоя при ЭШН, что необходимо для получения нап-

лавленного металла стабильного химического состава по всей площади.

Новые возможности для производства биметаллических заготовок для сварных корпусов высокого давления открываются благодаря применению нового ЭШН с использованием жидкого присадочного металла (ЭШН ЖПМ) [25–27]. Исследования показали, что применение процесса ЭШН ЖПМ в сравнении с каноническим процессом ЭШН позволяет наплавлять плакирующий слой с минимальной глубиной проплавления основного слоя как по сечению, так и по высоте заготовки. При необходимости наплавка может производиться и по схеме сваркопайки, т. е. практически без проплавления основного слоя [25, 26]. В результате удается обеспечить более высокое качество в таком биметалле по сравнению с биметаллом, изготавливаемым другими способами. Важным является также тот факт, что при ЭШН ЖПМ не требуется применения расходоуемых электродов, изготовление которых, особенно из высоколегированных сталей и сплавов, составляет существенную статью расходов при промышленной реализации ЭШН.

К сожалению, в последние годы МЗТМ не производит биметаллические штамповарные сосуды высокого давления из-за отсутствия заказов на них.

Вместе с тем, несмотря на объективные трудности МЗТМ все же сумел сохранить основное оборудование, кадровый и производственно-технический потенциал. Это вселяет уверенность, что при условии определенных финансовых вложений и наличия заказов производство толстостенных биметаллических сосудов высокого давления может быть не только восстановлено в прежнем объеме, но и расширено с учетом того нового, передового, что появилось в мире за последние годы в области металлургии, обработки давлением и сварки. Кроме того, производственно-техническая база МЗТМ позволяет в короткие сроки освоить производство однослойных корпусов высокого давления таких, например, как толстостенные барабаны паровых котлов в комплекте с другим оборудованием, которые в Украине до настоящего времени серийно не изготавливались.

1. *Электрошлаковая сварка* / Под ред. Б. Е. Патона. 2-е изд. доп. — М., Киев: Машгиз, 1959. — 410 с.
2. А. с. 129473 СССР. Способ получения многослойного проката / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, А. М. Макара и др. — Заявл. 09.11.59. Оpubл. 03.04.60; Бюл. № 12.
3. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Луцок-Худин В. А. Производство двухслойных листов с применением электрошлаковой сварки // Бюл. ЦНИИЧМ. — 1962. — С. 15–21.
4. *Производство толстостенных сварных сосудов из двухслойной стали с коррозионностойкой аустенитной облицовкой* / Б. И. Медовар, В. А. Луцок-Худин, В. Я. Саенко и др. // Производство, сварка и применение двухслойной стали. — М.: ГОСИНТИ, 1963. — С. 17–28.
5. *Автоматическая сварка кольцевых швов сосудов из двухслойной стали* / И. И. Кумыш, В. А. Луцок-Худин, В. Я. Саенко, Д. П. Антоненко // Свароч. пр-во. — 1964. — № 2. — С. 8–10.
6. Луцок-Худин В. А., Кумыш И. И., Саенко В. Я. Механизированная сварка толстостенных сосудов из двухслойной стали // Хим. и нефт. машиностроение. — 1967. — № 6. — С. 14–19.
7. *Новая технология изготовления толстостенных биметаллических сосудов высокого давления* / В. А. Луцок-Худин, В. Я. Саенко, И. И. Кумыш и др. — М.: НИИформтяжмаш, 1968. — С. 29–33.

8. *Электрошлаковая* технология в машиностроении / Б. И. Медовар, В. Я. Саенко, И. Д. Нагаевский, А. Д. Чепурной / Под общ. ред. Б. Е. Патона. — Киев: Техніка, 1984. — 215 с.
9. *Многослойная* сталь в сварных конструкциях / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1984. — 288 с.
10. *Реакторы* для переработки нефтепродуктов. Каталог-справочник / С. И. Амельчаков, Л. Е. Бурая, М. Ф. Матяш и др. — Киев: Реклама, 1980. — 56 с.
11. А. с. 339088 СССР, МПК. Способ изготовления крупногабаритных полушаровых днищ / В. Ф. Карпов, А. Ф. Довженко, В. Г. Кононов и др. — Заявл. 08.09.70. Опубл. 09.10.71; Бюл. № 12.
12. *О целесообразности* изготовления ответственных сварных конструкций из толстолистового металла, улучшенного методом ЭШП / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Рафинирующие переплавы. — Киев: Наук. думка, 1974. — С. 128–138.
13. *Медовар Б. И., Саенко В. Я.* Вопросы сварки низко- и среднелегированной толстолистовой электрошлаковой стали // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1981. — Вып. 14. — С. 20–24.
14. А. с. 218640 СССР, МПК. Способ изготовления биметаллических штампованных изделий / В. А. Луцок-Худин, В. Я. Саенко, Г. Г. Андрианов и др. — Заявл. 24.02.67. Опубл. 17.05.68; Бюл. № 17.
15. *Новая* технология производства сосудов высокого давления из раскатных многослойных обечасок / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Всесоюз. конф. по многослойным сварным конструкциям и трубам.: Тез. докл. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1980. — 64 с.
16. *Новый* подход к получению и разработке многослойных материалов из низко- и среднелегированных сталей / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1981. — Вып. 15. — С. 3–7.
17. *Бесшовные* квазислоистые трубы, полученные горячей раскаткой многослойных заготовок / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Там же. — 1984. — № 21. — С. 29–34.
18. *Горячая* раскатка стальных колец и обечасок / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1993. — 240 с.
19. *Внедрение* технологии раскатки кольцевых заготовок для производства оборудования АЭС / С. А. Елецкий, В. А. Решетников, В. Б. Телеш, Э. З. Сайфулин // Кузн.-штамп. пр-во. — 1987. — № 10. — С. 16–17.
20. А. с. 607707 СССР, МПК. Способ плакирования внутренней поверхности цилиндрических сосудов / И. Д. Нагаевский, В. А. Александров, В. Я. Саенко и др. — Заявл. 07.12.76. Опубл. 09.10.78; Бюл. № 18.
21. *Разработка* технологии электрошлаковой наплавки в производстве биметаллических листов / А. В. Попов, В. И. Шейко, Е. Д. Кудинов и др. // Тяж. машиностроение. — 1994. — № 1. — С. 29–30.
22. *Производство* биметаллического проката методом электрошлаковой наплавки / В. А. Тишков, И. Г. Родионова, В. И. Пузачев и др. // Металлургия. — 1995. — № 8. — С. 30–31.
23. *Производство* заготовок для коррозионно-стойкого биметалла на электрошлаковых печах методом наплавки / А. А. Шарапов, И. Г. Родионова, А. Г. Шалимов и др. // Труды Третьего конгресса сталеплавильщиков. — М., 1996. — С. 192–194.
24. *Опыт* разработки технологии производства коррозионно-стойких биметаллических заготовок с использованием электрошлакового переплава / А. А. Шарапов, И. Г. Родионова, В. И. Пузачев и др. // Сталь. — 1996. — № 12. — С. 27–29.
25. *Medovar B. I., Saenko V. Ja., Medovar L. B.* Electroslag processes used in production of clad steel // The Paton Welding J. — 1999. — Pilot issue July. — P. 71–75.
26. *Медовар Б. И., Саенко В. Я., Медовар Л. Б.* Получение заготовок коррозионно-стойкого биметалла методом электрошлаковой наплавки // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2000. — № 2. — С. 3–11.
27. *Патон Б. Е., Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко.* Новые возможности электрошлаковых технологий в машиностроении // Металлургия машиностроения. — 2003. — № 1. — С. 2–5.

The paper describes the main stages of development in our country of the technology of manufacturing thick-walled bimetal welded high pressure vessels, and considers the prospects for development of bimetal vessel manufacture at the current stage.

Поступила в редакцию 18.11.2003



ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ (по материалам патентов США)

Академик НАН Украины **В. К. ЛЕБЕДЕВ** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведена патентная информация США за последние два года, дающая представление о современных тенденциях в области разработки источников питания и систем управления процессами дуговой и контактной сварки.

Ключевые слова: дуговая сварка, контактная сварка, источники питания, системы управления, капельный перенос, смеси газов, патенты США

Патентное ведомство США имеет большой фонд, насчитывающий более 6,5 млн зарегистрированных патентов. Их авторами являются граждане не только США, но и многих других стран. Патентный фонд непрерывно пополняется благодаря Интернету и доступен широкому кругу специалистов. Ознакомившись с патентами США, можно получить сведения о направлениях развития той или иной области техники.

В настоящей работе сделан краткий обзор патентов по источникам питания и системам управления наиболее распространенными процессами дуговой и контактной сварки. Обзор охватывает лишь патенты, опубликованные за последние два года и характеризующие современное развитие интересующей нас области техники.

Иллюстрации представлены в том виде, в каком приведены в оригинальных описаниях. При этом сохранена нумерация всех позиций. И хотя она почти не используется в настоящем обзоре, тем не менее может быть полезна читателю при более подробном ознакомлении с содержанием непосредственно патентов.

Вторая половина прошлого века характеризовалась колоссальными достижениями в области полупроводниковых приборов, что способствовало развитию многих областей техники, в том числе и сварочного оборудования. Можно определенно утверждать, что наиболее значительные успехи в сварке связаны с появлением новых полупроводников. Сначала это были силовые диоды, вытеснившие электромеханические преобразователи. Позже появились тиристоры — частично управляемые полупроводниковые приборы, которые стали использоваться как силовые, а также в цепях систем управления. Можно назвать еще одно направление, отвечающее задаче повышения стабилизации сварочного процесса с помощью источников питания и систем управления. Следующий этап развития сварочной техники, связанный с транзисторами, отчасти уже пройден, однако возможности их использования в сварке далеко не исчерпаны. К этому направлению можно отнести

способ импульсно-дуговой сварки [1], разработанный еще до появления на рынке мощных управляемых приборов. Благодаря им импульсно-дуговая сварка вышла за рамки лабораторного эксперимента и стала широко распространенным производственным процессом. Параллельно проводили эксперименты по сварке с короткими замыканиями. Одной из основных целей этих экспериментов было снижение разбрызгивания жидкого металла, возникающего при переносе металла с короткими замыканиями дугового промежутка. В этом направлении известны исследования ученых ИЭС им. Е. О. Патона — И. И. Зарубы, А. Г. Потапьевского, Н. М. Воропая и многих других, а также сотрудников различных учебных и исследовательских организаций — Г. М. Каспражака, Н. Г. Дюргерова, А. Ф. Князькова, Ю. Н. Сараева и др. Позже получены положительные результаты по использованию усовершенствованного способа управления переносом металла при коротких замыканиях дугового промежутка [2]. Однако дальнейшая разработка этого способа и серийное производство нового оборудования оказались малоперспективными в связи с появлением на рынке сравнительно дешевого защитного газа — аргона. Потому исследования были прекращены, хотя за рубежом, как будет показано ниже, они продолжают и сегодня. Причина тому — известные преимущества сварки «короткой» дугой. Применение транзисторов позволило уменьшить массу и размеры источников питания, повысить их КПД и мощность, придать источникам питания

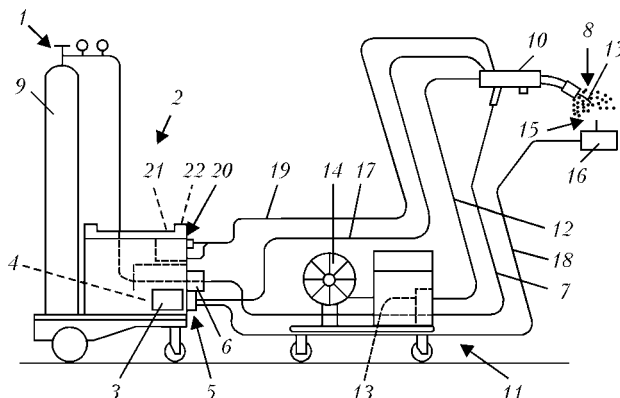


Рис. 1

свойства легкоуправляемых и малоинерционных аппаратов.

Дальнейшее совершенствование оборудования для дуговой сварки, по-видимому, в значительной мере будет связано с использованием транзисторов и микропроцессорных систем управления и прежде всего нацелено на повышение технологичности дуговой сварки.

В области контактной сварки, особенно в микросварке, будет наблюдаться такая же тенденция. Для представления о направлениях развития в интересующей нас области сварочной техники стоит ознакомиться с соответствующей патентной литературой, опубликованной в последнее время в США.

Так, в патенте 6476354 «Method for controlling a welding apparatus and corresponding control device» (фирма «Fronius Schweissmaschinen») [3] описан способ управления процессом сварки, характерный для современного сварочного оборудования (рис. 1). Управление осуществляется с помощью микропроцессорного устройства, в которое перед началом процесса сварки вводят данные о свариваемом материале, диаметре электрода, скорости его подачи, защитном газе, способе сварки и пр. Схема соединений показана на рис. 2. Кроме источника питания инверторного типа, в установку входит высокочастотный генератор 35, включенный последовательно в цепь питания дуги, и система замкнутого водяного охлаждения (на рисунке не представлена). Микропроцессор 23 получает от датчиков информацию о токе и напряжении на дуге и осуществляет управление в соответствии с введенными в память 29 данными (рис. 2). Связь микропроцессора с инвертором 31 осуществляется через оптоволоконный кабель. Схема панели аппарата представлена на рис. 3.

Близкая по структуре система «Welding control system» запатентована фирмой «CRC for welding structures» [4]. Блок-схема источника питания с системой управления имеет обычную структуру (рис. 4). Управление выполняет микропроцессор, работающий при частоте выше 200 МГц. Он осуществляет обратную связь по напряжению (если требуется, то и по току), а также управляет скоростью подачи электродной проволоки. Можно предполагать, что система управления главным образом рассчитана на сварку с короткими замыканиями дугового промежутка при переносе капель жидкого металла. Благодаря системе управления в процессе сварки имеет место незначительное разбрызгивание жидкого металла (рис. 5). Большая скорость реакции системы позволяет быстро изменять ток, например уменьшать его до 10...20 А, чтобы замыкание дугового промежутка происходило без отскока капли от сварочной ванны под действием электродинамических сил. Тем самым предупреждается рост капли и ее произвольное движение, приводящее к разбрызгиванию. После этого ток незначительно возрастает, что как бы «помогает» переходу капли в ванну, не вызывая при этом заметного разбрызгивания; осуществляется «мягкий» переход капли в ванну (что характерно для указанного изобретения). Затем подается импульс, завершающий переход капли в

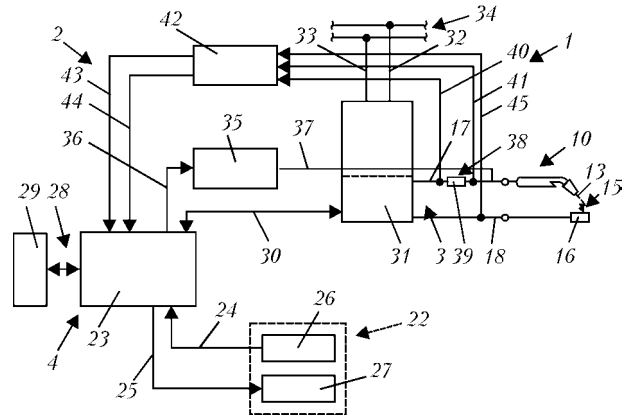


Рис. 2

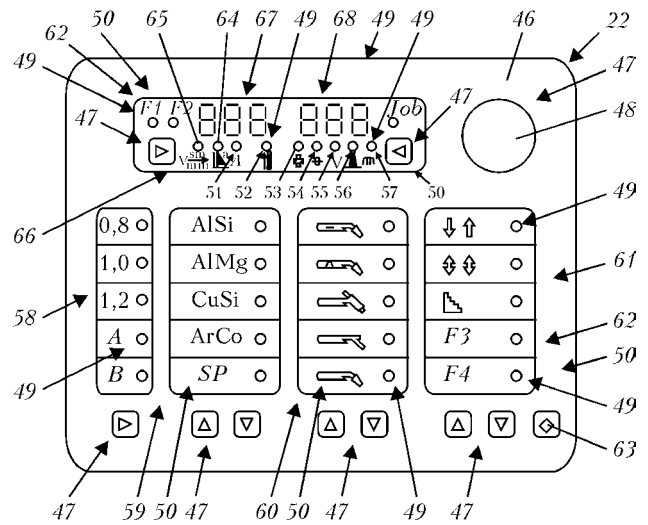


Рис. 3

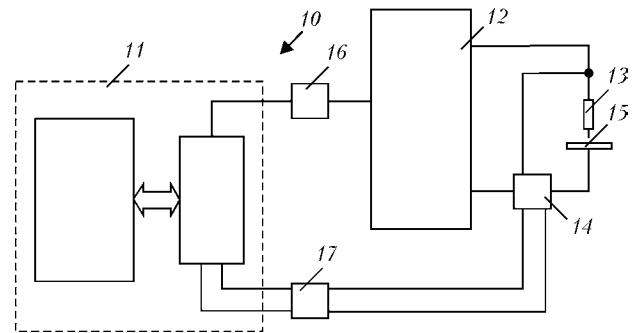


Рис. 4

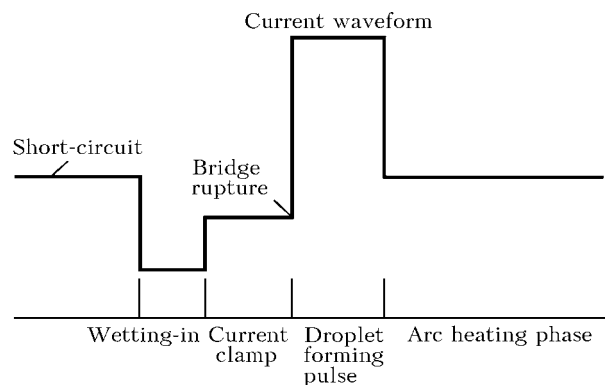


Рис. 5

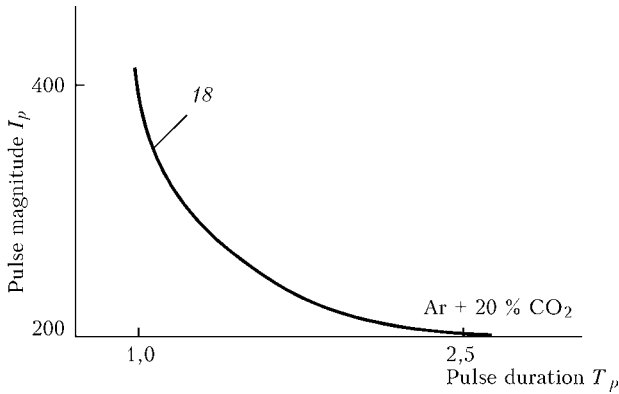


Рис. 6

ванну и цикл многократно повторяется. Значение импульса тока устанавливается в зависимости от диаметра электрода и содержания углекислого газа в смеси газов. Диапазон значений импульсов тока составляет 200... 400 А при длительности процесса от 0,5 до 3,0 мс, диаметр электродной проволоки — от 1,2 до 2,5 мм (рис. 6). Время короткого замыкания составляет 2,0... 4,8 мс. Возможна регулировка по этапам режима тока и времени сварки в отдельности, если значения этих параметров превышают указанные выше пределы.

Система может работать в трех режимах. В нормальном режиме задаются максимальные и минимальные значения тока, которые выдерживаются при сварке. В режиме коррекции, если значение тока выходит за установленные пределы, изме-

няется время сварки, а ограничения по току снимаются. При работе в третьем режиме, названном адаптивным, система самостоятельно подбирает минимальные значения тока и временные интервалы. Однако алгоритм поиска исходя из описания, данного в патенте, не вполне ясен.

Фирма «Lincoln Global, Inc.» получила патент 6498321 под названием «System and method for controlling an electric arc welding» [5]. Эта система управления по структуре силовой части представляет собой сварочный инвертор (рис. 7). Она имеет несколько обратных связей по мощности. Основной системы управления является компьютер С. Устройство *Arc detected* имеет два выхода. Выход 72 идентифицирует короткое замыкание, а 102а — горение дуги. Устройство 50 задает форму кривой мощности. Последняя вычисляется перемножением тока на напряжение (устройство 100); результат вычисления в цифровой форме сопоставляется с текущим заданным значением мощности. В устройстве предусмотрен индикатор коротких замыканий 102. Кривые изменения во времени тока, напряжения и мощности показаны на рис. 8. Двигатель подачи электродной проволоки также является исполнительным устройством, обеспечивающим обратную связь по мощности сварочной дуги (рис. 9). В первом режиме устанавливаются значения наибольшего тока и тока, при котором происходит перенос металла в сварочную ванну. Второй режим используется в случае, если время коротких замыканий превышает установленный

предел. При этом определяются значения наибольшего тока. При использовании третьего режима возможно снижение минимального значения тока до допустимого предела в случае увеличения энергии импульса в установленном ранее диапазоне. При сварке в углекислом газе время горения дуги составляет до 20 мс, ток перед короткими замыканиями — от 10 до 20 А.

Французские изобретатели получили патент 6518545 «Welding arc penetrating power real time detection system» [6], в котором предлагается система для управления сваркой труб. Питание дуги осуществляется от инвертора 14. Программа сварки загружена в РС36 и хранится в EEPROM 35 для использования с микропроцессором 70 (рис. 10). При нормальном проплавлении напряжение и ток изменяются так, как показано на рис. 11. С целью снижения разбрызгивания перед короткими замыканиями дугового проме-

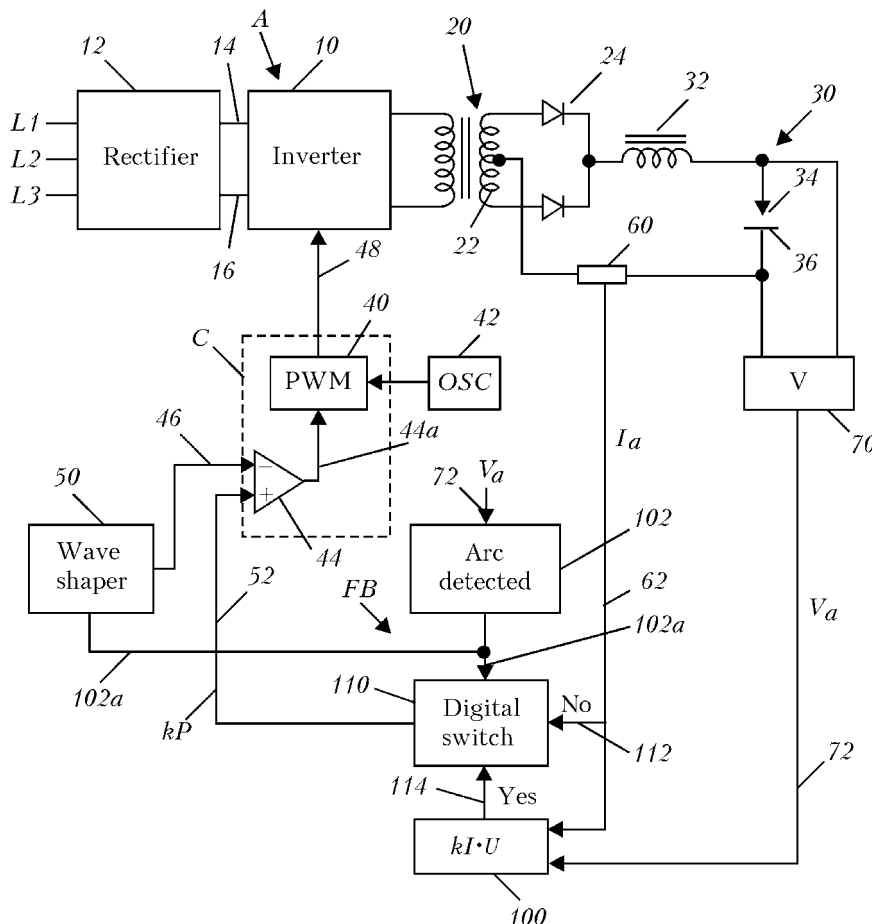


Рис. 7

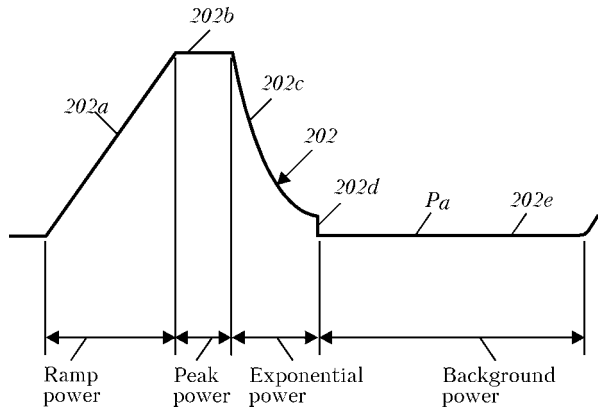
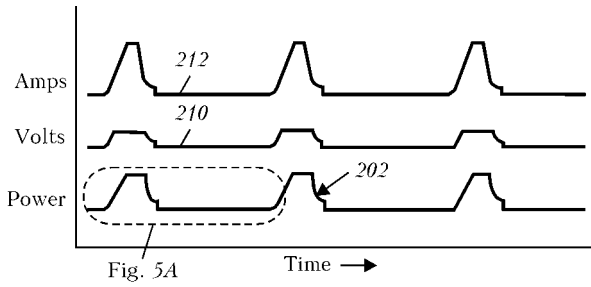


Рис. 8

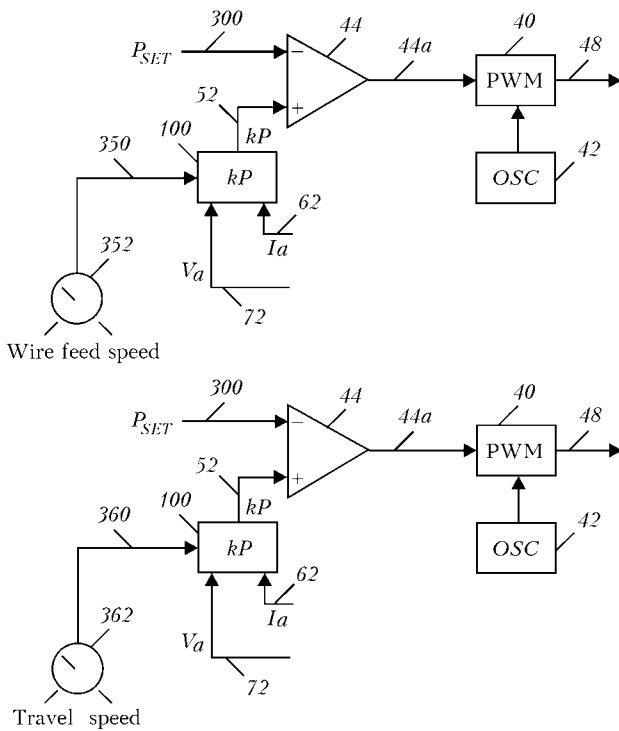


Рис. 9

жутка значение тока снижается до минимального. Сразу же после перехода капли с электрода в сварочную ванну значение тока возрастает до установленного ранее максимального. Затем образуется новая капля, и цикл повторяется. Для управления процессом сварки используется импеданс Z цепи, содержащей дугу, и время цикла T . Позиции А, С и В (рис. 12) характерны для различных ситуаций, возникающих при сварке с короткими замыканиями дугового промежутка. При сквозном проплавлении стенок трубы дуга удли-

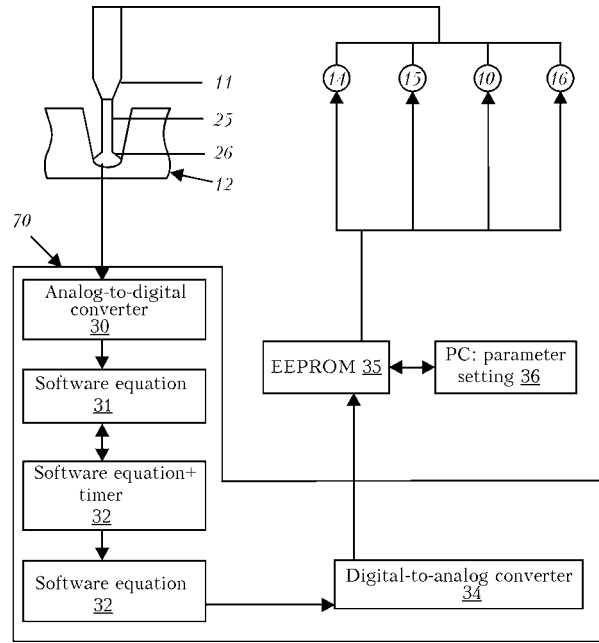


Рис. 10

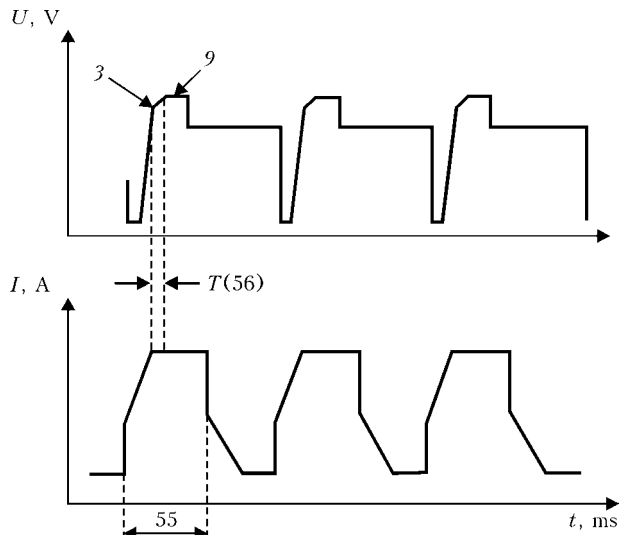


Рис. 11

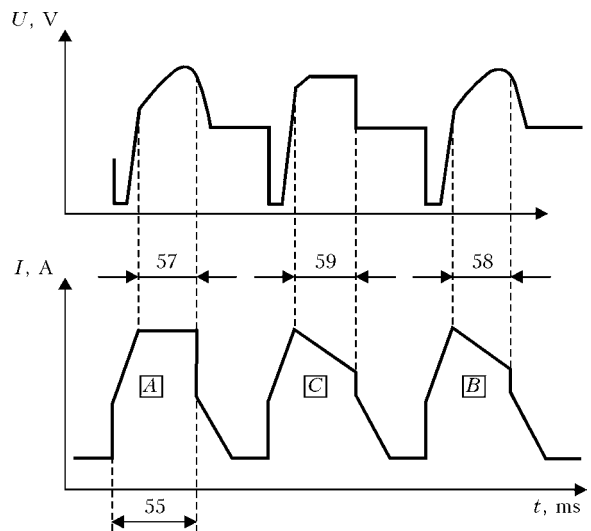


Рис. 12

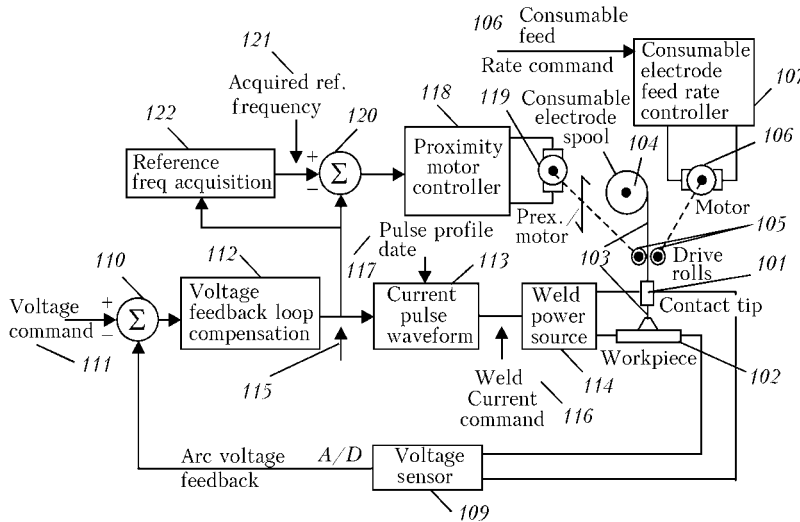


Рис. 13

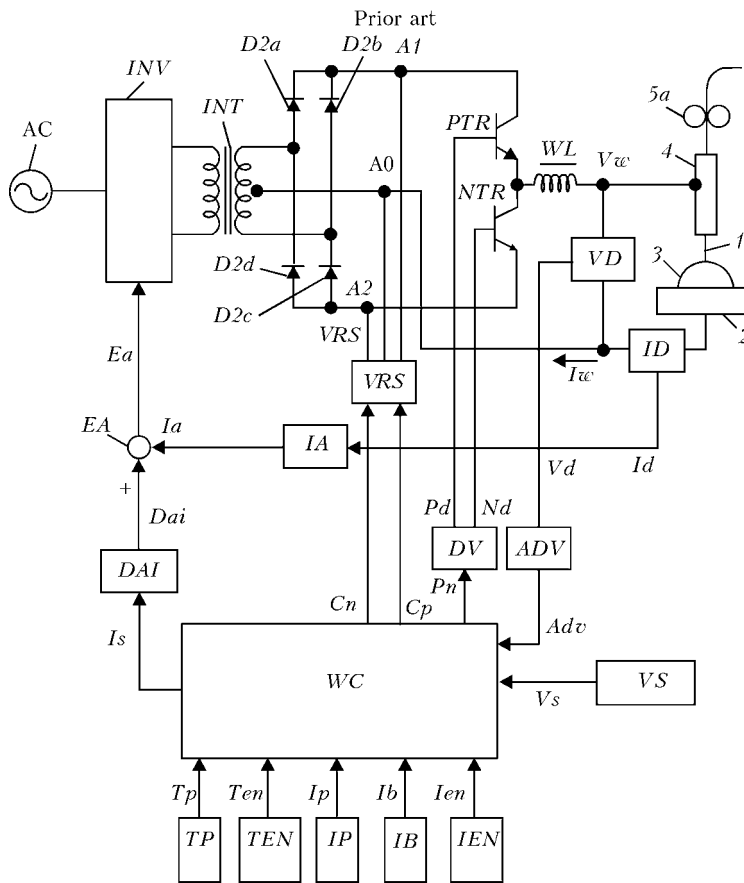


Рис. 14

няется, что отражается на токе и напряжении. В патенте сформулированы условия, при которых процесс протекает со сквозным проплавлением и без него в зависимости от характера изменений импеданса. Эти условия положены в основу управления процессом сварки. С помощью компьютера осуществляется также управление подающим механизмом и устройством поперечных колебаний электрода.

Ранее была разработана система автоматического управления, в которой излучение с обратной стороны шва использовалось в цепи обратной связи свароч-

ного тока. Дополнительную аппаратуру с датчиком температуры нужно было вводить внутрь трубы, что не всегда возможно. К тому же система и традиционный источник питания не отличались требуемым в данном случае быстродействием. Этого недостатка лишена система, описанная в патенте.

В патенте 6335514 «Control method and apparatus for an arc welding system» [7] дано описание системы для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом (рис. 13), которая имеет замкнутую цепь обратной связи, стабилизирующую напряжение. В этой цепи есть звено, преобразующее отклонение напряжения в сигнал, который управляет источником питания с учетом заданной формы и частоты импульса тока. В системе имеется еще одна обратная связь, действующая более медленно. Исполнительным механизмом является двигатель 119, который осуществляет перемещение сварочной головки по вертикали и обеспечивает стабилизацию частоты. Помимо источника питания, система управляет еще двумя двигателями: один из них подает электродную проволоку, а второй является исполнительным устройством, обеспечивающим положение электрода относительно линии соединения свариваемых деталей.

Патент 6531684 «Method and apparatus for welding and control» касается дуговой сварки и в основном отличается от традиционных патентов в данной области тем, что в нем содержатся сведения об обеспечении устойчивости системы посредством изменения параметров обратной связи. Эта операция осуществляется системой без участия оператора.

Оригинальное техническое решение в части управления предлагается в патенте 6376802 «Method of controlling the AC pulsed arc welding and welding power supply apparatus therefor» [8]. Схема источника питания (рис. 14) включает блоки, состоящие из четырех высокочастотных силовых вентилялей и двух силовых транзисторов, а также реактора. Управление производится с помощью компьютера. По сути, предложен один из возможных вариантов последовательного соединения двух инверторов, работающих на разных частотах. Первый из них рассчитан на высокую (ультразвуковую) частоту, а второй — на значительно более низкую. Перенос капель металла с электрода в сварочную ванну происходит при импульсе тока прямой полярности.

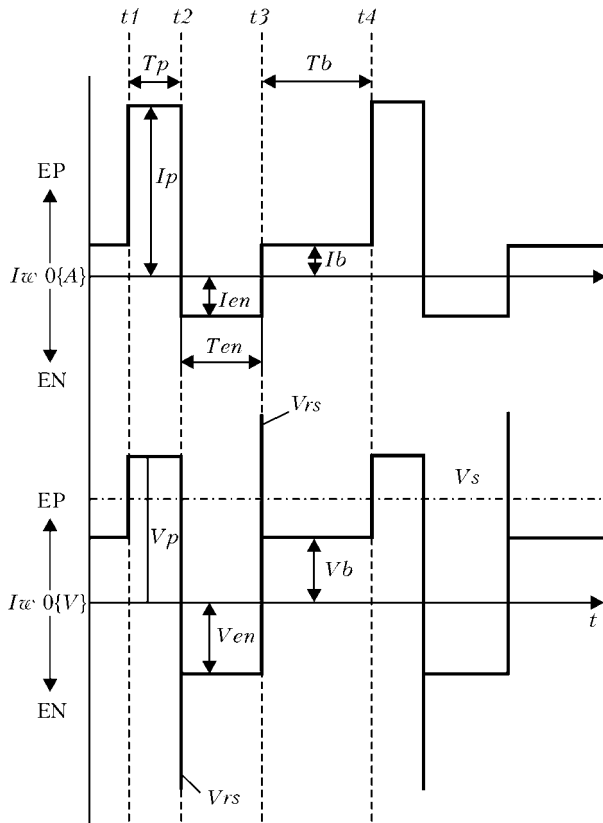


Рис. 15

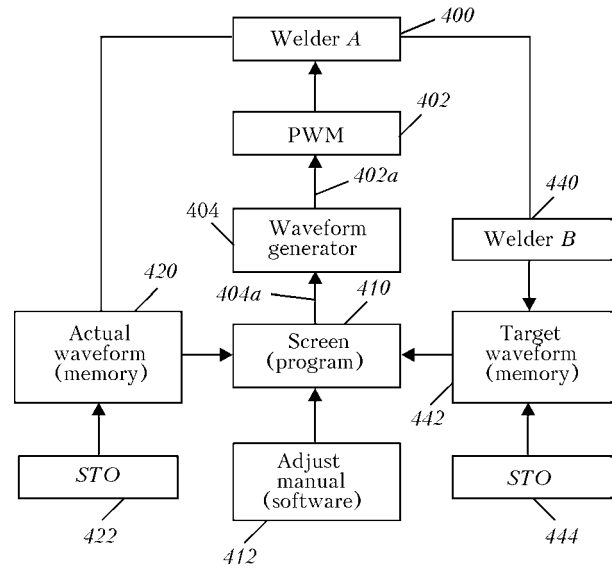


Рис. 17

Частота тока выбирается так, чтобы каждому периоду тока соответствовала одна капля. В компьютер предварительно вводят данные о значении тока и продолжительности сварки на токе прямой и обратной полярности, скорости подачи электродной проволоки. Компьютер корректирует режим таким образом, чтобы процесс протекал устойчиво. Для примера на рис. 15 показана система без возмущений, а на рис. 16 — при удлинении дуги. При настройке сварщик использует экран, на который выводится информация об исполнении задания.

Система, описанная в патенте 2003/0071026 «Electric arc welder and controller to duplicate a known waveform therefor» предназначена для настройки источника питания [9] (рис. 17). С ее помощью можно производить настройку вручную либо перенести предварительно установленный на каком-либо другом источнике питания режим на другой компьютер.

В патенте 2003/0006222 «Electric arc welding system» [10] описана система, состоящая из нескольких постов источников переменного тока (рис. 18). Данные о режимах и выполнении заданий передаются в обе стороны от центрального поста управления через Интернет.

В патенте 2002/0070205 «Power supply for electric arc welding» представлено несколько вариантов исполнения источника питания для сварки на переменном токе (рис. 19) [11]. Источник включается в сеть переменного тока через трансформатор промышленной частоты и выпрямитель. Система управления вырабатывает пакеты импульсов тока разной полярности, управляющих двумя группами транзисторов, поочередно питающих сварочную дугу (рис. 20). Количество импульсов определяет ток. При различном количестве импульсов ток будет содержать постоянную составляющую, что необходимо, например, при сварке алюминия и сплавов на его основе. Увеличивать мощность источника питания переменного тока можно путем параллельного включения источников меньшей мощности, объединяя их в систему управления.

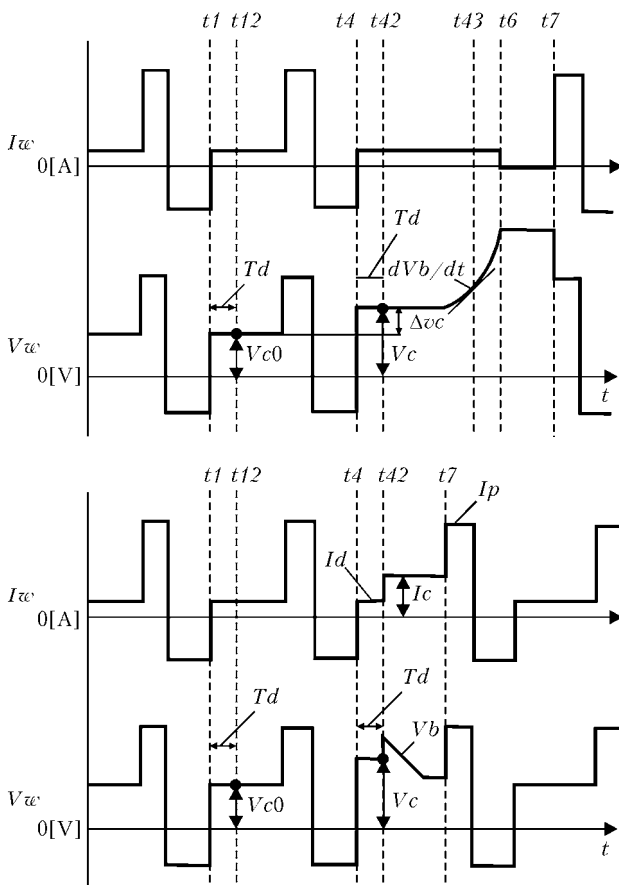


Рис. 16

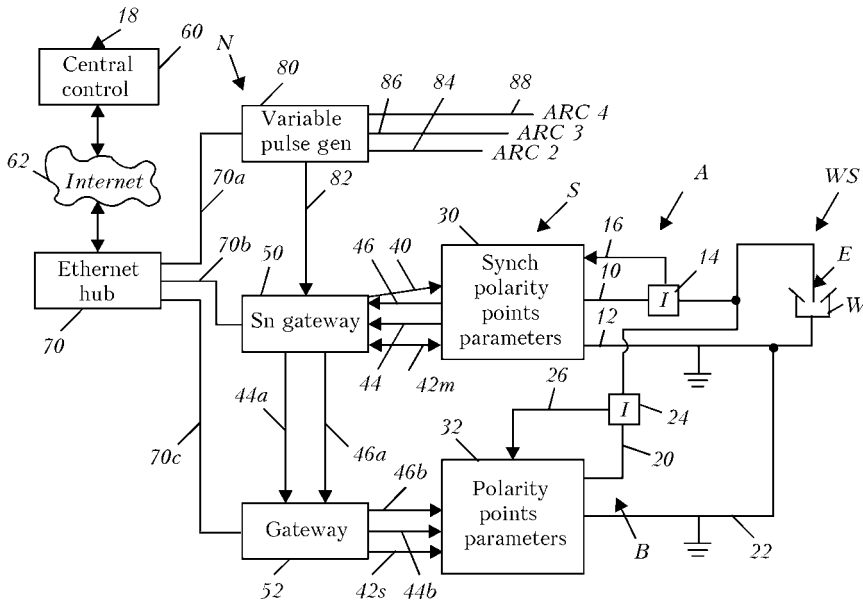


Рис. 18

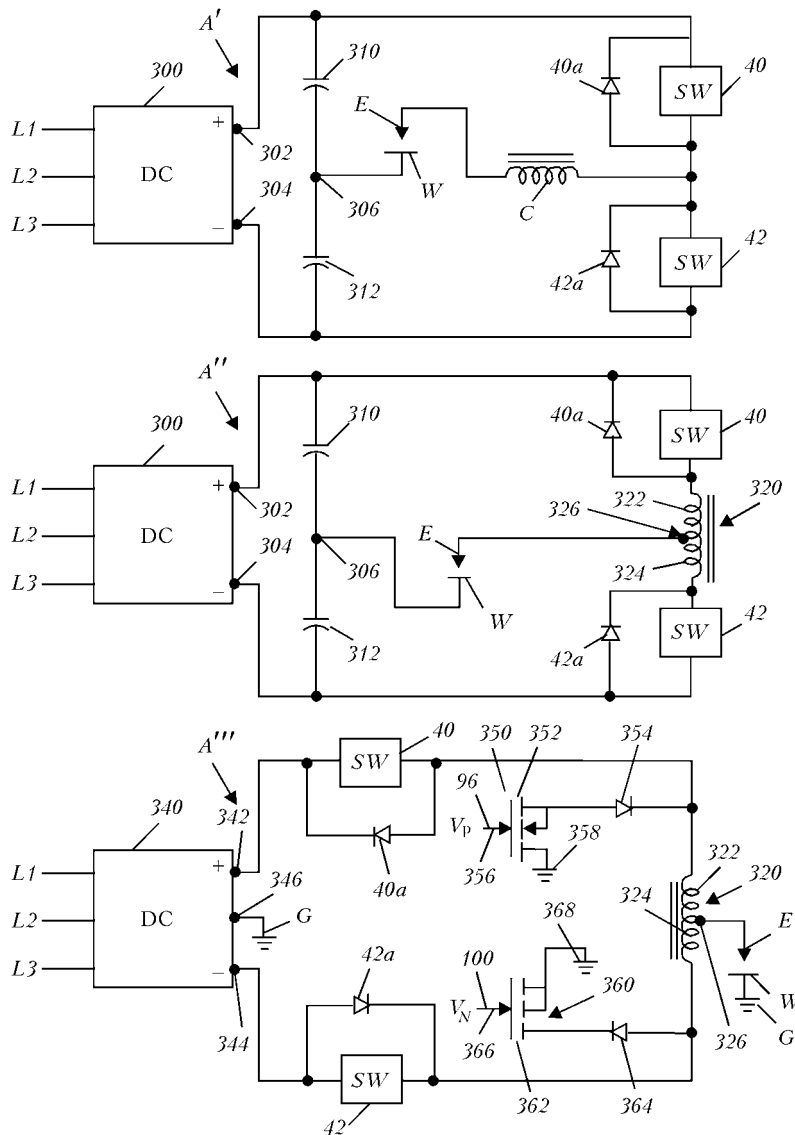


Рис. 19

По-видимому, изобретение японского специалиста, описание которого содержится в патенте 2003/0052107 «Arc welding quality evaluation apparatus» [12], является одним из первых в области диагностики качества точечных соединений непосредственно в процессе сварки. Система построена на сборе и обработке данных о каждом соединении отдельно. Надо полагать, что изобретение получит дальнейшее развитие.

Источники питания и системы управления процессами контактной сварки предложены лишь в нескольких патентах. Один из них обращает особое внимание в связи с отсутствием в данной системе питания традиционного сварочного трансформатора. Автором патента 2001/0047982 «Resistance welding power supply apparatus» [13] является японский изобретатель. Содержание патента раскрывают рис. 21, 22. Создание такой системы питания стало возможным благодаря появлению силовых транзисторов, рассчитанных на большие токи, и электролитических конденсаторов, работающих в качестве импульсных при частоте около 1 кГц. Для примера автор патента приводит некоторые данные, указанные в таблице.

Система легко управляется в течение коротких интервалов времени и может быть использована в оборудовании для микросварки.

В заключение следует отметить следующее:

1. Содержание большинства патентов в той или иной мере связано с управлением переноса капель жидкого металла, сопровождаемого как короткими замыканиями дугового промежутка, так и без них. Это направление в области техники дуговой сварки продолжает эффективно развиваться. Следует обратить внимание на устройства переноса металла с короткими замыканиями дугового промежутка.

2. Установившаяся техника управления сваркой «короткой» дугой сводится к снижению тока перед короткими замыканиями до минимального предела, при котором обеспечивается переход капли металла в сварочную ванну

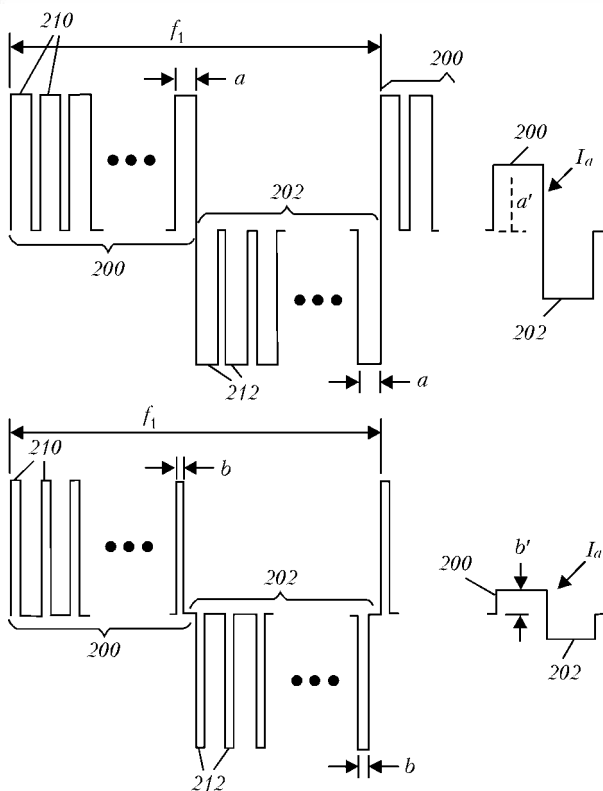


Рис. 20

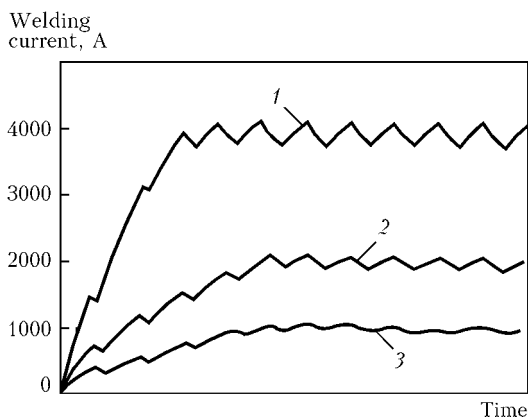


Рис. 21

Номер кривой на рис. 21	Сварочный ток, А	Напряжение на конденсаторе, В
1	4000	30
2	2000	28
3	1000	24

6. В основе новых источников питания лежат преобразователи частоты и фаз, что позволило получить не только определенные энергетические преимущества, но и обеспечить быстрдействие систем управления.

7. Новые источники переменного тока создаются в виде каскадов последовательно соединенных инверторов. Первый инвертор соединен с трехфазной сетью и преобразует выпрямленное напряжение сети в однофазное высокой частоты, которое затем снижается высокочастотным трансформатором до требуемого значения. Второй инвертор преобразует однофазное напряжение высокой частоты в низкочастотное, значение которого выбирается автоматически и равно частоте переноса капель с электрода в сварочную ванну.

8. Контактная сварка также развивается благодаря успехам полупроводниковой техники, но в

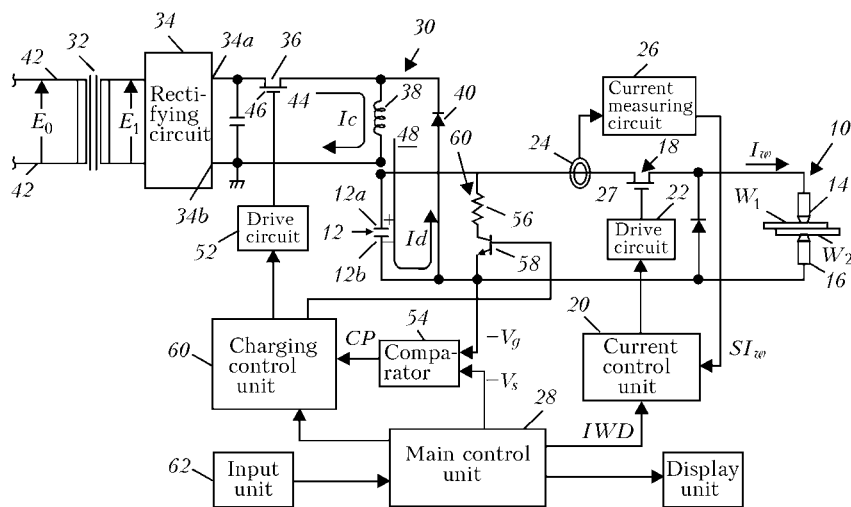


Рис. 22

без отскока и неуправляемого роста объема капли, приводящего к разбрызгиванию. В этом отношении техника управления упростилась по сравнению с известной ранее.

3. Надо полагать, что перенос металла с короткими замыканиями дугового промежутка эффективен и при сварке в смесях на основе аргона.

4. Заслуживает внимания стабилизация проплавления при сварке односторонних швов, основанная на автоматическом анализе изменений режима сварки при переходе к сквозному проплавлению, и наоборот.

5. Новые источники питания для дуговой сварки создаются преимущественно на основе силовых транзисторов, управляемых компьютерной техникой.

рассматриваемый период времени было зарегистрировано всего лишь один-два патента в этой области. Знакомясь с одним из упомянутых патентов, можно предположить, что наибольшие изменения коснутся контактной микросварки.

9. Не исключено, что автоматический контроль процесса сварки окажется эффективным средством предварительного выявления дефектных мест в сварных швах.

1. Патон Б. Е., Потаповский А. Г., Подола Н. В. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с программным управлением процесса // Автомат. сварка. — 1964. — № 1. — С. 1-6.
2. Патон Б. Е., Лебедев А. В. Управление плавлением и переносом электродного металла при сварке в CO₂ // Там же. — 1988. — № 11. — С. 1-5.



3. Pat. 6476354 USA B 23 K 9/10. Method for controlling a welding apparatus and corresponding control device / V. Jank, M. Rührhösse, R. Fnouenschuh, H. Fniede. — Publ. 05.11.2002.
4. Pat. 6512200 USA B 23 K 9/10. Welding control system / J. Norrish et al. — Publ. 28.01.2003.
5. Pat. 6498321 USA B 23 K 9/10. System and method for controlling an electric arc welding / B. E. Fulmer, S. R. Peters. — Publ. 05.11.2002.
6. Pat. 6518545 USA B 23 K 9/10. Welding arc penetrating power realtime detection system / C. Richard et al. — Publ. 11.02.2003.
7. Pat. 63355114 USA B 23 K 9/10. Control method and apparatus for an arc welding system / R. Rothermel. — Publ. 01.01.2002.
8. Pat. 6376802 USA B 23 K 9/10. Method of controlling the AC pulsed arc welding and welding power supply apparatus therefor / H. Tong et al. — Publ. 23.04.2002.
9. Pat. 2003/0071026 USA B 23 K 9/10. Electric arc welder and controller to duplicate a known waveform therefor / C. Hsu et al. — Publ. 17.04.2003.
10. Pat. 2003/0006222 USA B 23 K 9/10. Electric arc welding system / W. S. Houston, R. K. Myers, E. K. Stava. — Publ. 09.01.2003.
11. Pat. 2002/0070205 USA B 23 K 9/10. Power supply for electric arc welding / E. Stava. — Publ. 13.06.2002.
12. Pat. 2003/0052107 USA B 23 K 9/10. Arc welding quality evaluation apparatus / Y. Suzuki. — Publ. 20.03.2003.
13. Pat. 2001/0047982 USA B 23 K 9/10. Resistance welding power supply apparatus / M. Watanabe. — Publ. 06.12.2001.

US patent information covering developments in the field of power units and control systems for the arc and resistance welding processes made during the last two years is presented. The patents give an idea of the current trends in the above field.

Поступила в редакцию 27.03.2003

НОВОСТИ НКМЗ

После многолетнего перерыва, связанного с распадом Союза, возобновилось сотрудничество двух давних деловых партнеров — Новокраматорского машиностроительного завода (г. Краматорск, Донецкой обл.) и СП «Эрдэнэт» (Монголия). В соответствии с заключенным ранее контрактом новокраматорцы изготовили и подготовили к отгрузке монгольским горнодобытчикам оборудование рудоразмольной шаровой мельницы МШЦ 550056500А качественно нового технического уровня.

Повышенные производительность и экономичность являются безусловными плюсами новой машины. За счет применения современных технических решений эта мельница способна перерабатывать в год на 200 тыс. т руды больше, чем ранее выпущенные, сберегая при этом миллион киловатт-часов электроэнергии.

Еще одной особенностью новой мельницы является изначально заложенная конструкторами возможность установки ее на старые фундаменты, что при монтаже позволит значительно снизить капитальные затраты.

Настоящий контракт был подписан в период двусторонних визитов президентов Монголии Н. Багабанди в Киев и Л. Кучмы в Улан-Батор. Результатом этих визитов стали закрепление наметившихся за последнее время качественных изменений в двусторонних отношениях на политическом уровне, создание условий для активного налаживания торгово-экономических связей.

Заинтересованность монгольской стороны в расширении деловых контактов подтвердил впоследствии на встрече с представителем НКМЗ, заместителем директора внешнеэкономической фирмы С. Романенко Почетный консул Монголии в Украине господин П. Батсайхан и генеральный директор СП «Эрдэнэт» господин Наранхуу. Речь, в частности, шла о реконструкции поставленного десятилетия назад новокраматорцами оборудования для горнорудной промышленности, в том числе рудоразмольных мельниц.

В производстве этой техники НКМЗ имеет большой опыт. За время существования завода их выпущено более 2500 шт. Этими мельницами оснащены все горно-обогатительные комбинаты черной и цветной металлургии постсоюза, а также других стран, в числе которых Монголия.



КОНТАКТНАЯ СВАРКА ГИБКИХ СЕРЕБРЯНО-МЕДНЫХ ТОКОПОДВОДЯЩИХ ШИН

В. С. КУЧУК-ЯЦЕНКО, канд. техн. наук, **А. Г. САХАЦКИЙ**, **А. А. НАКОНЕЧНЫЙ**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана технология контактной сварки на воздухе и в защитном газе гибких медных шин с приваренными на контактных площадках серебряными пластинами применительно к изготовлению гибких связей для высоковольтных вакуумных переключателей. Установлено, что при определенном термомеханическом цикле возможно получение качественного сварного соединения пакета медно-серебряной фольги. Изучен механизм деформации пакета и формирования сварного соединения. Изготовлены экспериментальная установка и блок управления процессом сварки.

Ключевые слова: контактная сварка, автовакуумная сварка, пакет фольги, серебро, медь, высоковольтный вакуумный переключатель

Разработка технологии контактной сварки биметаллической гибкой токоподводящей шины вызвана необходимостью применения в промышленности технологичного, обеспечивающего высокое качество процесса производства медных и серебряно-медных гибких связей, в частности для высоковольтных вакуумных переключателей. Основными требованиями, предъявляемыми к гибким шинам, являются обеспечение надежного контакта, стабильно низкое переходное сопротивление в процессе работы и высокая усталостная прочность при циклической знакопеременной нагрузке [1].

В настоящее время применяют различные способы присоединения концов медных гибких шин: механический прижим пакета к токоподводу; низкотемпературная пайка оловянно-свинцовыми припоями и высокотемпературная пайка припоями систем серебро-медь и медь-фосфор, приваривание к пакету медных накладок способом электродуговой или газовой сварки, контактную автовакуумную сварку, сварку взрывом, диффузионную сварку в вакууме [2].

Механический прижим осуществляют, как правило, болтовыми соединениями, которые в процессе работы ослабляются, особенно на установках, испытывающих вибрационные нагрузки, что приводит к нарушению контакта. Пайку концов гибкой шины обычно выполняют путем погружения в сварочную ванну расплавленного припоя или индукционного нагрева пакета с промежуточными вставками фольги припоя. Соединенные таким образом пакеты вследствие растекания припоя на границе спаиваются, теряют гибкость, что в процессе эксплуатации приводит к отрыву фольги от контактной площадки. При пайке не удается обеспечить стабильно низкое переходное сопротивление и геометрию монолитной части. Кроме того, внутри пакета скапливаются остатки от флюсования, что приводит к окислению и коррозии гибких связей, недопус-

тимых при эксплуатации гибкой шины в вакууме [3, 4].

При приварке к пакету медных накладок дуговым или газовым способом происходит прожог фольги и не удается обеспечить равномерное соединение по всему сечению пакета.

Сварка взрывом сопряжена с повышенной трудоемкостью и себестоимостью, возникают трудности при сварке пакета из тонкой фольги из-за выгорания верхних слоев.

Высокое качество соединения и стабильность эксплуатационных показателей удается достигнуть благодаря применению диффузионной сварки в вакууме [5]. При этом способе сварки возможен режим, обеспечивающий свариваемость серебряно-медного пакета, при котором температура сварки составляет 750 °С, усилие сжатия — 3 МПа, а минимальное время сварки — примерно 15 мин [5]. Однако длительный отжиг при высокой температуре приводит к росту зерна в переходной зоне гибкая часть-монолит, что снижает усталостную прочность гибкой шины [6]. Кроме того, сварка в вакууме связана с высокой стоимостью оборудования и большими эксплуатационными затратами, а также с низкой производительностью процесса.

Наиболее технологичным является способ контактной сварки многослойных пакетов медной фольги благодаря эффекту автовакуумирования и совместной пластической деформации [7]. Процесс предполагает сварку гибких шин различной номенклатуры, отличается простотой и доступностью оборудования, вероятностью высокой автоматизации процесса. Главными недостатками контактной сварки являются перегрев слоев, примыкающих к монолитной части, и снижение показателей усталостной прочности.

Основной проблемой при контактной сварке пакета серебряной и медной фольги является контактное плавление меди и серебра с образованием эвтектики 72 % Ag и 28 % Cu при 780 °С. Однако, как установлено экспериментально, сварка медной фольги возможна при температуре, превышающей 830 °С. Следовательно, при контактной сварке медного пакета на существующих режимах происходит

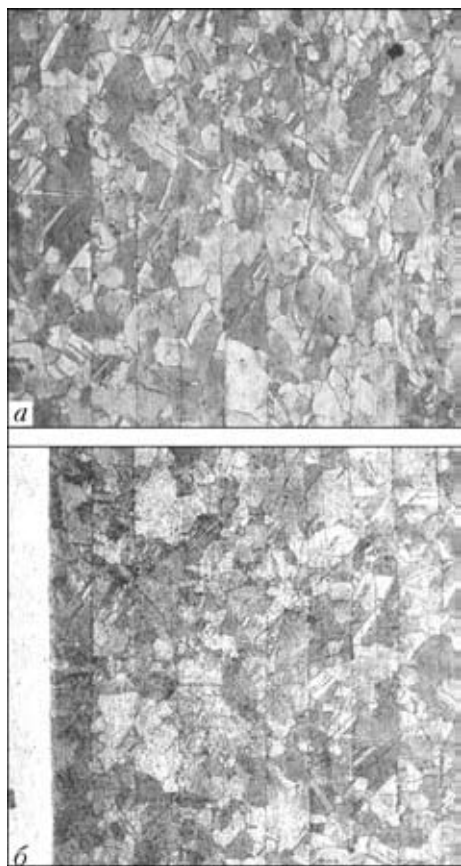


Рис. 1. Микроструктура зоны монолита медь-медь (а) и медь-серебро (б), $\times 250$

расплавление серебряных пластин и выход на поверхность пакета жидкой фазы.

Целью настоящей работы являлось изучение особенностей контактной сварки пакета серебряной и медной фольги, исследование процессов взаимодействия серебро-медь и медь-медь при различных режимах сварки.

Отработку режимов и исследование особенностей формирования сварного соединения выполняли на образцах размером $90 \times 40 \times 10$ мм, представляющих собой пакет медной фольги марки М1 толщиной 50 мкм с привариваемыми в местах замоничивания серебряными накладками $20,0 \times 40,0 \times 0,3$ мм. Следовательно, площадь замониченных участков составляет 1600 мм^2 . Такой образец является заготовкой гибкого шинпровода, используемого в высоковольтных вакуумных переключателях.

Для проведения экспериментов модернизировали установку для контактной сварки К602 с учетом следующих технологических особенностей: во избежание шунтирования тока сваривали оба конца гибкой связи одновременно, для одинакового тепловыделения в каждом замоничиваемом участке обеспечивали равномерное приложение давления на каждую пару электродов и равномерное распределение плотности тока как между парами электродов, так и по площадке сваривания. Опытные сварки проводили на воздухе и в защитных газах.

При сжатии на воздухе в микрообъемах, формируемых стыкуемыми поверхностями, остается

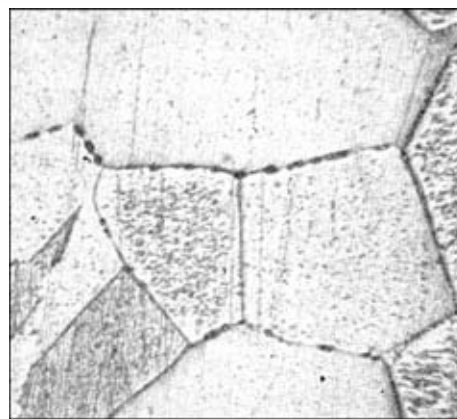


Рис. 2. Микроструктура микропор на границе зерен в меди после сварки, $\times 400$

воздух, который не удаляется из стыка даже в вакууме и влияет на процесс сварки контактирующих поверхностей в твердой фазе. В ходе нагрева в этих микрообъемах происходят процессы самоочистки поверхности от оксидных плен и образование вакуума [7]. При нагреве и пластической деформации давление газовой среды должно достигать значений, соизмеримых с пределом текучести меди при температуре сварки.

Поверхность меди представляет собой зерна, покрытые слоем оксидов меди Cu_2O и CuO с адсорбированными поверхностью газами и влагой [8]. При нагреве контактирующих поверхностей происходит самогерметизация замкнутых микрообъемов слоем оксидов. Кислород в них полностью выгорает с образованием оксида меди Cu_2O , который, образуя с медью эвтектику по межзеренным границам, проникает внутрь металла [9]. Азот, не растворяющийся в меди, удаляется из микрополостей в процессе высокотемпературной пластической деформации.

Установлено, что пластическая деформация в меди при высоких температурах проходит по механизму диффузионной ползучести. При этом по границам зерен происходит интенсивное образование микропор, захватывающих атомы азота. Микропоры располагаются вдоль поперечных границ хаотически. Методами оптической металлографии не удается установить зоны образования микропор. Существует определенная зависимость образования микропор от взаимной ориентировки зерен: они никогда не возникают на двойниковых границах [10].

Как следует из работы [10], для меди характерна неустановившаяся стадия диффузионной ползучести, при которой скорость деформации на порядок выше, чем в случае установившейся стадии диффузионной ползучести. В исследованиях, выполненных авторами работы, определено, что неустановившаяся стадия ползучести при предплавленных температурах обусловлена неравновесным состоянием образцов. Отжиг образцов перед испытаниями приводил к исчезновению неустановившейся стадии ползучести.

Следовательно, необходимым условием получения качественного сварного соединения пакета медной фольги является активация диффузионной

ползучести меди, в частности ее первичной неустановившейся стадии, при которой происходит активный массоперенос в околосшовной зоне. Энергия, необходимая для активации процесса, на порядок меньше для материала, деформированного выше критической степени деформации [11, 12]. Это согласуется с проведенными экспериментами, при которых для холоднокатаной фольги активация процесса ползучести происходит при 800...810 °С, тогда как для фольги после отжига при 900 °С.

Разработан такой термомодеформационный цикл контактной сварки серебряно-медного пакета фольги, при котором обеспечивается качественное сваривание как медного пакета, так и серебряных накладок. Основную сложность представляла разработка циклограммы сварочного тока, обеспечивающего нагрев в зоне сварки выше точки эвтектического плавления, но не дольше временной задержки образования эвтектики медь-серебро.

Проведенная серия экспериментов показала высокую стабильность результатов, отсутствие непроваров и подплавления серебряных накладок. По сравнению с ранее известными режимами сварки медных пакетов, время сварки сократилось от 2 мин до 14 с, что позволило избежать перегрева слоев, примыкающих к монолитной части. Таким образом, можно рекомендовать разработанный термомодеформационный цикл при сварке не только серебряно-медных гибких шин, но и чисто медных токопроводящих.

Для определения качества сварного соединения медные гибкие связи подвергали металлографическому исследованию и механическим испытаниям.

С помощью оптического микроскопа МИМ-7 на микрошлифах исследовали формирование сварных соединений серебро-медь и медь-медь. Для пары медь-серебро на границе соединения образуется слой раствора меди в серебре толщиной около 20 мкм. Толщина диффузионной зоны проникновения серебра составляет в среднем 150 мкм, что свидетельствует об активном массопереносе при сварке. Промер микротвердости в зоне сварки показал, что образования хрупких фаз не происходит. Результаты исследований соединения на границе медных листов показали наличие общих зерен, что свидетельствует о произошедшей в процессе сварки рекристаллизации. По границам зерен обнаружены микропоры, что свидетельствует о произошедшей пластической деформации по механизму диффузионной ползучести.

Прочностные свойства сварных соединений определяли натурными испытаниями на макете высоковольтного переключателя. Образцы выдержали 250 тыс. циклов без изменения геометрии, ме-

ханических и электрических свойств. По нормам эксплуатации гибкая связь высоковольтного переключателя должна выдерживать 100 тыс. циклов. Гибкие связи подвергали еще одному методу контроля — замерам сопротивления электрического тока, которые показали, что сопротивление сварных гибких связей составляет примерно 15 мкОм, что почти в 2,0...2,5 раза меньше сопротивления паяных гибких связей.

Выводы

1. Установлено, что для качественной автовакуумной контактной сварки медного пакета необходимо инициировать процесс диффузионной ползучести, энергия активации которого зависит от степени нагартованности медной фольги.

2. Использование холоднокатаной медной фольги в сочетании с дозированным энерговыделением позволяет значительно повысить качество соединений такого типа, особенно показатели усталостной прочности, получить соединения с высокой электропроводностью. Одновременно решена проблема нанесения серебряных покрытий на медные пакеты.

1. Чмырев И. А., Яворский Ю. Д. Контактная сварка пакетов медной фольги // Автомат. сварка. — 1968. — № 6. — С. 55–57.
2. Мастеров В. А., Саксонов Ю. В. Серебро, сплавы и биметаллы на его основе: Справочник. — М.: Металлургия, 1979. — 296 с.
3. Михайлова Э. М. Контактная сварка в вакууме медных гибких связей // Свароч. пр-во. — 1972. — № 10. — С. 42–43.
4. Квасницкий В. Ф. Исследование процесса и разработка технологии соединения меди без расплавления // Технология судостроения и сварочного производства в судостроении. — Николаев, 1973. — С. 83–88.
5. Козаков Н. Ф., Бойченко А. Н. Исследования процесса диффузионной сварки в вакууме некоторых драгоценных металлов и сплавов с недрагоценными // Диффузионные соединения в вакууме. — М.: МТИММП, 1971. — С. 98–108.
6. Абрамов В. В., Ахунданова Л. А. Пластичность и микротвердость приконтактных слоев меди при сварке давлением с подогревом // Свароч. пр-во. — 1986. — № 11. — С. 23–24.
7. Самоочистка от оксидов стыкуемых поверхностей при сварке в твердой фазе с нагревом / С. И. Кучук-Яценко, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко, С. Г. Григоренко // Автомат. сварка. — 1998. — № 2. — С. 16–24.
8. Суцков Д. И. Медь и ее сплавы. — М.: Металлургия, 1967. — 248 с.
9. Гегузин Я. Е. Физика спекания. — М.: Наука, 1967. — 360 с.
10. Розенберг В. М. Ползучесть металлов. — М.: Металлургия, 1967. — 275 с.
11. Малевский Ю. Б., Маркашова Л. И. Образование активных зон при сварке без расплавления // Автомат. сварка. — 1968. — №. — С. 71.
12. Малевский Ю. Б., Маркашова Л. И., Несмих В. С. Роль рекристаллизации в образовании соединения при сварке в твердом состоянии // Диффузионные соединения в вакууме. — М.: МТИММП, 1971. — С. 87–98.

The technology of resistance welding in air and shielding gas atmosphere has been developed for joining flexible copper busbars with silver plates welded to the contact pads to manufacture flexible connections for high-voltage vacuum switches. It has been established that the use of a certain thermal-deformation cycle can provide a sound welded joint on the copper-silver foil stack. The mechanism of deformation of the stack and formation of a welded joint have been studied. The experimental welding machine and control unit have been manufactured.

Поступила в редакцию 25.07.2003



ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОПЛАМЕННОЙ ПАЙКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ УЗЛОВ ОХЛАДИТЕЛЕЙ ПИВА

В. Ф. ХОРУНОВ, д-р техн. наук, **С. В. МАКСИМОВА**, канд. техн. наук, **Б. В. СТЕФАНИВ**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Г. Г. КАРАЧЕНЦЕВ, председатель правления, **В. Ю. ЗАДИРАКА**, канд. техн. наук
(ЗАО «УКснаб», г. Красноперекоск, Украина)

Выполнен анализ возможных дефектов при получении паяных трубчатых соединений узлов охладителей пива. Приведены примеры паяных трубчатых соединений из однородных материалов (медь-медь) и разнородных (латунь-нержавеющая сталь, медь-нержавеющая сталь).

Ключевые слова: пайка, припой, флюсы, охладители пива, дефекты, газопламенный нагрев, окисление, латунь, медь, нержавеющая сталь

Производство пива в Украине растет быстрыми темпами. Построены новые и реконструированы старые заводы, спрос в основном удовлетворяется продукцией местного производства. С каждым годом импорт пива сокращается, а экспорт возрастает.

До настоящего времени в Украине не изготавливали и не собирали технологические линии по розливу пива, одним из элементов которых является охладитель пива. Этот недостаток был устранен «Украинской пивной компанией», организовавшей завод по изготовлению охладителей пива и керамических пивных колонн в г. Красноперекоске (Автономная Республика Крым) — ЗАО «УКснаб». Предприятие оснащено самым современным оборудованием для производства охладителей из Англии, Германии, Дании. Ежегодно разрабатывается 4...6 новых охладителей, из них осваивается 2...3 модели, которые поставляются в Украину, Россию, Казахстан.

Недостатком в деятельности компании было отсутствие достаточного опыта монтажной пайки, что являлось причиной отказа в работе оборудования после его транспортировки и эксплуатации. Эта проблема была устранена совместными усилиями ЗАО «УКснаб» и Института электросварки им. Е. О. Патона.

Предстояло решить следующие задачи:

- провести анализ технологического процесса пайки, выявить его недостатки и определить причину появления брака;
 - разработать технологию пайки на уровне мировых стандартов для различных материалов, применяемых в производстве;
 - провести обучение паяльщиков предприятия.
- Охладители пива состоят из агрегатного и технологического отсеков, помещенных в металлический корпус (рис. 1). Холодильная машина, находящаяся в агрегатном отсеке, состоит из тру-



Рис. 1. Охладитель пива

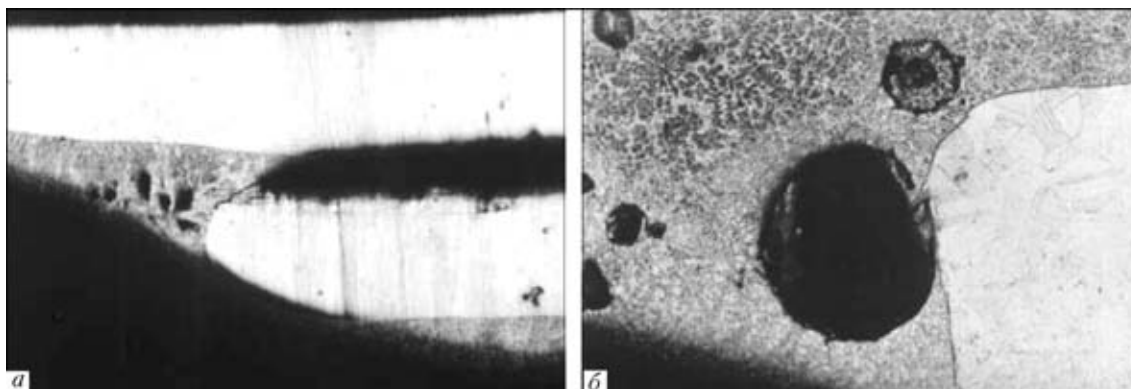


Рис. 2. Дефекты в паяных соединениях: *a* — непрой, $\times 25$; *b* — пористость, $\times 100$



Рис. 3. Паяный узел охладителя пива



Рис. 4. Паяное соединение капилляра диаметром 2 мм с трубками диаметром 5,4 и 10 мм



Рис. 5. Паяное медное трубчатое соединение

бопроводов, имеющих нахлесточные трубчатые соединения диаметром 6...10 мм, а также дроссели (капиллярной трубки с наружным диаметром 2 мм, входящей в испаритель с внутренним диаметром 7...9 мм). Все стыковые соединения трубопроводов холодильной машины получают с помощью пайки.

Известно, что пайка — сложный технологический процесс, зависящий от многих взаимосвязанных параметров, которые должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить капиллярную пайку, т. е. растекание припоя и затекание в зазор за счет капиллярных сил.

Технический анализ технологического процесса пайки выполняли путем оценки качества паяных медных соединений серийного производства. С этой целью проводили визуальный осмотр и металлографические исследования с помощью оптического и растрового микроскопов. При визуальном осмотре нахлесточных трубчатых соединений обнаружено избыточное количество припоя выше участка нахлестки, при металлографическом исследовании тех же соединений обнаружены более серьезные дефекты, которые могут приводить к потере работоспособности соединения (рис. 2). Наличие таких дефектов обусловлено нарушением

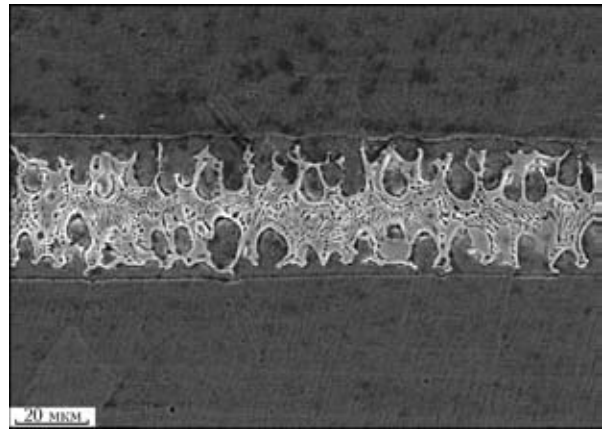


Рис. 6. Микроструктура паяного шва медного трубчатого соединения, X1000



Рис. 7. Паяное соединение медь-нержавеющая сталь

технологического процесса получения паяных соединений.

На основе исследований, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона, отработана технология газопламенной пайки трубчатых соединений из различных материалов (в том числе предварительная подготовка паяемых поверхностей).

Для газопламенной пайки трубчатых медных соединений использовали серебряные и медно-фосфористые припои. С их помощью получены качественные паяные соединения с хорошим формированием внутренней и наружной галтели (рис. 3–5). Микроструктура паяного шва состоит из зерен твердого раствора на основе меди и эвтектики (рис. 6).

Пайка разнородных соединений медь-нержавеющая сталь на воздухе более сложная задача, имеющая свои особенности, обусловленные образованием оксидов на паяемой поверхности. При пайке нержавеющей стали необходимо применять активные флюсы и припои с более низкой температурой плавления.

Все рекомендуемые флюсы для пайки этих материалов быстро теряют активность в пламени горелки, поэтому важную роль играет техника нагрева. Кроме того, необходимо обеспечить одновременное смачивание обоих материалов и удовлетворительную прочность паяных соединений. В данном случае наиболее приемлемы серебряные припои, имеющие необходимый температурный ин-

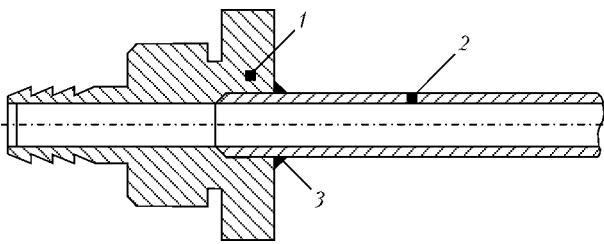


Рис. 8. Схема паяного соединения из разнородных материалов: 1 – штуцер (латунь); 2 – трубка (нержавеющая сталь); 3 – припой

тервал, большую жидкотекучесть, слабо растворяют коррозионностойкие стали в процессе пайки, не обладают проникающей (по границам зерен) способностью и не образуют прослоек хрупких интерметаллидов (при точном соблюдении технологического процесса пайки). Полученные паяные соединения характеризуются плотными бездефектными швами, наличием внутренней и наружной галтели (рис. 7).

Особый случай представляют разнородные соединения латунь–нержавеющая сталь (рис. 8). С одной стороны, данные материалы нельзя перегревать, поскольку нержавеющая сталь быстро окисляется, а латунь характеризуется невысокой температурой плавления из-за наличия легкоиспаряющегося элемента – цинка. С другой – получение качественного соединения требует медленного и полного прогрева как нержавеющей трубки, так и массивного латунного штуцера. Такие особенности создают дополнительные ограничения при выборе припоя и режима газопламенного нагрева.

Исключить такие нежелательные явления, как окисление основного металла, испарение летучих элементов при пайке латуни со сталью, удалось благодаря специальной технологии пайки и правильно выбранному составу припоя.

Совместными усилиями ЗАО «УКснаб» и ИЭС им. Е. О. Патона были решены все поставленные задачи, отработана технология пайки как в лабораторных, так и в производственных условиях.

The possible defects in producing brazed tubular joints of beer cooler units are analysed. Examples of brazed tubular joints made from similar (copper-copper) and dissimilar (brass-stainless steel, copper-stainless steel) materials are given.

Поступила в редакцию 10.07.2003

VIII специализированная выставка «СВАРКА-2004»

15–18 июня 2004 г.

Нижний Новгород

Организационный комитет приглашает посетить VIII специализированную выставку «СВАРКА-2004» с международным участием на базе Выставочного комплекса «Нижегородская Ярмарка».

Тематика выставки:

- Оборудование и оснастка для контактной сварки
- Оборудование для специализированных способов сварки
- Машины и оборудование для дуговой сварки и резки, источники питания, приспособления и инструменты
- Оборудование для плазменной обработки металлов
- Машины и оборудование для газовой сварки, вспомогательный инструмент
- Оборудование, приспособления и инструменты для сварки в среде защитного газа
- Оборудование для подготовки поверхности
- Автоматические системы управления для сварочных процессов, роботы и робототехнические комплексы
- Измерение, контроль, испытания, обработка данных
- Средства защиты сварщиков и охрана окружающей среды
- Научное и информационное обеспечение



Адрес оргкомитета конференции:

ВЗАО «Нижегородская Ярмарка»
603086 Нижний Новгород, ул. Совнаркомовская, 13
Тел.: (8312) 775880, 775589, 775588
Факс: (8312) 775586, 775568
E-mail: uvarov@yarmarka.ru
URL: <http://www.yarmarka.ru>



У ДК 621.791.62-135

ЭЛС КОРПУСА ПЛАМЕННОЙ ТРУБЫ СТАЦИОНАРНОЙ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

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

Описаны технологические приемы сборки, сварки и особенности получения работоспособного узла — блока обечаяк для выходного контура камеры сгорания газовой турбины. Показано преимущество применения электронно-лучевой сварки при изготовлении изделий из жаропрочного сплава 04ХН60ВТ на никелевой основе перед аргонодуговой и ручной дуговой сваркой.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, никелевый сплав, пламенная труба, микроструктура, горячие трещины

Сварные корпуса пламенных труб газовых турбин работают в условиях постоянной вибрации и циклического изменения высоких температур (300...900 °С), что обуславливает жесткие требования к качеству их сварных соединений.

Получение надежных сварных соединений из жаропрочных сплавов на никелевой основе сопряжено с серьезными трудностями. Они прежде всего связаны с возможностью появления трещин в околошовной зоне (ОШЗ) при сварке, термической обработке и высокотемпературной эксплуатации [1–10].

С точки зрения повышения надежности стационарных газовых турбин представляется перспективным применение ЭЛС при изготовлении отдельных узлов. Однако работа в этом направлении находится еще в начальной стадии, поэтому с уверенностью сказать о целесообразности использования этого способа сварки пока нельзя. Применение ЭЛС не всегда обеспечивает бездефектность сварных соединений из жаропрочных никелевых сплавов и требует развития исследований в этом направлении, однако трудности, возникающие при ЭЛС, могут быть преодолены с меньшими затратами [2, 3, 5], чем при дуговой сварке. Благоприятный термомеханический цикл ЭЛС дает возможность избежать традиционных для дуговой сварки кристаллизационных трещин в ОШЗ за счет малого удельного тепловложения и, как следствие, снижения интенсивности внутренней высокотемпературной деформации. Кроме того, высокие скорости нагрева и охлаждения выше точки A_3 ограничивают рост зерна в шве и ОШЗ. Тем самым повышается стойкость сварных соединений против образования горячих трещин, имеющих межзеренный характер [1].

Можно предположить, что при условии соблюдения правил проектирования и изготовления сварных узлов, исключающих в изделии конструктивные и технологические концентраторы напряжений, ЭЛС позволит избежать проведения послесвароч-

ной термообработки. Опыт ЭЛС таких изделий на предприятии Энергомаша не дал положительных результатов, в большинстве случаев они имели горячие трещины по линии сплавления.

Первые эксперименты, проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона по применению ЭЛС для сварки швов на блоках обечаяк (рис. 1), показали, что этот процесс может существенно уменьшить остаточные деформации конструкции после сварки. При разработке технологии принимали во внимание рекомендации авторов [2, 3, 7, 10], выяснявших факторы, влияющие на образование и развитие трещин при ЭЛС жаропрочных никелевых сплавов, и способы уменьшения трещин за счет изменения режимов сварки [2, 3].

Рассмотрена технология ЭЛС корпуса трубы, состоящей из блока перфорированных обечаяк сложного профиля толщиной $\delta = 1,5$ мм из сплава 04ХН60ВТ. Химический состав сплава следующий, мас. %: 0,04...0,05 С; 0,23...0,34 Мп; 0,22...0,34 Si; <0,013 Р; <0,013 S; 24,7...25,4 Cr; <0,01 Cu; 0,07...0,25 Al; 0,34...0,47 Ti; <0,05 Ca; 13,2...13,9 W; 0,02...0,06 Mo; 0,23...0,42 Fe; Ni — основа.

Конструктивно сварка должна обеспечить герметичное соединение заготовок-обечаяк в блок нахлесточными швами (10 штук на блок обечаяк).

Сварочные операции проводили на установке УЛ-101, оснащенной источником питания ЭЛА 60/60, вакуумной системой, системой наблюдения РАСТР-5М, компьютеризированной системой управления механизмами перемещения изделия и сварочного пучка. Электронно-лучевую пушку на рабочем расстоянии $L_p = 140$ мм выставляли под углом $22,5^\circ$ от вертикали (рис. 2).



Рис. 1. Внешний вид сварного изделия

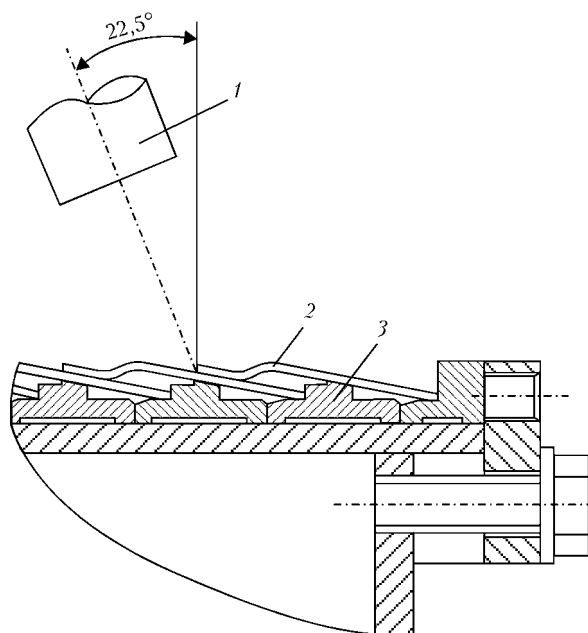


Рис. 2. Схема выполнения сварки блока обечаяк: 1 — электронно-лучевая пушка; 2 — блок обечаяк; 3 — сборочно-сварочное приспособление

© В. И. Загорников, 2004

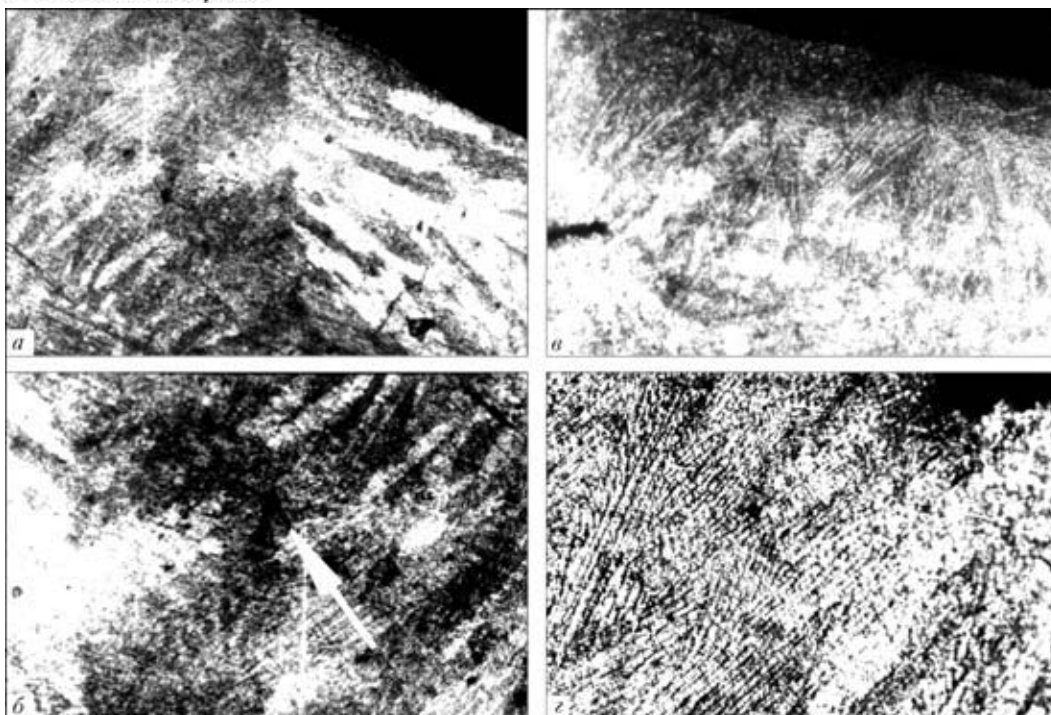


Рис. 3. Микроструктура металла шва (v, z) и ОШЗ (a, б): а – режим № 1; б – режим № 3; в, z – режим № 2 (a, в – $\times 100$, б, z – $\times 150$)

Последовательность операций и параметры режима ЭЛС опытного соединения сплава 04ХН60ВТ

Наименование операции	Параметры режима ЭЛС		Макрошлифы	
	$I_{св}$, мА	$I_{ф}$, мА		
Режим № 1				
Выполнение прихваток длиной 30 мм, 4 шт. по окружности	13	780		
Выполнение сварки по всей длине $L = \pi D + 50$ мм	17	810		
Косметическое заглаживание шва	19	808		
Режим № 2				
Выполнение прихваток длиной 30...60 мм, 8 шт.	13	800		
Выполнение сварки	1	15		805
	2	15		814
Косметическое заглаживание шва	19	800		
Режим № 3 (ремонтный, при зазорах $>0,15$ мм)				
Выполнение прихваток длиной 30...60 мм по зазору $\geq 1,5$ мм, внахлестку по всей длине	15	800		
Выполнение сварки	1	17		810
	2	19		808
Косметическое заглаживание шва	19	816		
	18	820		

Сборочно-сварочное приспособление обеспечивало точность установки обечаск и их стягивание в блок, а после ЭЛС быстрое снятие изделия. Собранные под сварку изделие устанавливали на вращателе с горизонтальной осью вращения. При выполнении сварки в нижнем положении получено равномерное оплавление верхней и нижней кромок кольцевого соединения. Тем самым увеличена допустимая неточность совмещения электронного пучка со стыком свариваемых кромок при изменении в нем зазоров и при локальных тепловых деформациях (после постановки дополнительных прихваток).

Качество и внешний вид швов улучшены путем предварительной очистки поверхности стыков развернутым по кругу ($\varnothing \approx 6\delta$) электронным пучком и последующей косметической обработки сварного шва расфокусированным пучком. Перед сваркой изделий были изготовлены поперечные макрошлифы из опытного сварного соединения, которые позволили выбрать необходимый для получения требуемой формы проплавления шва диапазон параметров режимов ЭЛС (таблица). Скорость сварки была постоянной ($v_{св} = 9$ мм/с).



Прихватки располагали по периметру стыка диаметрально противоположно. Обычно их накладывали 4 шт., но с увеличением зазора в стыках — до 8 и более. Общая длина прихваток 30...60 мм, ввод-вывод тока сварки — на длине 5 мм. В случае больших зазоров выполняли повторные проходы на повышенных (на 10...15 %) токах сварки, но без сквозного проплавления стенки обечайки.

Столь значительные для ЭЛС зазоры (до 1,5 мм) при сборке обечаек в блок объясняются тем, что по условиям существующей технологии изготовления обечаек изготовитель не может обеспечить воспроизводимость диаметра обечайки, на которой выполняется кольцевой шов.

После выполнения косметического прохода литая зона шва с лицевой стороны несколько расширилась (до 6 мм). Применение повторных проходов для заполнения зазоров и косметическая обработка шва (устранение поверхностных концентраторов напряжения) приводит к увеличению размера зерна аустенита (рис. 3), однако зарождение трещин на стыке трех зерен наблюдали только после 3...4 проходов кольцевых нахлесточных соединений обечаек с превышением зазора свыше 0,15 мм.

После неоднократных проходов в процессе заварки стыков обечаек с зазорами, превышающими допустимые (таблица, режим № 3), возможно появление зародышей трещин на границе шов — основной металл (рис. 3, б). Длительность всех операций сварки блока обечаек 2...3 ч, при этом сборка-разборка 0,5...1 ч. Качество швов и производительность процесса ЭЛС выше, чем при других способах сварки плавлением, применявшихся ранее.

Выводы

1. Использование ЭЛС для сплава марки 04ХН60ВТ, размер зерна которого оказывает сильное влияние на процессы образования трещин, является наиболее оптимальным.

2. Применение ЭЛС позволяет получить минимальный размер зерна в металле ОШЗ с незначительным выделением примесей и эвтектик по границам зерен.

Welding and assembly techniques, as well as peculiarities of manufacturing a serviceable unit, i.e. block of shells for output circuit of a gas turbine combustion chamber, are described. Advantages of electron beam welding used to manufacture parts of heat-resistant nickel-base alloy 04KhN60VT over argon-arc and manual arc welding are shown.

Поступила в редакцию 03.06.2003

УДК 621.791.75.042-492

ПОРОШКОВЫЕ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ СВАРКИ И ЗАВАРКИ ДЕФЕКТОВ ЛИТЬЯ СТАЛИ 110Г13Л

Л. Н. ОРЛОВ, канд. техн. наук, А. А. ГОЛЯКЕВИЧ, инж. (ООО «ТМ. ВЕЛТЕК», г. Киев),
Д. П. НОВИКОВА, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
В. Н. ПЕЛЕНКО, В. В. СИМОНЕНКО, инженеры (Криворож. центральный рудный завод)

Отмечена неудовлетворительная свариваемость стали 110Г13Л, усугубляемая ростом тепловложения. Описаны разработанные в различное время электроды для сварки стали Гадфильда и ее разнородных соединений. Дана характеристика разработанных ТМ.Велтек порошковых проволок Велтек-Н200у и Велтек-210у применительно к заварке литья стали 110Г13Л и сварке разнородных соединений этой стали со сталью 20ГСЛ.

Ключевые слова: дуговая сварка, сталь Гадфильда, разнородные соединения, свариваемость, порошковые проволоки

Высокомарганцовистая сталь 110Г13Л, благодаря высокой способности к деформационному упрочнению марганцовистого аустенита [1, 2], находит широкое применение для изготовления изделий, работающих под воздействием ударных, ударно-абразивных нагрузок и высоких удельных статических давлений. Сталь 110Г13Л обладает плохой свариваемостью в связи с развитием процессов разупрочнения, охрупчивания и образования горячих трещин в металле ЗТВ под влиянием термического

цикла сварки. При этом наблюдается перераспределение легирующих элементов в зоне сплавления, формирование хрупких прослоек и трансформация структуры металла ЗТВ, выпадение карбидов и легкоплавких эвтектик по границам зерен. Превышение оптимальных значений тепловложения приводит к увеличению толщины разупрочненного слоя металла ЗТВ, что создает трудности при заварке литейных дефектов, наплавке изношенных поверхностей и сварке соединений из разнородных сталей (110Г13Л + 35ГЛ, 110Г13Л + 20ГСЛ). При определенных концентрациях углерода и марганца особенности протекания диффузионных процессов в высокомарганцовистых сталях проявляются в нестабильности аустенита, выпадении по гра-

1. Землин В. Н. Жаропрочность сварных соединений. — Л.: Машиностроение, 1972. — 272 с.
2. Морочко В. П., Зорин Н. Я. Характер и причины образования трещин при однопроходной электронно-лучевой сварке никелевых сплавов // V Всесоюз. конф. по электронно-лучевой сварке, 1977. — С. 66–75.
3. Морочко В. П., Федоров Б. М., Андреев В. Д. Сопоставление лазерной, электронно-лучевой и аргодуговой сварки жаропрочного никелевого сплава ХН68ВМТЮК // Свароч. пр-во. — 1985. — С. 13–16.
4. Superalloys II / Ch. T. Sims et al. — John Wiley @ Sons, 1987. — 615 p.
5. Anik S., Dorn L. Metallphysikalische Vorgaenge beim Schweißen von Nickelwerkstoffen- Einfluss der Werkstoffzusammensetzung // Schweissen und Schneiden. — 1983. — № 9. — P. 445–450.
6. Некоторые закономерности образования горячих трещин при сварке литых жаропрочных никелевых сплавов / В. С. Савченко, К. А. Ющенко, Н. И. Саволой, Ю. Д. Панфилов // Автомат. сварка. — 1993. — № 3. — С. 13–16.
7. Савченко В. С., Ющенко К. А., Саволой Н. И. Влияние скорости деформации на склонность стабильноаустенитных швов к образованию горячих трещин в низкотемпературном интервале хрупкости // Там же. — 1987. — № 10. — С. 9–12.
8. Стойкость сварных соединений жаропрочного никелевого сплава типа хастеллой Н против образования горячих трещин / К. А. Ющенко, В. Н. Липодаев, М. В. Бельчук и др. // Там же. — 1986. — № 9. — С. 10–12.
9. Квасницкий В. Ф. Сварка и пайка жаропрочных сплавов в судостроении // Там же. — 1985. — № 10. — С. 26–30.
10. Сливинский А. А., Файт П. Структура и свойства сварных соединений жаропрочного сплава на основе никеля // Там же. — 2003. — № 5. — С. 7–13.

© Л. Н. Орлов, А. А. Голякевич, Д. П. Новикова, В. Н. Пеленко, В. В. Симоненко, 2004

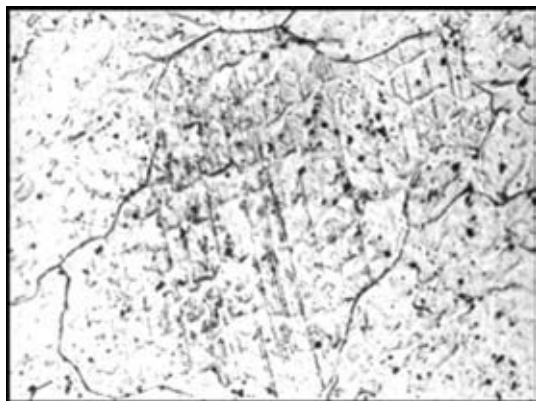
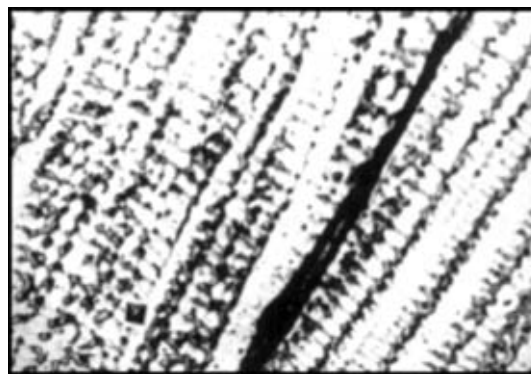
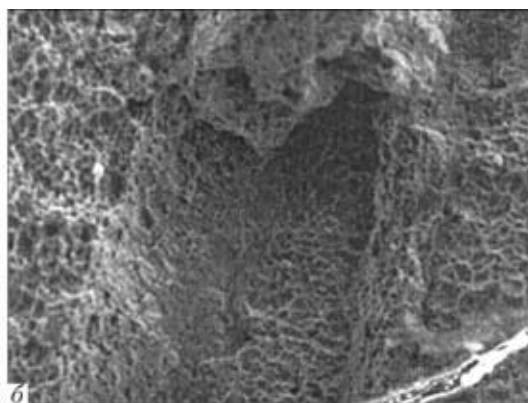
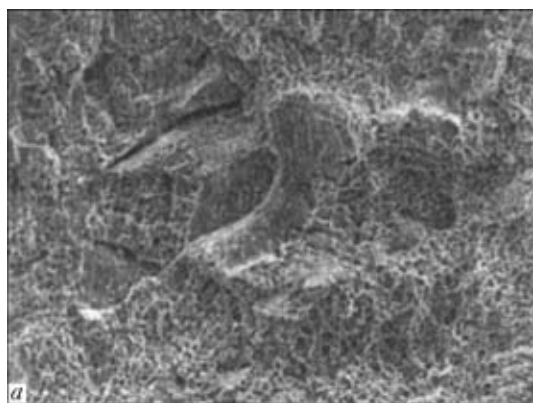
Рис. 1. Микроструктура металла шва, выполненного порошковой проволокой ВЕЛТЕК-Н220у, $\times 320$ 

Рис. 2. Подсолидусная горячая трещина в металле шва с системой легирования Fe-Mn-Cr

Рис. 3. Поверхность разрушения образцов при температуре испытания $+20^\circ\text{C}$ на разрыв (а), $\times 320$ и ударный изгиб (б), $\times 400$

ницам зерен карбидов и формировании трехфазной структуры ($\gamma + \alpha + \epsilon$) [1–6]. Карбидная фаза характеризуется как отдельными дисперсными выделениями, так и сплошными прослойками по границам зерен с различным содержанием легирующих элементов и их соотношением [1, 2, 7, 8].

В настоящее время существует гамма сварочных материалов для сварки и заварки дефектов литья стали 110Г13Л, а также сварки ее с перлитными сталями 20ГЛ и 35ГЛ [8–10]. Для сварки ответственных изделий рекомендуется применение дорогостоящих низкоуглеродистых электродов с системами легирования на базе Fe-Cr-Ni (ОЗЛ-6, НИИ48Г), Fe-Cr-Mn-Ni (АНВ-27), Fe-Cr-Mn (АНВМ-2). В последние годы разработаны экономнолегированные высокомарганцевые электроды (АНВМ-1) [6, 10, 11].

Предприятием ТМ.ВЕЛТЕК выполнен комплекс работ по созданию экономнолегированных порошковых проволок для механизированной заварки дефектов литья высокомарганцевистых сталей и сварки их с перлитными сталями. В процессе разработки реализованы последние достижения в области металлургии производства и сварки высокомарганцевистой стали. Особое внимание уделено снижению содержания и нейтрализации вредных примесей (S, P, O) в металле сварного шва. Реализация комплексного раскисления металла на стадии капли и ванны предупреждает образование по границам зерен легкоплавких эвтектик и железомарганцевых оксидных пленок $(\text{MnO})_m (\text{FeO})_n$ [2]. Для заварки дефектов литья стали 110Г13Л разработана самозащитная порошковая проволока марки ВЕЛТЕК-Н220у $\varnothing 2,0...2,4$ мм, обеспечивающая получение высокомарганцевистого наплавленного металла с высокой стабильностью аустенита. Применение активных десульфураторов в сочетании с основным шлаком обеспечивает достаточно низкое содержание вредных примесей ($S \leq 0,01\%$ и $P \leq 0,016\%$) в наплавленном металле. Комплексное легирование марганцем, титаном, ванадием, молибденом и другими легирующими элементами позволяет реализовать структуру аустенита, упрочненную дисперсными карбидами [1, 5]. В теле зерна наблюдается сетка полигонизационных границ (рис. 1). Глобулярные немагаллические включения диаметром $0,5...2,0$ мкм равномерно распределены в металле и представляют собой сложные окисьюсульфиды. Металл сварного шва обладает приемлемыми механическими свойствами: $\sigma_b = 680...800$ МПа, $\sigma_T =$

$400...500$ МПа, $\delta = 24...30\%$, $KCV = 100...130$ Дж/см² при $+20^\circ\text{C}$. Заварка дефектов литья стали 110Г13Л реализована с применением стандартной технологии.

Применительно к сварке разнородных сталей (110Г13Л + 35Л), (110Г13Л + 20ГСЛ) разработана самозащитная порошковая проволока ВЕЛТЕК-210у $\varnothing 2,4...2,6$ мм с системой легирования Fe-Cr-Mn. Для получения устойчивой аустенитной структуры оптимизировано содержание марганца, хрома, углерода и азота [12]. В металле зоны сплавления и сварного шва не обнаружены обособленные крупные карбиды, цепочки или прослойки карбидов по границам зерен, дисперсные карбиды и карбонитриды равномерно распределены в теле зерна и по границам зерен. При повышенном тепловложении возможно образование подсолидусных горячих трещин (рис. 2). Механические свойства металла шва: $\sigma_b = 680...800$ МПа, $\sigma_T = 500...600$ МПа, $\delta = 28...36\%$, $KCV = 120...150$ Дж/см² при $+20^\circ\text{C}$. В зоне сплавления с перлитной сталью хрупкие прослойки не обнаружены. Фрактографический анализ изломов образцов металла швов, выполненных порошковыми проволоками ВЕЛТЕК-210у и ВЕЛТЕК-220у, показал, что в обоих случаях характерно вязкое разрушение по механизму слияния пор независимо от вида испытания (рис. 3, а, б).

Новые порошковые проволоки имеют хорошие сварочно-технологические характеристики: стабильное горение дуги, значительное разбрызгивание электродного металла, легкую отделимость шлаковой корки даже в глубокой разделке кромок, хороший внешний вид поверхности шва. По сравнению с аналогами на 30 % ниже содержание оксидов марганца в сварочном аэрозоле. Коэффициент использования проволоки находится в пределах $K_{пр} = 1,15...1,2$. В процессе контроля качества сварных соединений дефекты в виде пористости и трещин в наплавленном металле и сварном соединении не обнаружены. Порошковые проволоки ВЕЛТЕК-210Г и ВЕЛТЕК-Н220Г успешно применяются на Криворожском центральном рудном заводе (г. Кривой Рог) при производстве ответственных конструкций.

1. Гудремон Э. Специальные стали. — М.: ГНТИ литературы по черной металлургии, 1959. — Т.1, 962 с.



2. Житнов С. В., Давыдов Н. Г., Братчиков С. Г. Высокомарганцовистые стали. — М.: Металлургия, 1995. — 302 с.
3. Морозовская Е. Н. Структура околосшовной зоны при наплавке на сталь Г13Л // Автомат. сварка. — 1967. — № 7. — С. 57–59.
4. Готальский Ю. Н. К проблеме сварки разнородных сталей в конструкциях, длительно работающих при высокой температуре // Там же. — 1964. — № 12. — С. 38–45.
5. Кондратюк С. Е., Касаткин О. Г. Разрушение литой марганцовистой стали. — Киев: Наук. думка, 1987. — 148 с.
6. Новые материалы для сварки сталей 110Г13Л и 30Г / В. Н. Липодаев, Н. И. Каховский, В. С. Фельдман и др. // Автомат. сварка. — 1977. — № 9. — С. 71–73.
7. Малинов Л. С., Харламова Е. Я. Влияние легирования и предварительной деформации на фазовый состав и механические свойства сплавов Fe-Mn // Металлы. — 1981. — № 6. — С. 141–147.
8. Березовский А. В., Бармин Л. Н., Шумяков В. И. Влияние состава электродного материала на свойства сварных соединений стали 110Г13Л // Свароч. пр-во. — 1987. — № 7. — С. 26–27.
9. Новые электроды для сварки и наплавки стали 110Г13Л / В. В. Снисарь, Э. Л. Демченко, О. И. Бреднев и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 5. — С. 47–49.
10. Сварочные материалы для сварки сталей и чугуна (электроды, флюсы и проволоки) / В. Н. Горпенюк, П. В. Игнатченко, С. С. Меличенко и др.: Справочник. — Киев, 1994. — 622 с.
11. Чейлях А. П., Малинов Л. С. Свойства и превращения в хромомарганцевых коррозионно-стойких сталях // Металловед. и термическая обработка матер. — 1994. — № 2. — С. 28–32.
12. Разиков М. И., Кочева Г. Н., Толстых Л. Г. Структурная диаграмма металла шва на хромомарганцовистых сталях // Автомат. сварка. — 1968. — № 4. — С. 1–5.

Poor weldability of steel 110G13L, caused by a growth in heat input, is outlined. Electrodes, developed at different periods of time for welding Hadfield steel and its dissimilar joints, are described. Characteristic of developed TM Weltech flux-cored wires Weltech-H200U and Weltech-210U relative to welding-up of 110G13L steel castings and welding of dissimilar joints of this steel with steel 20GSL is given.

Поступила в редакцию 23.07.2003

Информация пресс-службы ИЭС

ЕВРОПЕЙСКАЯ ПРОГРАММА NOMAD ПО СОЗДАНИЮ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ СВАРКИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Программа NOMAD — одна из пяти международных программ, которые выполняются в рамках Европейской комиссии. Целью программы является создание роботизированных сварочных производственных ячеек нового поколения. Основное отличие создаваемых ячеек от уже существующих состоит в том, что сварочный робот, установленный на специальной тележке, может свободно перемещаться внутри ячейки и производить сварку различных конструкций в соответствии с заданной программой. На тележке, кроме робота, размещается все необходимое оборудование для сварки МАГ, а также блоки управления процессом сварки и перемещением тележки (рис. 1). Тележка, являющаяся по сути робокаром, может производить внутри ячейки сварку индивидуальных конструкций массой до 50 т с производительностью, присущей в настоящее время крупносерийному производству.

Навигационная система робокара обнаруживает конструкцию, подлежащую сварке, определяет ее положение внутри ячейки и управляет перемещением робокара в рабочее положение. С помощью базы данных блок управления процессом сварки распознает геометрическую форму свариваемого изделия, расположение и геометрические размеры сварных швов и передает параметры технологии сварки конструкции сварочному роботу (рис. 2).

В настоящее время разрабатываются электронные модели для сварки двух изделий: фрагмента моста для фирмы «Nusteel Structures» и стрелы экскаватора фирмы «Caterpillar». В стадии конструирования находится тележка робокара. В заключение проекта на одном из предприятий «Caterpillar» будет смонтирована демонстрационная производственная роботизированная сварочная ячейка нового поколения.

В проекте участвуют: Бельгия (фирма «Caterpillar»); Великобритания (Британский институт сварки); Германия (Франкфуртский институт и фирмы «Reis»); Финляндия (фирма «Delfoi»); Франция (фирма «Robosoft»); Швеция (фирма ESAB). Срок выполнения проекта — 3,5 года; стоимость — 4,8 млн евро, из которых 50 % финансируется Европейской комиссией и 50 % — партнерами проекта.



Рис. 1. Тележка-робокар с размещенным на ней роботом, сварочным оборудованием и системами управления

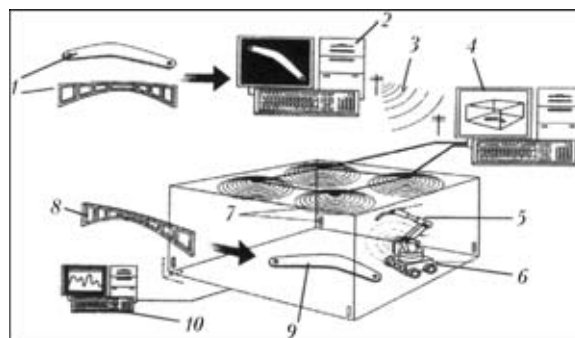


Рис. 2. Основные элементы роботизированной ячейки для высокопроизводительной сварки: 1 — блок разработки технических требований к изделию; 2 — блок электронного проектирования технологии сварки изделий; 3 — линии передачи данных; 4 — блок управления процессом сварки и перемещением тележки; 5 — рука робота; 6 — тележка; 7 — навигационная система; 8 — деталь, подготовленная для сварки; 9 — деталь в процессе сварки; 10 — блок автоматизированного контроля процесса

И. А. Рябцев



ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины



В. А. Шаповалов (ИЭС) защитил 22 октября 2003 г. докторскую диссертацию на тему «Научные и технологические основы плазменно-индукционного выращивания крупных монокристаллов тугоплавких металлов».

В работе впервые решена проблема выращивания крупных ориентированных монокристаллов вольфрама и молибдена с достаточно совершенной структурой и улучшенными физико-механическими свойствами в результате изучения и усовершенствования плазменно-индукционной зонной плавки, стабилизации процесса совместной работы индуктора и плазмотрона и управления температурным полем всего монокристалла во время выращивания и охлаждения.

Диссертантом обоснована и практически подтверждена стабильная работа индуктора в широком диапазоне мощности при комбинированном плазменно-индукционном нагреве монокристаллов путем размещения холодной секционной стенки в зазоре между индуктором и монокристаллом, что предупреждает возбуждающие действия плазменной дуги.

Автором впервые сформулированы подходы к управлению технологическим процессом бестигельной плазменно-индукционной зонной плавки, которые базируются на регулировании мощности плазменно-дугового и индукционного источников нагрева, поддержке оптимального соотношения компонентов смеси плазмообразующего газа, учете геометрических размеров и масштабного уровня субструктуры зародыша кристалла, что обеспечивает гарантированное формообразование монокристалла с достаточно совершенной субструктурой. Показано, что совершенство субструктуры в процессе выращивания и охлаждения крупных монокристаллов можно повышать за счет индукционного нагрева, который, кроме функций активного управления температурным полем в зоне формирования монокристалла и электромагнитного удерживания ванны расплава от выливов, позволяет снизить напряжения и деформации монокристалла.

При изготовлении крупных деталей экспериментально подтверждена возможность применения крупных ориентированных монокристаллов вольфрама и молибдена в качестве мишеней при распылении и обработке давлением, в том числе для получения плоского широкоформатного проката тонких сечений.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины



А. Б. Лесной (ИЭС) защитил 5 ноября 2003 г. кандидатскую диссертацию на тему «Компьютерное моделирование тепломассообмена и гидродинамики при электронно-лучевом переплаве сплавов на основе титана».

К наиболее существенным результатам работы относятся:

- разработка компьютерной модели, позволяющей исследовать влияние технологических параметров электронно-лучевого переплава (ЭЛП) на кинетику процессов тепломассообмена, гидродинамику и образование химической неоднородности при выплавке слитков титановых сплавов, что позволяет сократить количество дорогостоящих натурных экспериментов при совершенствовании и разработке новых технологий ЭЛП;

- исследование способами математического моделирования гидродинамики жидкой металлической ванны при ЭЛП слитков на основе титана. Показано, что основным фактором, определяющим движение расплава, является термогравитационная конвекция, интенсифицируемая термокапиллярными поверхностными силами Марангони. Концентрационная конвекция характеризуется слабой интенсивностью и не имеет ярко выраженного влияния на гидродинамику расплава. Периодическое действие струи сливаемого металла из промежуточной емкости приводит к частичному подплавлению фронта твердения при проникновении струи больше чем на $3/4$ глубины ванны. Величина оплавления слабо зависит от температуры перегрева сливаемого металла и определяется степенью проникновения и углом раскрытия струи. Показано, что струя значительно эжектирует перегретый металл с приповерхностных слоев расплава и транспортирует его в глубь ванны;

- установление закономерностей образования химической неоднородности в жидком и твердеющем металле при ЭЛП сплавов титана с повышенным содержанием алюминия;

- установление на основе вычислительных экспериментов способов и возможностей влияния на формирование гидродинамики расплава, тепловое состояние жидкой металлической ванны и образование химической неоднородности в твердеющем металле. Установлено, что наиболее благоприятные условия формирования равномерного химического состава вдоль радиуса слитка обеспечивается при дополнительном локальном применении электронно-лучевого нагрева в центральной зоне зеркала ванны, расположенной на $0,45...0,65$ радиуса слитка.

ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ЖУРНАЛАМ*

CHINA
WELDING(Kumai), 2001. —
Vol. 10, № 1 (англ. яз.)

Qiu Tao et al. Моделирование и анализ на основе сети Петри гибкого автоматизированного участка для сварки, с. 1–7.

Ren Zhen et al. Эрозионная стойкость поверхностных слоев швов Fe–C–Cr, с. 8–13.

Zhou Ronglin et al. Влияние термического цикла на диффузионное соединение с фазовым превращением титана с нержавеющей сталью, с. 14–18.

Yu Jianrong et al. Функция синтетической количественной оценки типичных параметров процесса дуговой сварки в CO₂, с. 19–26.

Tian Jinsong et al. Исследование общей обратной кинематики вращательного/наклонного позиционера для роботизированной дуговой сварки с автономным программированием, с. 27–33.

Fu Lixin et al. Метод измерения и корректировки ошибок местоположения при роботизированной сварке, с. 34–38.

Hu Shengsun et al. Разработка системы слежения по стыку с ультразвуковым датчиком и самонастраивающимся нечетким управлением, с. 39–42.

He Jinshan et al. Математическая модель и моделирование шва с частичным проплавлением, с. 43–49.

Yang Shiyan et al. Разработка сварочной установки для трехмерной модели процесса ускоренной разработки программ, с. 50–56.

Wang Fude et al. Прогнозирование химсостава порошковой проволоки для наплавки с помощью нейронной сети, с. 57–63.

Li Dongqing et al. Проектирование системы измерения динамического смещения при сварке с помощью лазерной электронной спекл-интерферометрии, с. 64–69.

Dong Shijie et al. Исследование сложной поверхностной обработки стали 38CrMoAl, с. 70–74.

* Раздел подготовлен сотрудниками научной библиотеки ИЭС им. Е. О. Патона. Более полно библиография представлена в Сигнальной информации (СИ) «Сварка и родственные технологии», издаваемой в ИЭС и распространяемой по заказам (заказ по тел. (044) 227-07-77, НТБ ИЭС).



Wang Qing et al. Моделирование и имитация разгрузочного сварочного трансформатора, с. 75–80.

(*Kumai*), 2001. — Vol. 10,
№ 2 (англ. яз.)

Cheng Fangjie et al. Математическая модель для определения шероховатости контактной поверхности при точечной сварке, с. 81–88.

Zhao Dongbin et al. Моделирование нейронной сети для импульсной сварки ТИГ с присадочной проволокой на основе программного обеспечения MATLAB, с. 88–93.

Wei Jinshan, Zhang Tianhong. Влияние вторичного термического цикла сварки на структуру и свойства, с. 94–98.

Liu Liming et al. Исследование характеристики упрочнения субмикронным композитом с порошковым наполнителем $AlO_3/6061Al$ в процессе лазерной сварки, с. 99–103.

Wang Xibao et al. Теоретическая оценка транспорта порошков в плазме дуги прямого действия в режиме коаксиальной подачи порошка, с. 104–110.

Zhang Guangjin et al. Исследование сварочного источника питания, используемого в интеллектуальном устройстве управления для формирования сварочной ванны при импульсной сварке ТИГ, с. 111–115.

Chen Zheng et al. Сравнение явления поверхности раздела при анодном соединении в электрическом поле ковар-стекла и ковар/пленки алюминия-стекла, с. 116–121.

Ma Chengyong et al. Применение и перспективы компьютерной технологии в области сварки материалов, с. 122–128.

Xu Wenli et al. Новый метод сварки листового алюминиевого сплава LY12CZ высокой прочности, с. 129–134.

Zhang Deqin et al. Использование ортогонального плана в эксперименте по плазменно-дуговой порошковой наплавке, с. 135–139.

Zhang Deku et al. Механизм лазерной сварки упрочненного SiC композита с алюминиевой матрицей LD2, с. 140–144.

Dong Chum et al. Исследование антропоморфной руки робота для сварки 7-DOF, с. 145–151.

Gong Shuili et al. Исследование динамических механических характеристик сварного соединения, с. 152–156.

Xue Songbai et al. Механизм взаимодействия между редкоземельным элементом Се и примесными элементами Pb и Bi в присадочном металле на основе серебра, с. 157–162.

Wang Fude et al. Исследование стойкости к абразивному износу покрытия $YDCrMoV$, нанесенного с помощью наплавки порошковой проволокой в защитной среде CO_2 , с. 163–169.

Lin Sanbao et al. Влияние активирующих флюсов на механические свойства швов, выполненных сваркой ТИГ, с. 170–174.

(*Kumai*), 2002. — Vol. 11,
№ 1 (англ. яз.)

Zhu Zixin et al. Исследование микроструктуры и свойств скоростного дугового напыления интерметаллического покрытия Fe_3Al , с. 1–4.

Song Yuce et al. Подход к измерению положения дуги сварочного робота RhJD4-1 для выполнения калибровки, с. 5–8.

Sun Daqian et al. Особенности микроструктуры и разрушения композитных соединений на алюминиевой основе в переходной жидкой фазе, с. 9–13.

Wang Peng et al. Расположение кромок при использовании автоматической системы слежения при сварке в узкий зазор с небольшим углом наклона шва, с. 14–19.

Chen Furong et al. Микроструктура и вязкость разрушения сварных соединений стали $30CrMnSiNi2A$, выполненных электроно-лучевым процессом, с. 20–24.

Cai Zhipeng et al. Нестационарная система измерения сварочных деформаций, с. 25–28.

Lin Sanbao et al. Концепция интеллектуального автоматизированного проектирования для схемы расчета сварочного манипулятора, с. 29–33.

Jiang Lpei et al. Исследование полностью автоматизированного дугового автомата для сварки сферического резервуара, с. 34–37.

Li Liangyu et al. Влияние дуги на радиационный пирометр в процессе сварки, с. 38–41.

Yang Shiyan et al. Определение и проверка характерного сигнала капельного переноса от дуги в режиме поперечного перемещения проволоки, с. 42–45.

Wang Yasheng et al. Управление с нечеткой логикой при сварке в CO_2 с переносом металла короткими замыканиями, основанное на снижении зависимости от умения оператора, с. 46–50.

Wang Chunsheng et al. Моделирование электротермического взаимодействия в процессе контактной точечной сварки низкоуглеродистой и нержавеющей сталей, с. 51–52.

Wang Hongying et al. Исследование скорости наплавки и коэффициента разбавления при плазменной наплавке, с. 55–58.

Qi Fangjuan et al. Исследование разрушения сварной полиэтиленовой трубы высокой плотности, с. 59–63.

Chen Yanbin et al. Зависимость между сварочными параметрами и данными акустической эмиссии в процессе лазерной сварки с глубоким проплавлением, с. 64–66.

Jiang Zhihong et al. Анализ нового плавного переключаемого преобразователя со сдвигом фаз, с. 67–71.

Zhang Keke et al. Ультразвуковой контроль качества соединения, выполненного сваркой в твердой фазе, с помощью шупа С-типа с визуализацией данных, с. 72–76.

Cui Ze et al. Объектно-ориентированная графически смоделированная среда с использованием нескольких роботов для программирования задач по сварке, с. 77–83.

Zhao Xihua et al. Анализ прочности соединения при растяжении из сплава TiNi с памятью формы, выполненного прецизионной импульсной контактной стыковой сваркой, с. 84–88.

Liu Xuesong et al. Нестабильность размеров сварных изделий из сплава алюминия при комнатной температуре и после термических циклов, с. 89–94.

*JOURNAL OF THE JAPAN
WELDING SOCIETY (Япония),
2003. — Vol. 72, № 3 (яп. яз.)*

Nogi K. Влияние микроструктуры на вязкость разрушения конструкционной стали, с. 3–4.

Специальный выпуск: МИКРОСОЕДИНЕНИЕ

Wakabayashi S. Методы анализа и соединение корпусов полупроводниковых приборов, с. 6–10.

Nakatsuka Y. Способы управления поверхностью раздела металл-полимер при сборке электронных систем, с. 11–16.

Otsuka K. О линейных структурах для передачи гигагерцевых сигналов, с. 17–20.

Takahashi K. Схемы для манипуляции микрочастицами с помощью электростатической и адгезионной сил, с. 21–24.

Aota K. Применение сварки трением с перемешиванием для микросоединения, с. 25–28.

Лекции по соединению и обработке пластмасс:

Nakamura H., Terada M. Сварка пластмасс полупроводниковым лазером, с. 29–32.

Tamaki K. Трещинообразование в Cr-Mo сталях при повортном нагреве, с. 33–40.

praktiker

(Германия), 2003. —

№ 5 (нем. яз.)

Blum P. Новые профессии электротехников со смежной квалификацией, с. 130.

Matthes K. J., Seliga E. Необходимость исследования техники соединения с точки зрения разработчиков, с. 134–136.

Berndl M., Cramer H. Контактная точечная сварка сплавов магния, с. 138–141.

Точечная сварка специальным плазменным аппаратом, с. 144–146.

Стандарты — карманный справочник ДИН 144, с. 146.

Руководство для практиков — Новое постановление по технике безопасности, с. 146–147.

Сварка в аппаратостроении и сосудостроении, с. 147.

Справочник по алюминию: Ч.1 Основы и материалы, с. 147.

Соединение пластмасс: Справочник на основании инструкций и директив DVS, с. 147.

Mues U. Замеры и ведение документации важно и при контактной сварке, с. 148–149.



Vollrath K. Экономичное изготовление кузовов сервоклеящими с автоматическим управлением, с. 152–155.

Что нового на конференции по сварке в Берлине?, 2003 г., с. 156.

Техника безопасности и защита окружающей среды:

Меньше несчастных случаев на строительных площадках, благодаря лучшей координации, с. 157.

Pescheck D. Еще раз о проедании крысами труб из ПВХ, с. 157–158.

4-я конференция «Сварка в судостроении и в инженерных сооружениях», с. 38.



(Польша), 2003. —
№ 1 (пол. яз.)

Adamiec P. et al. Расчет свойств металла, наплавленного порошковой проволокой, с. 2–4.

Klimpel A. et al. Численный и экспериментальный анализ процесса сварки диодным лазером высокой мощности торцевых соединений тонколистовых сталей, с. 5–8.

Nowacki J. et al. Защитные газы для орбитальной сварки TIG труб из дуплексной стали UNS S31803, с. 9–14.

Senkara J. Прогнозирование потерь компонентов сплава при сварочных процессах, с. 15–18.

(Польша), 2003. —
№ 2–3 (пол. яз.)

Klimpel A. et al. Сварка соединений ферм с анкерной плитой железобетонной конструкции телекоммуникационной башни в Кувейте, с. 1–4.

Pasternak J., Wolanski R. Методика ультразвуковых исследований, с. 5–9.

Mirski Z., Granat K. Автогенная газовая пайка оцинкованных стальных труб, с. 19–21.

Zadroda L. et al. Рельефная сварка давлением стали для изготовления прутков, термоупрочненной методом TEMPSCO-RE, с. 22–25.



(Австрия), 2003. —
№ 5 (нем. яз.)

Rauch R. et al. Оптимальный выбор стали с точки зрения экономичного и надежного изготовления для мостостроения и изготовления трубопроводов давления, с. 66–69.

Huppertz P. H. Мюнхен: сварка в аппаратостроении и сосудостроении в феврале 2003 г. Обмен опытом для практиков, с. 70–71.

Himmelbauer K. Новые разработки в области высокопроизводительных способов сварки, с. 71–74.

Железная дорога делает ставку на ультразвук, с. 75–76.

(Австрия), 2003. —
№ 6 (нем. яз.)

Kunes G., Balas G. Цифровая радиография в дополнение к классическому контролю просвечиванием, с. 82–83.

Aufrecht G. Отчет о 24-м заседании подкомитета по ультразвуковому контролю, доклады на тему «Контрольно-измерительная техника», с. 83.

Meixner R. Контроль сварных конструкций вихревыми токами, с. 84–86.

Henkel G. Электрополирование — современные, надежные и эффективные методы дефектоскопии деталей из нержавеющей стали, с. 87–89.

Самые прочные двери в мире транспортных средств, с. 90–91.

Какова концентрация озона при сварке?, с. 91.

Jessop T. Международная аттестация — стремление к унификации, с. 96.



(Германия), 2003. —
№ 5 (нем. яз.)

Установка для плазменной точечной сварки, с. 224–225.

Новый гидравлический цилиндр снижает вероятность несчастных случаев при выполнении клинчевых соединений, с. 225.

Saidov R. M. et al. Применение флюсов улучшает свариваемость алюминиевых сплавов. Ч. 2. Микроструктура, химические и механические свойства, разделка кромок, с. 230–234.

Новое в сварочной технике в 2002 году:

Металлургия сварки, с. 235–236.

Моделирование свариваемости, с. 236–237.

Сварка нелегированных и низколегированных сталей, с. 237–239.

Сварка мелкозернистых строительных и высокопрочных сталей, с. 239–240.

Сварка цветных металлов, с. 240–247.

Сварка высоколегированных сталей и сплавов на основе никеля, с. 247–250.

Контроль свариваемости, с. 250–251.

Сварка чугуна, с. 251–252.

Suk H. G. Изготовление мультикомпонентных порошков на основе Cr_2O_3 для вязких износостойких покрытий с помощью плазменной модификации, с. 258–261.

Beckert M. Из истории сварки — ультразвуковая сварка, с. 262–264.

Roos E., Deimel P. Семинар в октябре 2002 г. в Штуттгарте «Безопасность энергооборудования», с. 264–269.

Jost G. 3-й форум по пайке в Хемнице (14 мая 2003 г.), с. 270–271.

Kohler G. et al. Лазерная пайка в микротехнологии с применением стеклянного припоя, с. 276–277.

Janssen H. et al. Припой на основе никеля — потенциал и вызов, с. 277–279.

Wielage B., Mucklich S. Пайка магниевых материалов без припоя, с. 279–280.

Fussel U. et al. Применения классической сварочной техники для паянных соединений с разделкой (канавкой), с. 281–282.



(Великобритания), 2003. —
№ 124 (англ. яз.)

Colegrove P., Threadgill P. Инструмент ТМ «Trivex» для сварки трением с перемешиванием, с. 1.

Oakley P., Duncan A. 6-я рамочная программа Европейского Содружества, с. 3.

Обзор использования условных обозначений сварных швов на чертежах, с. 4–5.

Thomas W. et al. ТМ «Com-stir» сложное движение при сварке трением с перемешиванием, с. 8.



(США), 2003. — Vol. 82,
№ 4 (англ. яз.)

Lippold J. C. Дистанционное (компьютерное) обучение в области сварочной техники, с. 32–36.

Greer J. E. Обучение в экстремальных условиях — благодаря решению трудновыполняемых задач можно повысить квалификацию сварщика, с. 38–40.

Kuskov Yu. M. Новый подход к электрошлаковой сварке, с. 42–45.

Bickrest E. Как выбирать привязные ремни безопасности сварщика, с. 97–99.

Utrachi J. Фирма NASCAR — производитель гоночных автомобилей — требует выполнения качественных швов, с. 103–105.

Pankratz M. Проблемы безопасности на рабочем месте при сварке, с. 109–110.

Zhou M. et al. Зависимость между качеством и свойствами точечных сварных швов, с. 72–77.

Ohta A. et al. Повышение усталостной прочности нахлесточных соединений из тонколистовой стали благодаря использованию сварочной проволоки с низкой температурой фазового превращения, с. 78–83.

Brooks J. A. et al. Свойства швов, выполненных из нержавеющей стали AISI 303 без механической обработки, с. 84–92.

(США), 2003. — Vol. 82,
№ 5 (англ. яз.)

Элементарные понятия контроля за вихревыми токами, с. 26–30.

Goudy J., Brok J. Использование сварки TIG для ремонта ракетных топливopроводов, с. 32–35.



Still J. R. Выбор присадочных металлов для соединения морских трубопроводов, с. 38–45.

Kang Y. H., Na S. J. Определение оптимальных параметров сварки МИГ в узкий зазор и характеристик сигнала дуги с помощью электромагнитного колебания дуги, с. 93–99.

Padilla T. M. et al. Математическая модель механизмов подачи проволоки при сварке МИГ, с. 100–109.

Arenas M. F., Acoff V. L. Анализ швов, выполненных на сплаве γ -TiAl методом сварки ТИГ, с. 110–115.

Tang H. et al. Влияние механических характеристик сварочной установки на процесс точечной сварки и качество швов, с. 116–124.

(США), 2003. — Vol. 82,
№ 6 (англ. яз.)

Cook G. E. et al. Контроль процесса роботизированной сварки трением с перемешиванием, с. 28–33.

Keibler C. Планирование подготовки деталей под роботизированную сварку, с. 37–38.

Morehead T. Применение процесса автоматической сварки МИГ последовательными дугами для повышения производительности, с. 40–43.

Система для роботизированной сварки, позволяющая усовершенствовать производство стальных топливных баков для бульдозеров, с. 44–45.

Duont J. N. et al. Микроструктурные изменения и свариваемость разнородных швов суперустойчивой нержавеющей стали и сплавов на основе никеля, с. 125–135.

Omweg G. M. et al. Влияние сварочных параметров и парциального давления H_2S на склонность высокопрочных низколегированных сталей к образованию трещин под напряжением под воздействием сульфидов, с. 136–144.

Qian M., Lippold J. C. Явление ликвации в смоделированной зоне термического влияния сплава 718 в результате многочисленных циклов термообработки после сварки, с. 145–150.

Messler R. W. et al. Соединения AA5754, выполненные с помощью лазерной сварки, для автомобильных конструкций, с. 151–159..

НОВЫЕ КНИГИ

Березовский Б. М. Математические модели дуговой сварки. Издание в 3-х томах. — Челябинск: Изд-во Южно-Урал. гос. ун-та, 2002–2003.



60-летию Южно-Уральского государственного университета посвящается

Том 1. Математическое моделирование и информационные технологии, модели сварочной ванны и формирования шва

Том 2. Математическое моделирование и оптимизация формирования различных типов сварных швов

Том 3. Давление дуги, дефекты сварных швов, перенос электродного металла



В 2003 г. завершен выпуск трехтомного издания под редакцией академика НАН Украины Л. М. Лобанова **«Сварные стальные конструкции»**. Это издание рассчитано на научных и инженерно-технических работников, занятых проектированием, изготовлением, монтажом, диагностикой и продлением сроков эксплуатации сварных строительных конструкций, а также будет полезно преподавателям вузов, аспирантам и студентам.

В первом томе («Основы проектирования конструкций». — Киев: «Наук. думка», 1993. — 416 с.) изложены теоретические основы сварки, общие сведения о материалах и рекомендации по их применению для сварных конструкций. Рассмотрены способы сварки, современные технологии резки проката и оборудование для них, применяемые в строительстве. Большое внимание уделено исследованию механизма образования в конструкциях сварочных деформаций и напряжений, их изучению и оценке, мероприятиям по их регулированию с целью повышения надежности конструкций. Освещены современные и перспективные подходы к оценке прочности сварных соединений и узлов при статическом и циклическом нагружении, особенности их работы и расчета при низких температурах, направления дальнейшего совершенствования норм проектирования.

Во втором томе («Типы конструкций». — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1997. — 680 с.) содержатся обширные сведения по проектированию и особенностям изготовления сварных конструкций, применяемых в различных отраслях строительной индустрии, в основу создания которых положены современные достижения науки и производства. Важным аспектом, объединяющим все разделы, является принцип технологичности конструкций, обеспечивающий минимизацию их стоимости, создание условий для механизации и автоматизации производства. Приведена широкая номенклатура основных типов конструкций, как традиционных — каркасы промышленных зданий, листовые конструкции и трубопроводные системы, пролетные строения автодорожных мостов, сооружения металлургической и горной промышленности, сварные конструкции грузоподъемных механизмов, так и сравнительно новые конструктивные решения — легкие конструкции, решетчатые конструкции из труб, морские стационарные платформы, изготовление и проектирование которых осуществляется в Украине в широких масштабах.

В третьем томе («Арматура и закладные детали. Конструкции из пластмасс. Реконструкция и оптимизация. Контроль качества. Охрана труда». — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2003. — 378 с.) обобщен опыт исследования разработок и производственной деятельности ученых и специалистов в области сварки арматуры и закладных деталей железобетонных конструкций, строительных конструкций из полимерных материалов, оценки технологического состояния и реконструкции зданий и сооружений, оптимизации сварных строительных конструкций, неразрушающего контроля качества сварных соединений, охраны труда при сварке. Представлены также сведения о современных зарубежных нормах для металлоконструкций.

Заказы на трехтомник (и отдельные тома) просьба направлять по факсу (38044) 268-04-86 или в редакцию журнала «Автоматическая сварка».





МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ В КАТОВИЦЕ

С 21 по 23 октября в городе Катовице (Республика Польша) прошла юбилейная X Международная выставка «Interwelding 2003» и приуроченная к ней 45-я Научно-техническая конференция «Влияние сварочных технологий на качество и конкурентоспособность национальной экономики». Организаторами выставки и конференции выступали Польский институт сварки в Гливице совместно с Немецким сварочным обществом (DVS).

В выставке приняли участие 88 фирм из Польши, Австрии, Бельгии, Венгрии, Германии, Франции, Чехии, Швейцарии и Швеции, включая такие сварочные брэнды, как ABICOR BINZEL, ARC MACHINES, CLOOS, ESAB, FRONIUS, LINDE GAZ, MESSER и др. Самые большие экспозиции были представлены Польским институтом сварки (исследования и разработки в области сварки и смежных технологий, подготовка и сертификация персонала), фирмами ESAB (оборудование и материалы для различных способов дуговой сварки), MESSER (газы и горелки для дуговой и плазменной сварки и резки) и LINDE GAZ (газы для сварки и резки), причем многие экспозиции подготовлены и представлены филиалами указанных фирм в Польше. Это свидетельствует о высокой степени интеграции польских производителей и потребителей сварочного оборудования, технологий и материалов в общеевропейский рынок товаров и услуг в области сварки и родственных процессов. На открытии выставки Председатель организационного комитета директор Польского института сварки проф. Я. Пилярчик

высказал предположение, что и выставка, и конференция послужат основой для дальнейшего развития и повышения конкурентоспособности сварочной промышленности как на польском, так и на общеевропейском рынке, а также предоставит участникам прекрасную возможность для установления новых деловых контактов. Интересно отметить, что на выставке также была представлена экспозиция металлических скульптур, изготовленных с использованием сварки, подготовленная Академией изящных искусств в Кракове.

Параллельно с работой выставки проходила международная сварочная конференция, в работе которой приняли участие более 100 специалистов из Польши, Германии и Украины. К ее открытию в специальном выпуске журнала «Бюллетень Института сварки в Гливице» были опубликованы доклады. Среди них доклад председателя DVS проф. Д. фон Хофе «Состояние и направления развития сварки в Германии», в котором с точки зрения DVS был дан аналитический обзор современного состояния дел в области сварки, направлений и перспектив ее развития в Германии. Приведенный анализ сделан на основе информации, предоставленной Технической комиссией, Научным отделом, а также различными институтами DVS. В докладе отражено состояние основных отраслей промышленности, в которых используется сварка. Особое внимание уделено промышленному применению гибридной лазерно-дуговой сварки и процесса сварки трением с перемешиванием. Обзор завершается исследованием промышленного значения сварки и родственных технологий.



Доклад С. Кайтеля, М. Строфера и Х. Буттхофа «Современные тенденции развития высокопроизводительных способов дуговой сварки» посвящен высокопроизводительным процессам дуговой сварки таким, например, как двухдуговая сварка МАГ, сварка порошковой проволокой и гибридная лазерно-дуговая сварка. Показаны преимущества указанных способов сварки прежде всего повышение производительности за счет увеличения скорости сварки, проанализированы перспективы дальнейшего развития высокопроизводительных сварочных технологий.

В докладе Б. Пеккари «Прогресс в области сварочных технологий — важный фактор развития промышленности» приведены примеры применения сварки в судостро-

ении, при производстве ветряных электростанций и в автомобильной промышленности, характеризующиеся пониженным отрицательным влиянием на окружающую среду. Проанализирована ситуация в области обозначений (маркировки) сварочного оборудования и сварочных материалов, изготовители которых декларируют соблюдение требований по охране окружающей среды.

Следующая XI Международная сварочная выставка и 46-я Научно-техническая конференция в Катовице запланированы на 2005 г.

И. В. Кривцун, д-р техн. наук

УДК 621.791.002

ОБСУЖДЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ВСТРЕЧЕ УЧЕНЫХ НАН УКРАИНЫ С ЖУРНАЛИСТАМИ

За последние годы в результате различных причин значительно возросло количество конструкций, сооружений и других объектов, отработавших свой нормативный срок. По подсчетам специалистов, выработка оборудования и машин в отечественной промышленности превышает 52 %.

Вместе с тем расходы на ремонтные работы для поддержания имеющейся техники в рабочем состоянии сейчас в 6 раз превышают расходы на создание новой техники, что ведет к ускорению старения и выработки оборудования и сооружений. В нашей стране только на объектах базовых отраслей эксплуатируется более 35 млн т несущих металлических конструкций и более 250 тыс. м³ железобетонных конструкций, значительная часть которых тоже исчерпала свой ресурс.

Это лишь два типичных примера. В таком же, если не в худшем состоянии, находится значительное количество объектов тепло- и гидроэнергетики, магистральные трубопроводы, оборудование для нефте- и газодобывающей, нефтеперерабатывающей и химической промышленности, железнодорожные и автодорожные мосты, строительные металлические конструкции, комплексы жилья и объекты коммунальной собственности и др.

Что можно и нужно сделать для того, чтобы избежать возможных аварий и катастроф? Ответ на этот исключительно важный вопрос дает наука. По инициативе Президента НАН Украины академика Б. Е. Патона при Президиуме академии был создан Научно-координационный и экспертный совет по вопросам ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин, который он лично возглавляет. Совет организовал необходимые научные исследования по этой острой проблеме, привлек к ним другие научные организации Украины.

В октябре 2003 г. в конференц-зале состоялась встреча ведущих ученых НАН Украины с журналистами. Дискуссия была посвящена актуальной проблеме — технической



безопасности эксплуатации объектов народного хозяйства и вопросам определения их остаточного ресурса.

Человечество воздвигает сложные сооружения: мосты, туннели, трубопроводы, башни, атомные электростанции, линии электропередач, теплоэлектроцентрали и т. д. Многие объекты относятся к линейным системам: выход из строя одного звена ведет к остановке всего объекта и, как возможный результат, к техногенной катастрофе. Поэтому большое внимание в выступлениях было уделено вопросу оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса объектов народного хозяйства, играющих ключевую роль в жизнедеятельности общества.

О техническом состоянии и остаточном ресурсе конструкций и сооружений основных отраслей хозяйства в Украине, направлениях и результатах выполняемых научных исследований, научно обоснованных мероприятий, направленных на исправление ситуации, предотвращения техногенных аварий и катастроф журналистам рассказывали известные украинские ученые:

А. Г. Наумовец — член Президиума НАН Украины, академик НАН Украины



Л. М. Лобанов — заместитель директора ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, заместитель председателя Научно-координационного и экспертного совета по вопросам ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин при Президиума НАН Украины, академик НАН Украины

И. К. Походня — член Президиума НАН Украины, академик НАН Украины

В. В. Панасюк — директор Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАН Украины, академик НАН Украины

В. И. Похмурский — заместитель директора Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАН Украины, чл.-кор. НАН Украины

В. И. Кирьян — заведующий отделом ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, чл.-кор. НАН Украины

А. Я. Красовский — заведующий отделом Института проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, чл.-кор. НАН Украины

А. Я. Недосека — заведующий отделом ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, д-р техн. наук, проф.

А. И. Латух-Лященко — проф. кафедры «Мосты и туннели» Государственного транспортного ун-та, д-р техн. наук

В. М. Гордеев — первый заместитель председателя правления ВАТ УкрГНИИ «Проектстальконструкция», д-р техн. наук, проф.

В. С. Гиренко — ведущий научный сотрудник ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, д-р техн. наук

В. А. Ковтуненко — заведующий лабораторией ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, канд. техн. наук

С. Г. Поляков — ведущий научный сотрудник ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, д-р техн. наук

В своем 45-минутном докладе Л. М. Лобанов детально изложил сложившуюся ситуацию технического обслуживания и состояния объектов, а также рассказал о проводимых мероприятиях.

Состояние трубопроводов, мостов, туннелей и тепломагистралей может стать причиной техногенной катастрофы. Закончился срок эксплуатации от 20 до 80 % металлургических и железобетонных конструкций. Из 52,7 тыс. канализационных сетей 8,6 тыс. полностью изношены. Требуют ремонта 18 тыс. мостов и 800 млн м² жилья. В тяжелом состоянии оказался ряд объектов строительных металлоконструкций. Вследствие резкого спада производства металла и финансирования ремонтных работ отсутствует возможность замены существующих конструкций.

Были отмечены успехи науки в совершенствовании методов неразрушающего контроля, определения напряженно-деформированного состояния, диагностике сварных конструкций. Создаются новые системы непрерывного мониторинга (слежения) за состоянием объектов.

Журналистам был представлен хорошо оформленный фактический материал с результатами анализа состояния конструкций и объектов.

Большое внимание существующей проблеме уделяет недавно созданный Научно-координационный и экспертный Совет по вопросам ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин при Президиуме НАН Украины. Был подготовлен обзор по существующей проблематике и представлен на рассмотрение на

заседании Совета по национальной безопасности и обороне. По результатам заседания по поручению совета была подготовлена и утверждена концепция по безопасности, а также создается научно-техническая программа «Ресурс».

В завершение доклада было подчеркнуто, что, несмотря на существенные финансовые трудности, в целом поставленные правительством задачи будут выполнены.

В выступлении академика НАНУ И. К. Походни отмечалось, что несмотря на прогнозы футурологов о замене стальных конструкций на конструкции из пластмасс, композитов, легких металлов, сталь продолжает оставаться основным конструкционным материалом в народном хозяйстве и по крайней мере еще 50 лет будет таковым.

К последним достижениям науки можно отнести создание метода специальной термообработки корпусов атомных реакторов, исчерпавших свой ресурс. Применение данной термообработки позволяет восстановить пластические свойства радиационно охрупченного металла.

И. К. Походня также отметил о необходимости более полного освещения журналистами интенсивной работы отечественных ученых в области как науки в целом, так проблем, рассматриваемых на данной встрече. Большое внимание необходимо уделять кадровому вопросу — привлечению молодежи в науку. Академик И. К. Походня напомнил, что нынешние успехи в эксплуатации компьютерной техники были заложены еще более 30 лет назад академиком В. М. Глушковым при разработке и популяризации вычислительной техники.

В своем выступлении чл.-кор. НАН Украины В. И. Похмурский уделил внимание проблеме коррозии. Ранее в нашей стране в среднем производилось 1 т стали на 1 человека. Сейчас в связи с уменьшением ее производства и отсутствием возможности замены конструкций первостепенное внимание следует уделить проблеме защиты от коррозии. Необходимы новые нормативные регламентирующие документы в этой области. Необходимо финансирование для реализации государственной программы «Ресурс».

В. И. Похмурский отметил, что сегодня ощущается острый дефицит кадров по изучению влияния коррозии, так как технические специальности теперь менее престижны. Библиотечные фонды высших учебных учреждений крайне ограничено пополняются научной литературой и журналами различных стран мира. Для решения проблемы научного информационного голода институтом раз в два года проводится специализированная конференция и семинары.



Чл.-кор. НАН Украины А. Я. Красовский посвятил свой доклад развитию компьютерных систем мониторинга магистральных нефте-, газопроводов и представил иллюстрированный материал.

В. М. Гордеев в своем выступлении, в частности указал, что результатом неудовлетворительного состояния резервуарного парка конструкций являются коррозионные повреждения, неконтролируемые нагрузки, демонтаж элементов конструкций посторонними лицами, несвоевременная ликвидация дефектов.

А. И. Латух-Лященко отметил, что запас прочности существующих мостов является 3...6-кратным. Поэтому опасности катастроф не существует, однако вероятность аварий существует. Наибольшее беспокойство вызывает состояние мостов малых городов и сел. Они не подвергались обследованиям более десяти лет, поэтому информация об их состоянии отсутствует. Проблема оценки технического состояния мостовых сооружений также имеет организационный аспект — отсутствуют службы эксплуатации мостов, в частности инспекции мостов.

Украинские мосты находятся в неудовлетворительном техническом состоянии. 83 % мостов и путепроводов не соответствует требованиям современных норм относительно габаритов и грузоподъемности. В частности, опасная ситуация сохраняется в отношении четырех киевских мостов: Южного, Патона, Гаванского и Московского. Так, мост Патона, которому уже исполнилось 50 лет, был запроектирован на нагрузку в 10 тыс. автомобилей в сутки. Ныне она достигла уже 71 тыс. Мосты необходимо систематически исследовать и ремонтировать в местах, поврежденных коррозией. Сегодня эти работы практически не ведутся из-за недостатка средств.

В. В. Панасюк в своем выступлении отметил первостепенную роль отраслевого и регионального уровней принятой программы «Ресурс». Необходима подготовка нормативной базы и обучение специалистов по определению остаточного ресурса конструкций. Необходимы соответствующие законодательные акты.

В. И. Кирьян в своем выступлении указал на то, что если финансирование работ не будет, то техногенной катастрофы мы избежать не сможем.

Эксплуатируемые металлоконструкции можно разделить на две категории. Первую (меньшую) составляют те, которые уже сейчас не отвечают показателям безопасности, морально и физически устарели. Вторую — объекты, ресурс которых можно продлить, обследовав их и отремонтировав. Для многих объектов — газопроводов, АЭС — ресурс регламентирован. Если считается, что износ составляет 3 % в год, то значит через 30 лет объект попадает в разряд изношенных. Но проведенные сегодня исследования показали, что на многих объектах металл остался в том же состоянии, что и 30 лет назад. Коррозии подвержены лишь некоторые участки, которые и следует отремонтировать. Это обойдется дешевле, чем менять весь объект.

В. С. Гиренко отметил, что временные условия эксплуатации большой протяженности трудно воспроизводятся в лабораторных условиях. При определении остаточного ресурса речь идет о ресурсе по состоянию. Однако есть ряд вопросов, которые на данный момент не подлежат прогнозированию при эксплуатации объектов.

Таким образом, благодаря усилиям ученых определено истинное состояние потенциально опасных объектов Украины, разработаны эффективные рекомендации и методы определения их остаточного ресурса, т. е. сколько времени и при каких условиях возможна их дальнейшая эксплуатация. Ученые разработали конкретные предложения относительно продолжения безопасного функционирования указанных объектов. Выполнение данных мероприятий дает возможность предотвратить выход из строя ответственных объектов.

Работа сейчас за тем, чтобы настойчиво, быстро внедрять научные наработки. И здесь должны сказать свое слово и принять необходимые финансовые и организационные меры властные структуры на общегосударственном и местном уровнях.

А. Ю. Бондаренко, инж.

МЕЖДУНАРОДНЫЕ И НАЦИОНАЛЬНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ В ОБЛАСТИ СВАРКИ И РОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В 2004 г.

Дата	Город, страна	Тематика	Контактный адрес
04-05.02	Фельбах, Германия	Конференция «Электронные узлы — конструирование и соединение»	DVS Дюссельдорф тел. 49 211/15910
10-13.02	Мюнхен, Германия	32-я специализированная конференция «Сварка в строительстве и резервуаростроении»	SLV, München, Schachenmeisterstrasse 17, D-80636 München
17-19.03	Москва, Россия	3-я Международная выставка и конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности — 2004»	www.exponet.ru/exhibitions/by-id/ ndtmo/ndtmo2004/patricipation.ru.html
22-26.03	Париж, Франция	Выставка «Промышленность-2004» (станки, детали, системы передач, автоматы, инструменты, сварка, измерительное оборудование, управление, промышленная термообработка)	UNDUSTRIE 2004 EXPOSIUM 1, rue du Parc 92593 LEVALLOIS-PERET Cede, France
23-25.03	Мадрид, Испания	15-я Международная сессия по сварке	C/Gabimo Jimeno, 5B-E-28026 Madrid tel. +34-914758307; Fax: +34-915005377 E-mail: cesol@cesol.es
30.03-03.04	Пермь, Россия	3-я Международная выставка технологий «Станки. Приборы. Инструмент. Металлообработка. Сварка-2004»	www.exponet.ru/exhibitions/by-id/ instrumentpm/instrumentpm2004/ patricipation.ru.html
06-07.04	Минск, Беларусь	Шестая международная научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка»	220071, Беларусь, г. Минск, ул. Платонова, 41. НПК порошковой металлургии тел. (017) 2399846; факс: (017) 2100574
06-09.04	Челябинск, Россия	8-я Специализированная выставка «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Инструмент-2004»	www.exponet.ru/exhibitions/by-id/ machinerchel/machinerchel2004/ patricipation.ru.html
08-11.04	Киев, Украина	Международная выставка «Примус: машиностроение и металлообработка»	«Примус-Украина» Тел. (044) 2417944, 5649861
19-24.04	Ганновер, Германия	Международная многоотраслевая выставка «Hannover Fair 2004»	Тел./факс: (+38044) 5733040
20-23.04	Киев, Украина	Международная выставка «Сварка Украины-2004» со специализированной экспозицией «Инженерия поверхности»	Торговый Дом «Сварка» Тел. (044) 2519376, 2519184
10-12.05	Осака, Япония	Международная конференция по напылению (ITSC-2004)	DVS, Aachener Str. 172 40223 Düsseldorf, Germany tel. +49(0)211/1591-302/-303 fax: +49(0)211/1591-300 E-mail: tagungen@dvs-hg.de
11-14.05	Вена, Австрия	5-я Европейская конференция по сварке и резке	Klaus Wichart Schweisstechnische, Zentrolanstalt Arsenal, Obj 207-1030, Wien Austria
17-20.05	Пермь, Россия	Всероссийская с международным участием конференция «Сварка и контроль-2004»	Пермский ГТУ тел. (73422) 198076, 198020; факс: 198275, 198231 E-mail: svarka@pstu.ac.ru
17-20.05	Запорожье, Украина	Международная выставка «Машиностроение/Металлургия 2004», Международный научно-технический семинар «Прогрессивные технологии в машиностроении»	Запорожское ТПП тел. (0612) 135167, 135027
17-21.05	Донецк, Украина	4-я Международная конференция «Водородная обработка материалов» ВОМ-2004	ДонНТУ, ул. Артема, 58, Донецк 83000, Украина тел. ++38-062-305-02-35 факс ++38-062-304-12-78 E-mail: goltsov@physics.dgtu.donetsk.ua
25-28.05	Санкт-Петербург, Россия	11-я Международная специализированная выставка по сварке и родственным технологиям «Сварка-2004»	Институт сварки России 194100, Санкт-Петербург, ул. Литовская, 10 тел./факс: (812) 245-01-02 E-mail: office@rusweld.spb.ru ОАО «Ленэкспо», 199106, Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., 103 тел. (812) 321-26-31
Май	Киев, Украина	Научно-практический семинар «Прогрессивные технологии сварки в промышленности»	ИЭС им. Е. О. Патона Тел./факс: 38(044) 5733040
31.05-04.06	Ялта, Украина	4-я Международная конференция «Композиционные материалы в промышленности»	Тел./факс: 38(044) 5733040
15-17.06	Аахен, Германия	7-й Международный коллоквиум «Твердо- и высоко-температурная пайка и диффузионная сварка»	DVS, Düsseldorf Tel. 49211/15910

Дата	Город, страна	Тематика	Контактный адрес
15-18.06	Н. Новгород, Россия	Международная выставка «Сварка-2004»	Нижегородская Ярмарка тел. (+8312) 775880, 775589
11-16.07	Осака, Япония	57-я Ассамблея МИС — Международное сварочное шоу в Японии	Hosted by Japan Institute of Welding 1-11, Kanda-Sakumacho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0025 Japan Phone +81-3-3257-1522, Fax:+81-3-3255-5196
15-16.07	Осака, Япония	Международная конференция «Тенденции и перспективы развития технологий сварки для транспорта, наземной, морской и космической техники»	Web: http://www.jwes.pr.jp/ E-mail (General Information) iiv2004@jwes.or.jp E-mail (Travel Information) uchiyanama@hei.hankyu.co.jp
06-10.09	Ариэль, Израиль	Международная конференция «Математические и компьютерные технологии производства материалов (ММТ-2004)	Тел. +972-3-9066217, факс: +972-3-9066234
13-17.09	пос. Кацивели Крым, Украина	2-я Международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»	ИЭС им. Е. О. Патона тел. (38044) 261 56 80, 269 26 23; факс: 227 65 57 E-mail: d34@pwi.relc.com
19-22.09	Москва, Россия	3-я Специализированная выставка «ЭлектроТехно-Экспо», «Сварка и родственные технологии»	ВК «Майер Джей Экспо», Москва, Люсиновская ул., 36 тел./факс: (095) 363 50 32, E-mail: electro@mayer.ru при поддержке Института сварки России
19-22.09	Остенд, Бельгия	Международная конференция «Высокоазотистые стали 2004»	BE-2018 Antwerp Belgium tel. +32 3 260 08 40, fax: +32 3 216 06 89 E-mail: info@hns2004.com www.hns2004.com
20-23.09	Волгоград, Россия	Международная конференция «Новые перспективные материалы и технологии их получения (НПМ) — 2004»	Тел./факс: +7(8442) 34 99 41 E-mail: weld@vstu.ru ; www.vstu.ru
20-24.09	Ялта, Украина	20-я Международная конференция «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»	Тел./факс: 38 (044) 573 30 40
22-24.09	Магдебург, Германия	Конференция DVS по сварочной технике	DVS Дюссельдорф тел. 49211 / 15910
05-08.10	Москва, Россия	Международная специализированная выставка сварочных материалов, оборудования и технологий «Рос-сварка»	Тел./факс: +7(095) 1053486 E-mail: kna@mvk.ru
26-30.10	Ганновер, Германия	18-я Международная технологическая ярмарка-выставка по обработке листов «Евролист»	Хатфилд, Англия Forum Place AL 10 ORN
02-05.11	Москва, Россия	Ежегодная международная выставка «Экспосварка 2004»	Фирма MSI тел. 7095 105 63 61 www.msixpo.ru
02-05.11	Уфа, Россия	Сварка. Реновация. Контроль-2004	БашЭКСПО тел. +7(3472) 534108, 534109
03-07.11	Екатеринбург, Россия	Специализированная с международным участием выставка-конференция «Сварка»	E-mail: vystavka@r66.ru Роман Калашников тел./факс: (3432) 701 795, 701 796, 703 374 www.uv2000.ru
16-19.11	Санкт-Петербург, Россия	5-я Международная выставка «Электроэффективная техника и технологии-2004»	www.exponet.ru/exhibitions/by-id/saveenergy/saveenergy2004/patricipation.ru.html