

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Главный редактор  
**Б. Е. ПАТОН**

Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,  
А. Т. Зельниченко, А. Я. Ищенко,  
В. И. Кирьян, И. В. Кривцун,  
С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),  
Ю. Н. Ланкин,  
В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),  
Л. М. Лобанов, А. А. Мазур,  
В. И. Махненко, О. К. Назаренко,  
В. Д. Позняков,  
И. К. Походня, И. А. Рябцев,  
Б. В. Хитровская (отв. секр.),  
В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

Н. П. Алешин (Россия)  
Гуань Цяо (Китай)  
У. Дилтай (Германия)  
А. С. Зубченко (Россия)  
В. И. Лысак (Россия)  
Н. И. Никифоров (Россия)  
Б. Е. Патон (Украина)  
Я. Пиллярчик (Польша)  
Г. А. Туричин (Россия)  
Чжан Янмин (Китай)  
Д. фон Хофе (Германия)

**УЧРЕДИТЕЛИ:**

Национальная академия наук Украины,  
ИЭС им. Е. О. Патона,  
МА «Сварка»

**ИЗДАТЕЛЬ:**  
МА «Сварка»

Адрес редакции:

03680, Украина, Киев-150,  
ул. Боженко, 11  
Институт электросварки  
им. Е. О. Патона НАНУ  
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277  
Факс: (38044) 200 5484, 200 8277  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj  
URL: www.rucont.ru

**Редакторы:**

Е. Н. Казарова, Т. В. Юштина  
Электронная верстка:  
И. Р. Наумова, А. И. Сулима

Свидетельство о государственной  
регистрации КВ 4788  
от 09.01.2001

**Журнал входит в перечни  
утвержденных ВАК Украины  
и Российской Федерации изданий  
для публикации трудов  
соискателей ученых степеней**

За содержание рекламных  
материалов редакция журнала  
ответственности не несет

Цена договорная

**СОДЕРЖАНИЕ**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

*Кирьян В. И., Дворецкий В. И., Мальгин М. Г.* Расчет локальных напряжений в зонах сварных соединений крупногабаритных пространственных конструкций ..... 3

*Терновой Е. Г., Бондарев А. А.* Электронно-лучевая сварка толстостенных обечаек из алюминиевых сплавов АМг6 и М40 ..... 8

*Харченко Г. К., Устинов А. И., Фальченко Ю. В., Петрушинец Л. В., Григоренко С. Г., Костин В. А., Гуриенко В. П.* Диффузионная сварка в вакууме интерметаллидного сплава  $\gamma$ -TiAl со сталью 12X18H10T ..... 15

*Лукашенко А. Г., Мельниченко Т. В., Лукашенко Д. А.* Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали модулированным излучением ..... 19

*Олабоде М., Ках П., Мартикайнен Дж.* Металлургические особенности сварки высокопрочного алюминиевого сплава 7025-T6 ..... 24

*Борисова А. Л., Борисов Ю. С., Астахов Е. А., Мурашов А. П., Бурлаченко А. Н., Цымбалистая Т. В.* Теплозащитные свойства газотермических покрытий, содержащих квазикристаллический сплав системы Al-Cu-Fe ..... 36

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ**

*Патон Б. Е., Калеко Д. М., Булацев А. Р., Шулым В. Ф.* Конденсаторная приварка шпилек в вакууме ..... 42

*Полещук М. А., Матвеев И. В., Бовкун В. А.* Области применения магнитно-импульсной сварки (Обзор) ..... 47

*Пантелеймонов Е. А.* Оборудование для термообработки сварных соединений трубопроводов ..... 53

*Знаменательные даты*

Теория и технология сварки под флюсом ..... 57

**ХРОНИКА**

Семинар технологов-машиностроителей ..... 59

17-я Международная научно-техническая конференция «Леотест-2012» ..... 62

**ИНФОРМАЦИЯ** ..... 63

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief  
**B. E. PATON**

Yu. S. Borisov, G. M. Grigorenko,  
A. T. Zelnichenko,  
A. Ya. Ishchenko, I. V. Krivtsun,  
S. I. Kuchuk-Yatsenko (vice-chief ed.),  
V. I. Kiryan, Yu. N. Lankin,  
V. N. Lipodaev (vice-chief ed.),  
L. M. Lobanov, A. A. Mazur,  
V. I. Makhnenko,  
O. K. Nazarenko, I. K. Pokhodnya,  
V. D. Poznyakov, I. A. Ryabtsev,  
B. V. Khirovskaia (exec. secr.),  
V. F. Khorunov, K. A. Yushchenko

THE INTERNATIONAL  
EDITORIAL COUNCIL:

N. P. Alyoshin (Russia)  
D. von Hofe (Germany)  
Guan Qiao (China)  
U. Dilthey (Germany)  
A. S. Zubchenko (Russia)  
V. I. Lysak (Russia)  
N. I. Nikiforov (Russia)  
B. E. Paton (Ukraine)  
Ya. Pilarczyk (Poland)  
G. A. Turichin (Russia)  
Zhang Yanmin (China)

FOUNDERS:

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

PUBLISHER:

International Association «Welding»

Address of Editorial Board:

11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine  
Tel.: (38044) 200 63 02, 200 82 77  
Fax: (38044) 200 54 84, 200 82 77  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj  
URL: www.rucont.ru

Editors:

E. N. Kazarova, T. V. Yushina  
*Electron galley:*

I. R. Naumova, A. I. Sulima

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

- Kiryan V. I., Dvoretzky V. I., Malgin M. G.* Calculation of local stresses in zones of welded joints of large-size three-dimensional structures ..... 3
- Ternovoy E. G., Bondarev A. A.* Electron beam welding of thick-wall shells of aluminium alloys AMg6 and M40 ..... 8
- Kharchenko G. K., Ustinov A. I., Falchenko Yu. V., Petrushinets L. V., Grigorenko S. G., Kostin V. A., Gurienko V. P.* Diffusion vacuum welding of intermetallic alloy  $\gamma$ -TiAl with steel 12Kh18N10T ..... 15
- Lukashenko A. G., Melnichenko T. V., Lukashenko D. A.* Laser welding of thin-sheet stainless steel using modulated radiation ..... 19
- Olabode M., Kakh P., Martikainen J.* Metallurgical peculiarities of welding of high-strength aluminium alloy 7025-T6 ..... 24
- Borisova A. L., Borisov Yu. S., Astakhov E. A., Murashov A. P., Burlachenko A. N., Tsymbalistaya T. V.* Heat protective properties of thermal coatings, containing quasi-crystalline alloy Al-Cu-Fe ..... 36

### INDUSTRIAL

- Paton B. E., Kaleko D. M., Bulatsev A. R., Shulym V. F.* Capacitor welding-in of studs in vacuum ..... 42
- Poleshchuk M. A., Matveev I. V., Bovkun V. A.* Fields of application of magnetic-pulse welding (Review) ..... 47
- Panteleymonov E. A.* Equipment for heat treatment of welded joints of pipelines ..... 53

### Remarkable dates

- Theory and technology of submerged arc welding ..... 57

### NEWS

- Seminar of technologists-mechanical engineers ..... 59
- Seventeenth International Scientific and Technical Conference «LEOTEST-2012» ..... 62

- INFORMATION ..... 63

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.



## РАСЧЕТ ЛОКАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНАХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Чл.-кор. НАН Украины **В. И. КИРЬЯН, В. И. ДВОРЕЦКИЙ**, д-р техн. наук, **М. Г. МАЛЬГИН**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработан подход к расчету локальных напряжений в зонах сварных соединений конструкций, основанный на введении в расчетную модель абсолютно жестких тел (АЖТ) в виде плоских сечений. Согласно гипотезе плоских сечений АЖТ обеспечивает адекватную передачу внешних силовых воздействий от одной модели фрагмента к другой и позволяет исследовать локальное распределение напряжений в зоне сварных соединений с учетом пространственной работы всей конструкции, что дает качественно новый инструмент для учета эксплуатационной нагруженности элементов при оценке усталостной долговечности.

*Ключевые слова:* крупногабаритные пространственные конструкции, сварные соединения, локальное напряжение, метод конечных элементов, конечно-элементная модель, абсолютно жесткое тело, расчет

При определении уровня и повторяемости напряжений в сварных узлах весьма важно учитывать пространственную работу конструкции. Основным методом пространственного расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) узлов и элементов конструкций является метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет аппроксимировать любое деформируемое тело моделью, состоящей из определенного типа конечных элементов (КЭ). С математической точки зрения расчет сводится к решению систем уравнений равновесия, совместности деформаций и физических уравнений.

При расчетной оценке НДС сварных узлов необходимо адекватно отобразить характер взаимодействия элементов в зонах конструктивных концентраторов с геометрией сварных соединений. Поэтому необходимо аппроксимировать всю конструкцию трехмерными КЭ. Производить расчеты с такой подробной аппроксимацией всех узлов и элементов весьма сложно. Такие расчеты требуют применения мощной вычислительной техники и выполняются в исключительных случаях. В общепринятой инженерной практике расчет локальных напряжений в сварных узлах металлоконструкций промышленных зданий и инженерных сооружений связан с их расчленением на отдельные фрагменты и поэтапным рассмотрением НДС [1]. Вначале сварную конструкцию рассматривают как стержневую модель с заданными нагрузками и условиями закрепления. Затем из стержневой модели всей конструкции выделяют фрагмент с исследуемым сварным узлом и представ-

ляют его оболочечными КЭ. После расчета фрагмента из оболочечных КЭ выделяют сварной узел, который представляют трехмерными КЭ. Расчет последнего дает объемное распределение НДС каждого входящего в него конструктивного элемента. В таких случаях принципиальной и довольно непременной в реализации является необходимость установления при переходе от одной расчетной модели фрагмента к другой (с более сложной аппроксимацией) граничных условий в виде узловых связей и внешних силовых воздействий, полученных при расчете НДС предыдущего фрагмента. Сложность возрастает в случае работы конструкции при переменном нагружении, приводящем к изменению характера взаимодействия конструктивных элементов сварных узлов. Чтобы адекватно отразить влияние внешних переменных воздействий на НДС в анализируемых точках сварного узла при разных схемах нагружения, для каждой расчетной модели фрагмента требуется разрабатывать новые граничные условия. Это затрудняет расчет конструкций, анализ уровня и характера изменения напряжений в отдельных элементах сварного узла при одинаковых исходных положениях (назначения расчетных характеристик, расчетных нагрузок и критерия их сравнения).

Вместе с тем в расчетах строительных конструкций, в частности железобетонных, используется такой КЭ, как абсолютно жесткое тело (АЖТ), позволяющий создавать жесткую связь между моделями фрагментов, состоящих из разных типов КЭ [2, 3]. Его используют для передачи информации о НДС от одной части модели конструкции к другой. При этом в качестве АЖТ применяют один из конструктивных (связующих) элементов, в результате чего вся конструкция рассматривается в виде единой расчетной модели. Идея применения АЖТ в виде конструктивных элементов вполне удачна и хорошо отработана

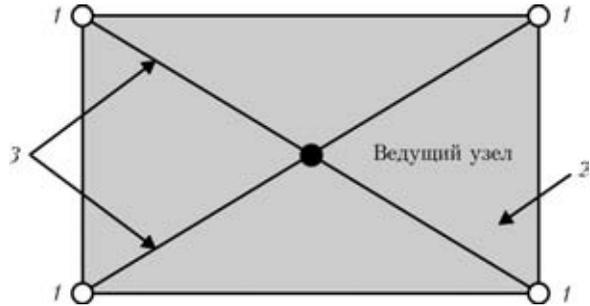


Рис. 1. Схема АЖТ: 1 — ведомый узел; 2 — АЖТ; 3 — жесткая связь между узлами (радиус-вектор)

при довольно простых формах сопряжения: объединение модели колонны промышленных зданий с моделью плиты перекрытия из пластинчатых КЭ; объединение стержневых моделей ребер балок мостовых конструкций с плитой проезжей части из пластинчатых КЭ и т. д. Однако при оценке НДС сварных узлов применять АЖТ в виде конструктивного элемента затруднительно, так как само сопряжение (сварной узел) подлежит исследованию.

Поскольку деформация напряженных элементов сварных конструкций вполне удовлетворительно подчиняется гипотезе плоских сечений, при каждом переходе от одной расчетной модели фрагмента к другой наиболее рационально вводить АЖТ не в виде конструктивного элемента, а как плоское АЖТ — сечение конструктивного элемента последующей модели. При соблюдении определенных условий взаимодействия АЖТ в виде плоского сечения с моделями фрагментов представляется возможным с использованием МКЭ производить расчеты локальных напряжений в сварных узлах конструкций любой сложности, адекватно передавая наследственную информацию о НДС от одной расчетной модели к другой с учетом особенностей нагружения. При использовании АЖТ в виде плоского сечения во взаимосвязи с гипотезой плоских сечений важно обеспечить выполнение двух основных условий: ведущие узлы предыдущей модели и ведомые узлы

последующей модели лежат в одной плоскости; взаимодействие ведущего узла с ведомым принимается таковым, при котором сохраняется закономерность поведения конструктивных элементов. При этом перемещения  $u_s$  и углы поворота  $\theta_s$  каждого ведомого узла связываются через радиус-вектор  $\rho_{m-s}$  (рис. 1) с перемещениями  $u_m$  и углами поворота  $\theta_m$  ведущего узла следующей зависимостью:

$$\begin{pmatrix} u_s \\ \theta_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_m + \theta_m \rho_{m-s} \\ \theta_m \end{pmatrix}$$

В данной работе предлагается методика расчета локальных напряжений в зонах сварных соединений крупногабаритных пространственных конструкций с использованием АЖТ. В рамках предлагаемой методики вводятся такие понятия, как фрагмент и узел конструкции. Фрагментом является любая часть конструкции, включающая узел. В качестве узла принимается та часть конструкции (фрагмента), в которой сказывается взаимовлияние конструктивных элементов на его НДС. Для анализа действительной работы исследуемого сварного узла с использованием стандартной библиотеки КЭ создается единая пространственная КЭ модель всей конструкции с заданной точностью аппроксимации принятых конструктивных форм. По этой модели с учетом пространственного взаимодействия конструктивных элементов исследуется НДС сварного узла на основе последовательного рассмотрения моделей с разными типами КЭ (рис. 2, А–В): стержневой конструкции; оболочечной фрагмента; трехмерной узла.

На первом этапе рассматривается стержневая модель, в которой несущие элементы конструкции аппроксимируются стержневыми КЭ с соответствующими жесткостными характеристиками. По результатам ее расчета определяются усилия во всех элементах. На втором этапе стержневые КЭ в исследуемых местах конструкции заменяются трехмерной моделью фрагмента.

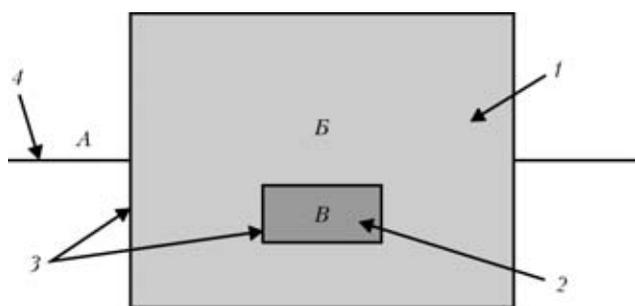


Рис. 2. Схема расчетной модели конструкции с АЖТ для расчета локальных напряжений в сварных узлах по предлагаемой методике: 1 — оболочечная модель фрагмента конструкции; 2 — трехмерная модель сварного узла; 3 — АЖТ; 4 — стержневая модель конструкции

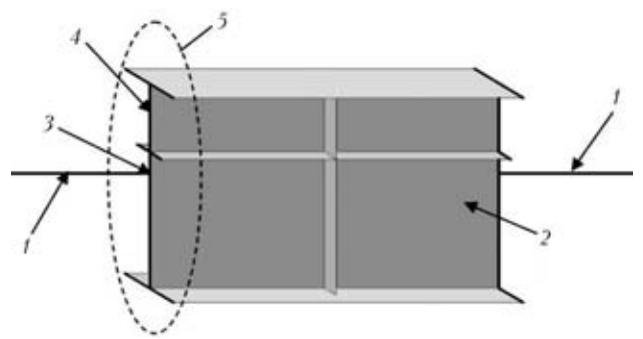


Рис. 3. Схема введения АЖТ между стержневой и оболочечной моделями: 1 — стержневые КЭ; 2 — оболочечная модель фрагмента конструкции; 3 — центр тяжести сечения; 4 — АЖТ; 5 — сечение конструктивного элемента оболочечной модели фрагмента

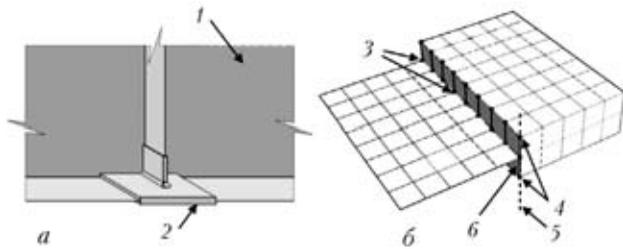


Рис. 4. Замена оболочечных КЭ трехмерной моделью (а) и введение АЖТ между оболочечными и трехмерными КЭ (б): 1 — оболочечная модель фрагмента конструкции; 2 — трехмерная модель узла; 3 — ведущие узлы; 4 — ведомые узлы; 5 — грань с ведущим и ведомыми им узлами; 6 — АЖТ

Для адекватной передачи мембранных и изгибных усилий через АЖТ от стержневой модели А к оболочечной модели фрагмента В (см. рис. 2) ведущий узел вводится стержневым КЭ и располагается в центре тяжести сечения прилегающего конструктивного элемента фрагмента с оболочечной аппроксимацией, а ведомые узлы — оболочечным КЭ (см. рис. 3).

На третьем этапе в местах исследуемого сварного узла В (см. рис. 2) оболочечные КЭ заменяются моделью узла с трехмерной КЭ аппроксимацией (рис. 4, а). Здесь передача мембранных и изгибных усилий через АЖТ от оболочечной модели фрагмента В к трехмерной модели сварного узла В (см. рис. 2) обеспечивается вследствие совпадения срединной поверхности оболочечных КЭ с нейтральной линией сечения трехмерной модели. Ведущие узлы задаются оболочечным КЭ, а ведомые — трехмерным КЭ. Ведущий и ведомые узлы принадлежат грани КЭ последующей модели (рис. 4, б).

Так, построенная расчетная модель конструкции с АЖТ обеспечивает адекватную передачу внешних силовых воздействий от фрагмента к фрагменту и дает возможность исследовать локальное распределение напряжений в зоне сварных соединений с учетом пространственной работы конструкции. Ее применение значительно упрощает анализ действительной работы сварных узлов конструкций с учетом взаимодействия входящих в него конструктивных элементов при воз-

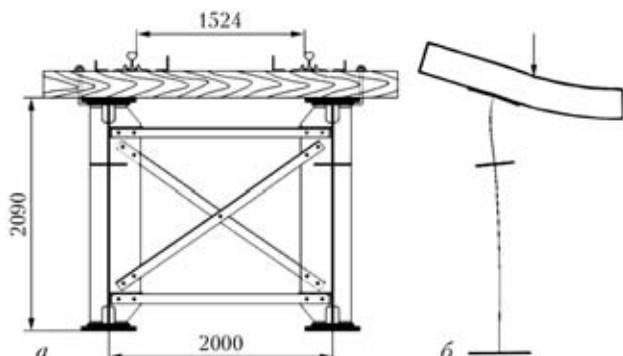


Рис. 5. Поперечное сечение сварного пролетного строения моста (а) и деформация его стенки из плоскости (б)

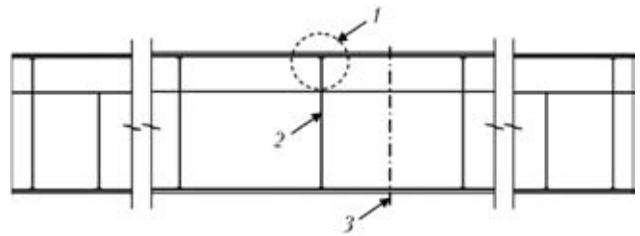


Рис. 6. Расположение исследуемого сварного узла: 1 — исследуемый сварной узел; 2 — поперечное ребро; 3 — середина пролета

действию переменной нагрузки, например обрабатывающейся. Тем самым методика дает качественно новый инструмент для анализа и учета эксплуатационной нагруженности сварных узлов при оценке усталостной долговечности конструкций, работающих в условиях переменных воздействий.

При эксплуатации пролетных строений мостов наиболее проблемными являются сварные узлы, подвергаемые непосредственному воздействию транспортных средств [4]. Их сопротивление усталости в значительной мере зависит от особенностей взаимодействия элементов с учетом приложения сосредоточенных нагрузок. Поэтому для обоснования и оценки эффективности предлагаемой методики выполнялся расчет НДС сварного узла типового цельносварного пролетного строения железнодорожного моста.

Пролетное строение состоит из двух сварных главных балок пролетом 27 м, объединенных в пространственную конструкцию системой продольных и поперечных связей (рис. 5, а). Высота главных балок составляет 2,09 м, расстояние между их осями — 2 м. Стенки балок подкреплены поперечными ребрами жесткости с шагом 2 м, а также продольными ребрами жесткости по всей длине пролета. Мостовое полотно расположено на деревянных поперечинах.

Важное влияние на формирование НДС пролетного строения оказывает прохождение каждой оси подвижной нагрузки, что в свою очередь вызывает изменение местного взаимодействия элементов. Помимо основного изгиба главных балок, возникает кручение верхнего пояса и деформация стенки из ее плоскости в отсеках (рис. 5, б), а также местный изгиб элементов в зоне попереч-

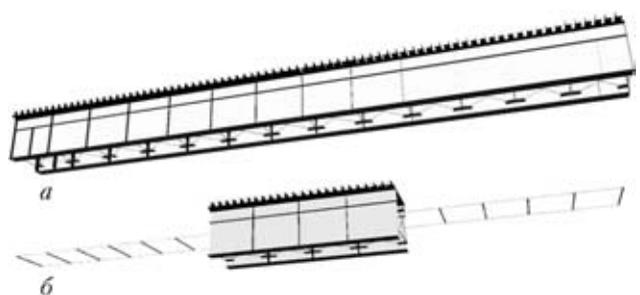


Рис. 7. Расчетные модели цельносварного пролетного строения (пояснения в тексте)

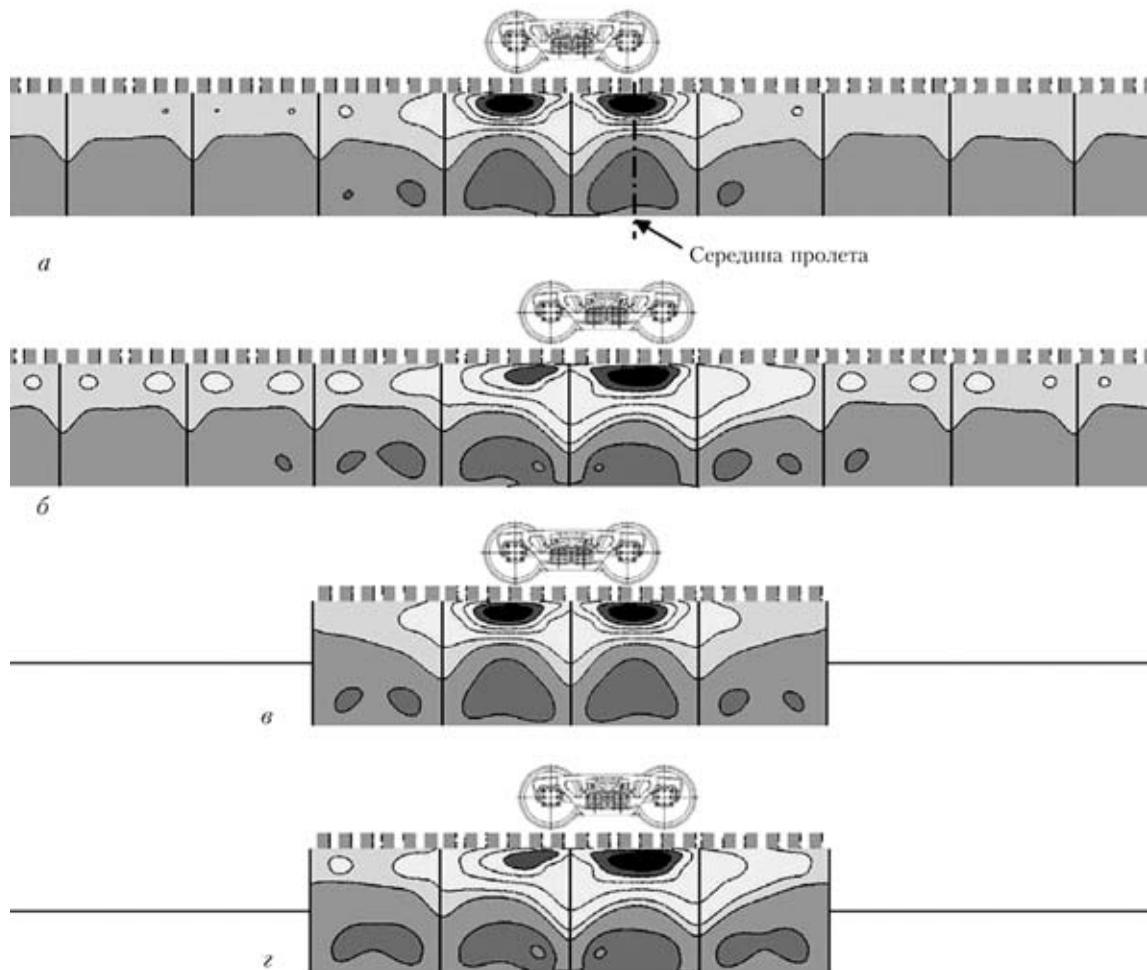


Рис. 8. Изополя поперечных перемещений вертикальной стенки в отсеках по первой (а, б) и второй (предлагаемой) модели (в, г)

ных ребер. Местное взаимодействие элементов существенно изменяется в зависимости от положения подвижной нагрузки. Поэтому при расчете на усталость сварных узлов необходимо учитывать особенности характера изменения, количества и повторяемости воспринимаемых переменных воздействий.

В качестве верификационного расчета для обоснования предложенных положений методики сопоставляли НДС элементов сварного узла приварки поперечных ребер в средней части пролета (рис. 6) по двум расчетным моделям с учетом различного положения тележки грузового вагона. Первая модель аппроксимировала несущие элементы конструкции оболочечными КЭ по всей длине пролета (см. рис. 7, а), а вторая составлялась по предлагаемой методике (см. рис. 7, б).

При анализе формирования НДС пролетного строения по результатам численного расчета первой модели отмечена выраженная зависимость характера взаимодействия элементов конструкции от положения подвижной нагрузки. Прохождение оси тележки над смежными отсеками существенно влияет на перераспределение НДС стенки. При симметричном положении тележки относительно поперечного ребра возникает симметричное де-

формирование стенки в отсеках, смежных с исследуемым сварным узлом (рис. 8, а). В верхних частях стенки образуются максимальные поперечные деформации одного знака, а в нижней — другого. Это соответствует S-образной форме поперечного изгиба стенки из плоскости. При этом элементы сварного узла имеют свой вполне определенный вид нагружения. С приближением оси тележки к поперечному ребру начинается перераспределение НДС, что приводит к асимметрии деформирования стенки (рис. 8, б). Нагруженность элементов узла изменяется. По результатам исследования закономерностей изменения НДС стенки в смежных отсеках при прохождении нагрузки установлено, что для отображения адекватной нагруженности сварного узла необходимо проанализировать фрагмент, включающий четыре отсека.

Сопоставление результатов расчета по первой и второй моделям (рис. 8) показало, что закономерности формирования НДС в рассматриваемых отсеках по характеру и уровню практически совпадают. На границах фрагмента НДС может несколько отличаться, вместе с тем это никак не сказывается на результатах анализа исследуемого узла. Таким образом, для определения действитель-

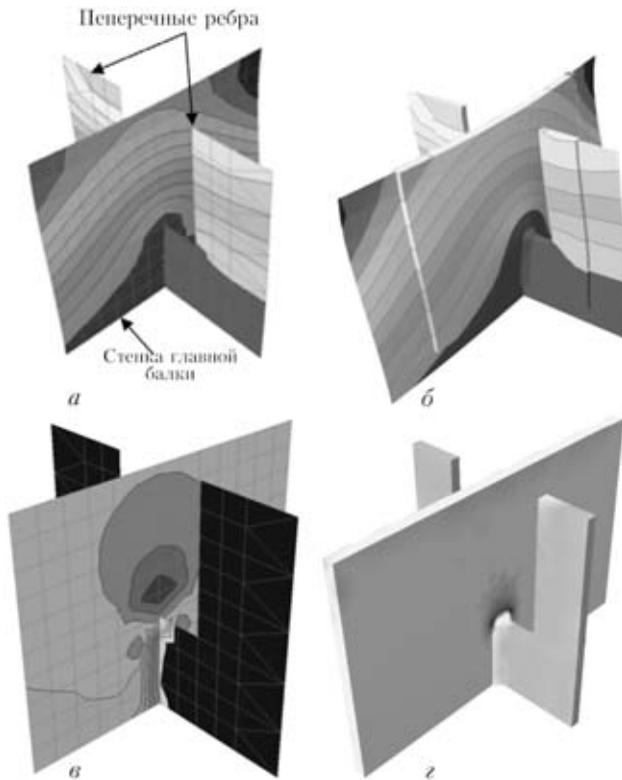


Рис. 9. НДС в зоне обрыва сварного шва, выполненного для прикрепления поперечного ребра к стенке пролетного строения: а, б — изополя поперечных перемещений элементов в оболочечной и трехмерной моделях; в, г — распределение местных напряжений на наружной поверхности стенки главной балки соответственно в оболочечной и трехмерной моделях

ной работы сварных узлов пролетных строений вполне достаточно выполнять детальную аппроксимацию лишь того фрагмента, в котором располагается исследуемый сварной узел.

Равнозначность оценки НДС стенки в исследуемых отсеках по обоим моделям позволила сделать сравнительный анализ формирования НДС в зоне обрыва сварного шва, выполненного для прикрепления поперечного ребра к стенке. По результатам расчета установлено, что трехмерная

модель имеет адекватную нагруженность через АЖТ в виде плоского сечения, о чем свидетельствует сходство перемещений (рис. 9, а, б). Вместе с тем характер распределения местных напряжений в моделях существенно отличается. Локальные напряжения в зоне сварного шва в трехмерной модели более полно отражают ее фактическое состояние (рис. 9, г). Поэтому при оценке эксплуатационной долговечности пролетных строений анализ характера изменения локального НДС сварных узлов по трехмерной модели предпочтительнее.

Таким образом, введение АЖТ в виде плоского сечения, связывающего в единой расчетной модели конструкции фрагменты из разнотипных КЭ, значительно упрощает анализ действительной работы сварных узлов с учетом пространственного взаимодействия входящих в него конструктивных элементов в условиях переменного нагружения. АЖТ во взаимосвязи с гипотезой плоских сечений обеспечивает адекватную передачу внешних силовых воздействий от одной модели фрагмента к другой и дает возможность исследовать локальное распределение напряжений в зоне сварных соединений с учетом пространственной работы всей конструкции. Это дает качественно новый инструмент для учета эксплуатационной нагруженности элементов при оценке усталостной долговечности металлоконструкций различного назначения.

1. *Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности* / В. А. Винокуров, С. А. Куркин, Г. А. Николаев / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1996. — 576 с.
2. *Городецкий А. С., Евзеров И. Д. Компьютерные модели конструкций.* — Киев: Факт, 2007. — 394 с.
3. *Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа.* — М.: ДМК Пресс, 2007. — 600 с.
4. *Лучко Й. Й., Сулим Г. Т., Кир'ян В. І. Механіка руйнування мостових конструкцій та методи прогнозування їх залишкової довговічності* / За ред. Й. Й. Лучка. — Львів: Каменяр, 2004. — Т. 6. — 883 с.

An approach to calculation of local stresses in zones of welded joints on structures has been developed. The approach is based on introducing absolutely rigid bodies (RB) in the form of plane sections into the calculation model. According to the plane sections hypothesis, RB provides an adequate transfer of the external force effects from one fragment model to the other, and permits the local distribution of stresses in the zones of the welded joints to be investigated by taking into account the spatial operation of the entire structure, thus providing a qualitatively new tool to allow for service loading of elements in evaluation of fatigue life.

Поступила в редакцию 14.12.2011



## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА ТОЛСТОСТЕННЫХ ОБЕЧАЕК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ АМГ6 И М40

Е. Г. ТЕРНОВОЙ, инж., А. А. БОНДАРЕВ, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты исследований по электронно-лучевой сварке полуфабрикатов из алюминиевых сплавов АМГ6 и М40 толщиной 40...90 мм. Выбраны оптимальные режимы сварки, изучены свойства, микроструктурные особенности и твердость полученных соединений для горизонтальных и вертикальных швов. Разработана технология электронно-лучевой сварки при изготовлении крупногабаритных толстостенных обечаек из алюминиевых сплавов, прошедшая промышленную проверку.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, алюминиевые сплавы, обечайки, продольные и кольцевые соединения, режимы сварки, свойства соединений, твердость, микроструктура, промышленная проверка

Сопоставление технологических возможностей известных способов сварки плавлением показало, что наиболее перспективной при изготовлении крупногабаритных обечаек из алюминиевых сплавов больших толщин является электронно-лучевая сварка (ЭЛС) [1, 2]. Для получения необходимых свойств соединений при ЭЛС следует задавать оптимальные параметры режима, размеры и геометрию зоны проплавления, размеры зоны разупрочнения и др. [3–9].

При ЭЛС сплавов АМГ6 и М40 возможно снижение содержания элементов с высокой упругостью пара в металле шва, что приводит к снижению прочностных характеристик, образованию пористости и трещин в металле шва и околшовоной зоне [10–14]. При этом авторы работ [1, 2, 5, 9] рекомендуют горизонтальное расположение электронного пучка, что способствует значительному снижению дефектов в металле шва.

Целью данной работы является разработка и промышленная проверка технологии ЭЛС кольцевых и продольных стыков обечаек из алюминиевых сплавов АМГ6 и М40 толщиной 40...90 мм, обеспечивающей заданные размеры зоны проплавления, формирование двухстороннего валика усиления и высокие свойства соединений по всей толщине стыка.

При выборе параметров режима, уровня заглупления фокального пятна и рабочего расстояния для максимального проплавления выполняли сварку образцов из сплавов АМГ6 и М40 с сквозным проплавлением без сканирования пучка. Длина образцов составляла 500 мм, толщина — 40 мм. Образцы сваривали от источника питания ЭЛА 60/60 на установке УЛ-179 при остаточном давлении в камере  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па. Скорость сварки устанавливали на всех режимах постоянной, рав-

ной 36 м/ч. Исходя из проведенных экспериментов было выбрано рабочее расстояние 220 мм при заглуплении фокального пятна от  $-10$  до  $+20$  мм.

Оптимизацию режимов сварки со сквозным проплавлением проводили на плитах из сплава АМГ6 размером  $500 \times 200 \times 40$  мм при скорости 18...85 м/ч пучком без отклонений и сканирующим пучком горизонтальных и вертикальных швов на подъем. Ток пучка в зависимости от скорости сварки варьировали в пределах 130...275 мА.

При сварке образцов стыковых соединений применяли технологические круговую и поперечную развертки, а также дискретные развертки с регулируемым временем задержки пучка в точках его остановок [15, 16]. Траектории разверток выбирали в виде различных кривых второго порядка (круг, полукруг, эллипс, полуэллипс) и их комбинации с продольным или поперечным скани-

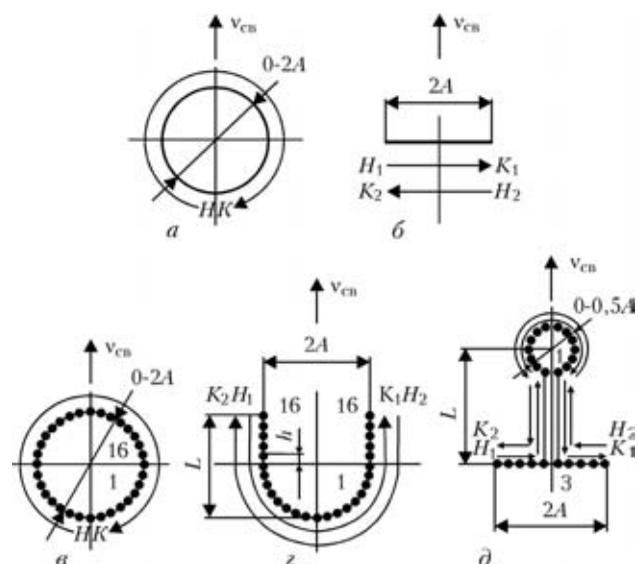


Рис. 1. Формы и траектории разверток, применяемых при сварке образцов из алюминиевых сплавов: а, б — круговое и поперечное непрерывное сканирование; в–д — дискретное сканирование ( $A$  — амплитуда развертки;  $h$  — шаг дискретного перемещения; 1, 16 и 3 — области переднего и заднего фронтов сварочной ванны с соответствующим (1 — минимальное, 16 — максимальное) тепловложением



**Т а б л и ц а 1. Режимы сварки горизонтальным пучком вертикальных на подъем и горизонтальных швов плит из сплавов АМг6 и М40**

Номер опыта	Сплав	Пространственное положение сварки стыка	Толщина плит, мм	Ток пучка, мА	Ток фокусировки, мА	Скорость сварки, м/ч	Макрошлиф
1	АМг6	Горизонтальное	40	220	865	30	
2		Вертикальное на подъем	60	275	895	20	
3		» »	90	330	915	12	
4*		Горизонтальное	90	330	915	12	
5*	М40	Вертикальное на подъем	40	395	870	45	
8		Горизонтальное	40	395	870	45	
9		Вертикальное на подъем	50	365	822	25	
10		» »	50	465	902	30	
11		» »	50	365	870	36	
12		» »	50	495	902	45	
13		Горизонтальное	65	630	915	36	

\* Сварка сканирующим пучком с круговой разверткой.

рованием (рис. 1), а форму и параметры контролировали осциллографом С1-83. Независимо от вида развертки или соотношения времени задержек пучка по траектории сканирования амплитуду развертки поперек стыка стремились выдержать неизменной при сварке одной толщины при всех технологических вариантах и во всех пространственных положениях соединений (рис. 2). Режимы сварки стыковых соединений сплавов АМг6 и М40 и их макрошлифы приведены в табл. 1.

Оценку качества сварных соединений выполняли 100%-м контролем плотности соединений методом рентгеноскопии; измерением геометрических размеров зоны проплавления и зоны термического влияния (ЗТВ) на поперечных макрошлифах; определением состава металла шва по основному легирующему составляющим методом локального спектрального анализа; исследованием микроструктуры различных участков сварных соединений и распределением твердости; опре-

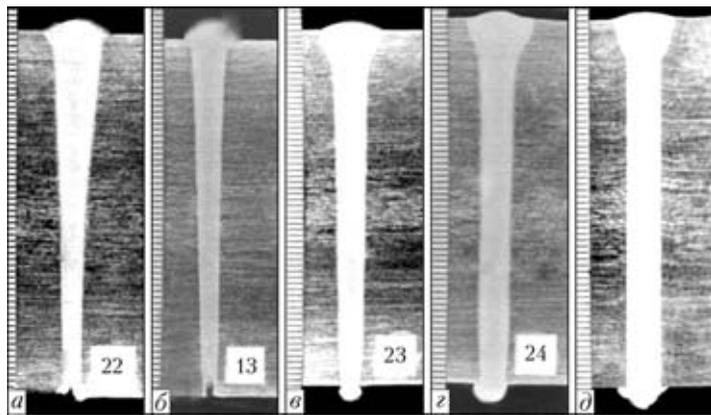


Рис. 2. Макрошлифы стыковых соединений сплава АМг6 толщиной 60 мм, полученных с помощью разверток: а, б — соответственно непрерывное круговое и поперечное сканирование; в — дискретное круговое сканирование; г — дискретное U-образное сканирование; д — дискретное комбинированное сканирование (круг с поперечной разверткой); а, г — сварка горизонтальным пучком на вертикальной плоскости; б, в, д — сварка горизонтальным пучком на подъеме

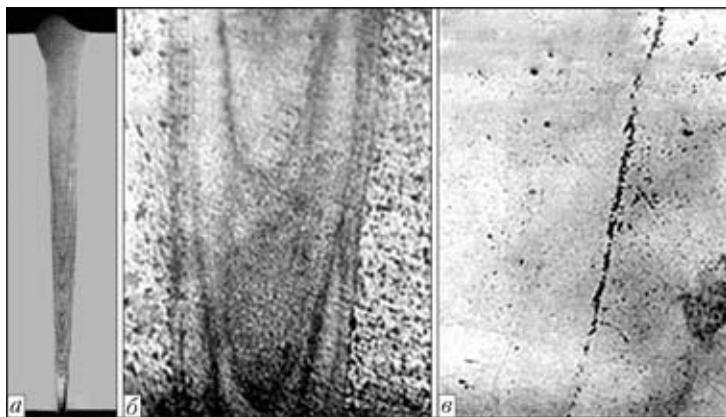


Рис. 3. Слоистая структурная неоднородность в сварном шве сплава АМг6 толщиной 90 мм, выполненном ЭЛС с круговой разверткой: а — макрошлиф соединения; б — макроструктура (×20) соединения в нижней части шва; в — микроструктура (×300) шва на участке вторичных фазовых выделений

делением прочностных характеристик соединений и их разбросом по толщине заготовок.

Рентгеновский контроль соединений не выявил грубых дефектов в виде пор, трещин, непроваров или пустот в сварных швах.

При выполнении горизонтальных швов на плите из сплава АМг6 наблюдается ярко выраженная структурная неоднородность по сечению шва, особенно в его нижней части (рис. 3). Наличие практически непрерывной цепочки вторичных фазовых выделений по слоям кристаллизации (рис. 3, в) приводит к значительной анизотропии свойств по сечению стыка и большому разбросу их значений в пределах одной партии испытуемых образцов. При выполнении вертикальных соединений на подъем плит из сплава М40 возможны дефекты в виде несплавленных полостей ближе к корню шва, а также микродефекты в металле ЗТВ в виде легкоплавких межзеренных прослоек, скоагулированных включений и подплавленных

эвтектических фаз, способствующих образованию отдельных микропор и рыхлот, приводящих к снижению ударной вязкости по границе сплавления. При этом коэффициент прочности снижается до уровня  $0,85\sigma_{\text{в}}$  основного металла (ОМ).

Обработка и анализ результатов оценки соединений из сплавов АМг6 и М40 с параллельными границами зоны проплавления свидетельствуют, что в этом случае достигается стабильное формирование швов по всей глубине независимо от толщины полуфабрикатов при ширине швов 5...8 мм и двухстороннем формировании валиков усиления (макрошлифы в табл. 1). Кроме того, в ходе механических испытаний соединений установлены их высокие свойства, а металлографические исследования металла шва и ЗТВ показали, что при данном способе измельчаются и стабилизируются размеры зерен в верхней, средней и корневой частях металла шва, снижается содержание водорода и толщина выделений в межзеренных прослойках, уменьшаются размеры ЗТВ.

Химические составы ОМ и металла шва полученных соединений из сплавов АМг6 (толщиной 40, 60 и 90 мм) и М40 (40, 50 и 65 мм) оказались идентичными для всех толщин. Так, сплав АМг6 содержит (мас. %): 6,65...6,75 Mg; 0,55...0,59 Mn; основа Al, а сплав М40 — 5,0 Cu; 3,60...3,70 Mg; 0,43 Mn; основа Al. При этом потери магния на испарение в металле шва не превышали 0,02...0,04 %.

Результаты механических испытаний полученных сварных соединений сплавов АМг6 и М40 для всех толщин свидетельствуют (табл. 2, 3) о том, что соединения отличаются высокой стабильностью показателей временного сопротивления и ударной вязкости, а неоднородность свойств по всей толщине стыка практически отсутствует. Что особенно важно, так это то, что ударная вязкость соединений с надрезом Шарпи по середине шва на 15...20 % выше чем у ОМ и сохраняется практически на том же уровне при выполнении надреза на границе сплавления.

Анализ микроструктуры соединений из сплава АМг6, выявленной реактивом Келлера, показал, что, помимо  $\alpha$ -твердого раствора магния и марганца, в алюминии присутствуют двойные и более сложные фазы, расположенные в виде тонких, иногда непрерывных цепочек по границам зерен в ОМ и между ветвями дендритов в металле шва (рис. 4). В нижней части соединений вследствие более высоких скоростей кристаллизации образуются центральные дендриты, более разветвлен-



**Таблица 2. Механические свойства ОМ и сварных соединений плит из сплава АМг6, выполненных ЭЛС**

Номер образца	Толщина ОМ и стыка, мм	$\sigma_v$ , МПа	KCV, Дж/см <sup>2</sup>		Объект испытания
			надрез по середине шва	надрез по границе шва	
1	40	$\frac{350...355}{360}$	$\frac{22...25}{23}$	—	ОМ, верхняя часть
2*		$\frac{262...309}{280}$	$\frac{20...21}{20}$	$\frac{12...15}{14}$	Стыковое соединение, дефекты в виде свищей
3*		$\frac{313...324}{324}$	$\frac{23...26}{25}$	$\frac{15...17}{16}$	Стыковое соединение, слоистая неоднородность
4		$\frac{345...350}{348}$	$\frac{27...29}{28}$	$\frac{18...22}{20}$	Стыковое соединение
5	60	$\frac{346...352}{350}$	$\frac{18...19}{18}$	—	ОМ
6		$\frac{335...340}{340}$	$\frac{25...27}{27}$	$\frac{18...22}{21}$	Стыковое соединение
7	90	$\frac{342...354}{350}$	$\frac{18...19}{19}$	—	ОМ
8		$\frac{335...338}{336}$	$\frac{22...25}{23}$	$\frac{17...19}{19}$	Стыковое соединение

\* Сварка круговым сканирующим пучком.

ные по сравнению со структурой верхней части стыка. Дефекты в зоне сплавления, за исключением единичных микропор, отсутствуют.

При измерении твердости сварных соединений из сплава АМг6 толщиной 90 мм на приборе «Роквелл» шариком 1 мм при нагрузке 600 Н на трех уровнях по сечению стыка не было установлено заметного уменьшения твердости ОМ (*HRB* 82...84) вплоть до границы сплавления. В верхней части стыка твердость металла шва составляет *HRB* 80 и незначительно увеличивается до *HRB* 82...83 в средней части шва, а ближе к обратному валику твердость снижается до *HRB* 79...80 (рис. 5). Выбор оптимальных режимов сварки стыковых соединений для сплава М40 выполняли на плитах толщиной 50 мм при скоростях 25, 30,

36 и 45 м/ч (см. табл. 1). Результаты измерения твердости показаны на рис. 6. Из рисунка видно, что снижение скорости сварки от 45 до 25 м/ч приводит к увеличению ЗТВ (с 9 до 13 мм на одну сторону, включая шов), но практически не меняет твердости металла шва на всех уровнях замеров. Кроме того, с помощью термообработки (искусственное старение) можно повысить твердость металла шва. Влияние скорости сварки на микроструктуру шва и околошовной зоны показало, что снижение скорости сварки укрупняет структуру шва и эвтектических прослоек в металле ЗТВ, хотя структура шва остается достаточно мелкодисперсной и равноосной. Изучено влияние скорости сварки на рекристаллизацию ОМ. Металлографический анализ показал, что

**Таблица 3. Механические свойства ОМ и сварных соединений плит из сплава М40, выполненных ЭЛС**

Номер образца	Толщина ОМ и стыка, мм	$\sigma_v$ , МПа	KCV, Дж/см <sup>2</sup>		Объект испытания
			надрез по середине шва	надрез по границе шва	
1	40	$\frac{400...415}{400}$	$\frac{9,7...11,0}{10,8}$	—	ОМ
2*		$\frac{313...322}{320}$	$\frac{3...6}{5}$	$\frac{5,0...5,6}{5,0}$	Стыковое соединение
3		$\frac{388...392}{390}$	$\frac{5,1...6,2}{5,3}$	$\frac{6,8...7,2}{7,0}$	» »
4	50	$\frac{410...420}{415}$	$\frac{9,8...11,5}{10,5}$	—	ОМ
5		$\frac{365...375}{370}$	$\frac{7,6...8,5}{7,9}$	$\frac{6,9...7,8}{7,1}$	Стыковое соединение

\* Сварка круговым сканирующим пучком.

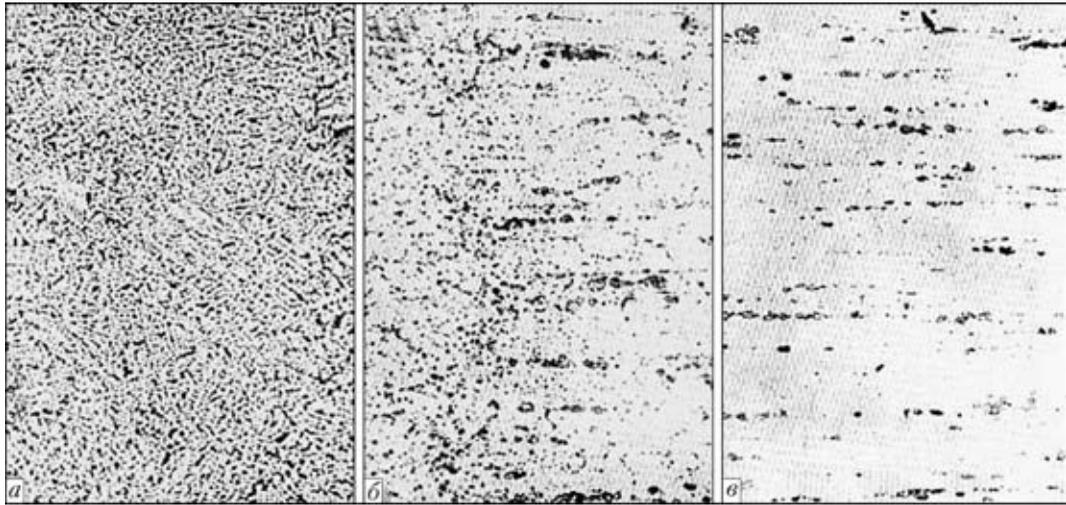


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 160$ ) характерных участков сварного соединения сплава АМг6 толщиной 40 мм: а — металл шва; б — зона сплавления; в — ОМ

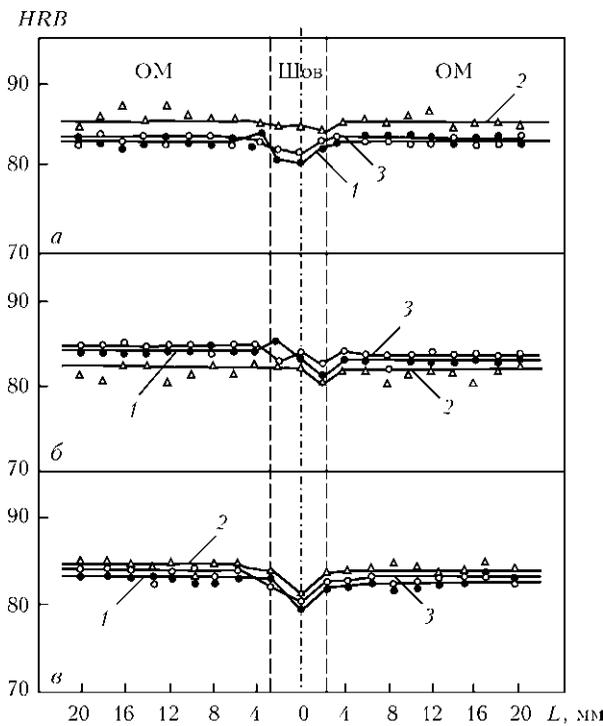


Рис. 5. Распределение твердости поперек сварных соединений сплава АМг6 толщиной 90 мм (прокат), выполненных ЭЛС: а-в — уровни замеров твердости на расстоянии от поверхности плиты со стороны ввода пучка 10, 45, 80 мм соответственно; 1 — непрерывная круговая развертка (стык); 2, 3 — дискретное сканирование (2 — проплав; 3 — стык)

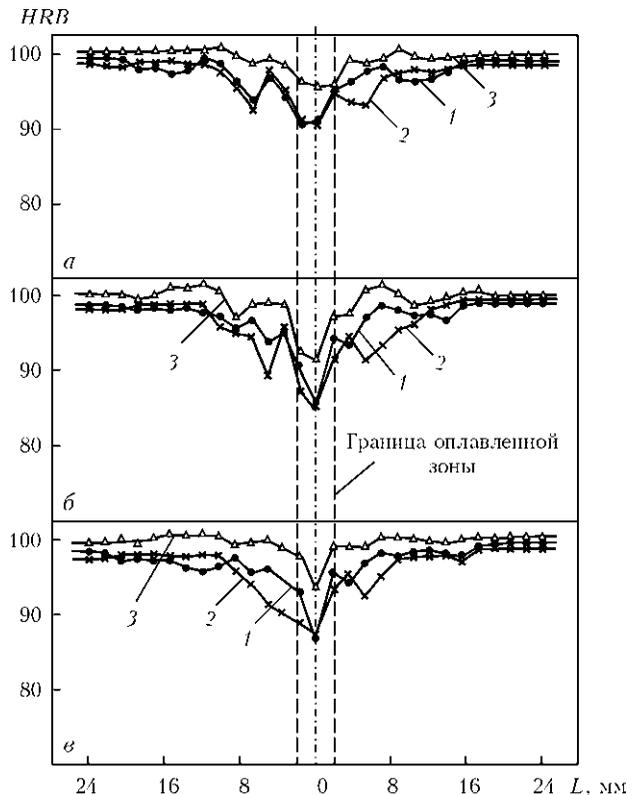


Рис. 6. Распределение твердости в сварных соединениях сплава М40 толщиной 50 мм, выполненных ЭЛС: 1-3 — то же, что и на рис. 5

участок рекристаллизации ОМ при сварке на скорости 25 м/ч не превышает 4 мм. Микроструктура шва и околошовной зоны для стыкового соединения из сплава М40 толщиной 50 мм, полученного на скорости 45 м/ч, приведена на рис. 7. Как видно, снижение скорости сварки до 25 м/ч не влияет на изменение состава металла шва. Однако при этом наблюдается разупрочнение по границе сплавления и снижение ударной вязкости в два раза по сравнению с ОМ. Повышение скорости до 45 м/ч и искусственное старение свар-

ных соединений позволили повысить ударную вязкость в ЗТВ до 20 % по сравнению со скоростью 25 м/ч.

В результате проведенных работ по ЭЛС полуфабрикатов из алюминиевых сплавов АМг6 и М40 была разработана и проведена промышленная проверка технологии сварки обечаек с кольцевыми и продольными соединениями толщиной 40, 50, 60, 65 и 90 мм на ПО «Стрела» (г. Оренбург). На рис. 8 показана обечайка с наружным диаметром 1250 мм, высотой 1500 мм и толщиной

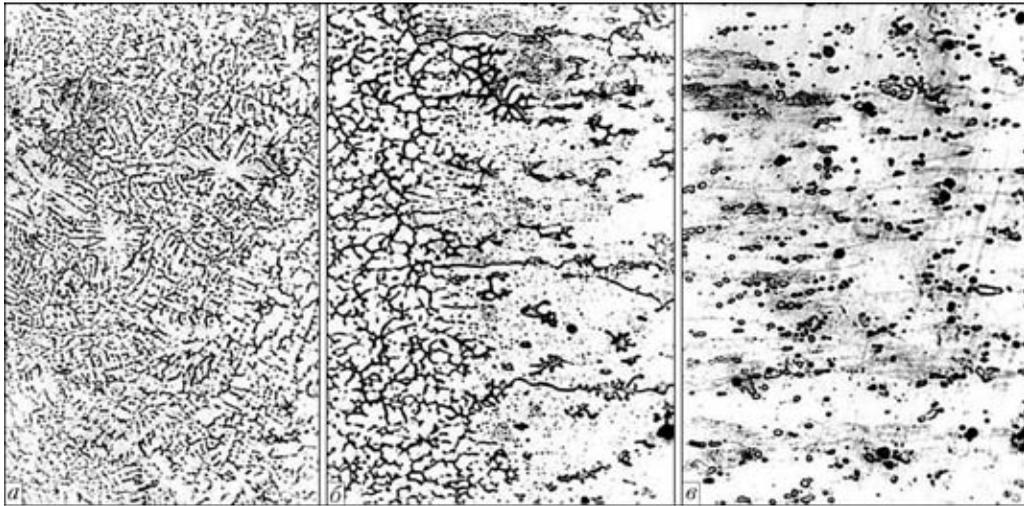


Рис. 7. Микроструктуры ( $\times 160$ ) различных участков сварного соединения сплава М40 толщиной 50 мм: *а* — металл шва; *б* — зона сплавления; *в* — ОМ

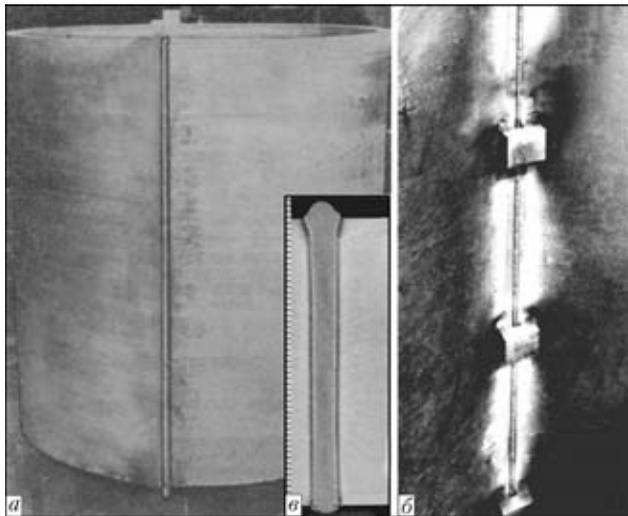


Рис. 8. Внешний вид сварной обечайки из сплава М40 (*а*), обратного валика продольного шва (*б*) и микрошлиф соединения (*в*)

стенки 50 мм из листового проката сплава М40 с продольным стыковым соединением, выполненным ЭЛС, а на рис. 9 — обечайка с внутренним диаметром 800 мм, высотой 1700 мм и толщиной стенок 40, 60 и 90 мм с кольцевыми стыковыми соединениями из поковок сплава АМгб.



Рис. 9. Внешний вид сварной обечайки с переменной толщиной стенки из поковок сплава АМгб (*а*) и макрошлиф соединения (*б*)

1. *Бондарев А. А.* ЭЛС, ее преимущества и основные положения при разработке технологии сварки алюминиевых сплавов // Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Докл. I Всесоюз. конф. по сварке легких, цветных и тугоплавких металлов и сплавов (Киев, 21–23 нояб. 1978 г.). — Киев: Наук. думка, 1980. — С. 106–110.
2. *Бондарев А. А.* Состояние техники и преимущества процесса электроннолучевой сварки конструкций из алюминиевых сплавов // Сварка алюминиевых сплавов криогенного и общего назначения: Докл. материалов советско-американского семинара (Ташкент, 17 окт. 1982 г.). — Киев: Наук. думка, 1984. — С. 10–19.
3. *Свойства* сварных соединений алюминиевых и магниевых сплавов большой толщины, выполненных ЭЛС / Н. А. Ольшанский, А. С. Хохловский, Р. Ф. Балаян и др. // Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Докл. II Всесоюз. конф. по сварке легких, цветных и ту-

- гоплавких металлов и сплавов (Ташкент, 17 окт. 1982 г.). — Киев: Наук. думка, 1985. — С. 164–166.
4. *Писарский В. И.* ЭЛС алюминиевых сплавов больших толщин // V Всесоюз. конф. по ЭЛС (Киев, 17–29 окт. 1975 г.). — Киев: Наук. думка, 1977. — С. 168–171.
5. *Технология* ЭЛС крупногабаритных конструкций из сплава АМгб / А. А. Бондарев, Н. Г. Третьяк, О. С. Кузьменок и др. // Автомат. сварка. — 1978. — № 9. — С. 54–56.
6. *Бондарев А. А., Третьяк Н. Г.* Влияние параметров режима на размеры зоны проплавления и свойства соединения при сварке плит из сплава 1201 электронным лучом // Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Докл. I Всесоюз. конф. по сварке легких, цветных и тугоплавких металлов и сплавов (Киев, 21–23 нояб. 1978 г.). — Киев: Наук. думка, 1980. — С. 114–117.
7. *Электроннолучевая сварка* / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.



8. Хохловский А. С., Яхонтов С. А. Влияние гидродинамических процессов в канале проплавления на качество сварных соединений при ЭЛС легких сплавов // Тр. Моск. энергет. ин-та. — 1980. — № 475. — С. 9–21.
9. Разработка технологии ЭЛС корпусов изделий из сплава АМг6 / Н. М. Воропай, А. А. Бондарев, Н. П. Иванов и др. // Свароч. пр-во. — 1972. — № 3. — С. 18–20.
10. ЭЛС сферических емкостей из алюминиевых сплавов / А. А. Бондарев, Н. М. Воропай, Д. М. Рабкин и др. // Автомат. сварка. — 1972. — № 5. — С. 44–47.
11. Зайцев В. И., Скороспелов В. В. Опыт изготовления сварных емкостей из жаропрочного алюминиевого сплава М40 // Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Докл. I Всесоюз. конф. по сварке легких, цветных и тугоплавких металлов и сплавов (Киев, 21–23 нояб. 1978 г.). — Киев: Наук. думка, 1980. — С. 76–81.
12. Свариваемость алюминиевого сплава М40 / А. Я. Ищенко, В. Г. Игнатъев, А. Г. Чаюн и др. // Автомат. сварка. — 1979. — № 10. — С. 15–18.
13. Бондарев А. А., Рабкин Д. М. Испарение легколетучих элементов при ЭЛС алюминиевых сплавов // Там же. — 1974. — № 3. — С. 13–16.
14. Децик Н. Н. Особенности испарения легирующих элементов шва при ЭЛС в промежуточном вакууме // Электротехн. пром-сть. Сер. Электросварка. — 1980. — Вып. 4. — С. 1–4.
15. Бондарев А. А., Скрябинский В. В. Сварка алюминиевых сплавов с программированием распределения плотности мощности электронного пучка по пятну нагрева // Автоматическое управление технологическим процессом электронно-лучевой сварки: Сб. науч. тр. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1987. — С. 52–58.
16. Система управления разверткой пучка при электронно-лучевой сварке / Ю. Н. Ланкин, А. А. Бондарев, Е. И. Довгодько, В. А. Дьяченко // Автомат. сварка. — 2009. — № 9. — С. 16–20.

Results of investigations on electron beam welding of 40..90 mm thick semi-finished products of aluminium alloys АМг6 and М40 are given. Optimal welding parameters were selected. Properties, microstructural peculiarities and hardness of the resulting joints were studied for horizontal and vertical welds. The commercial EBW technology was developed and verified in fabrication of large-size thick-walled shells of the above alloys.

Поступила в редакцию 23.09.2011

## ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВАЯ НАПЛАВКА КОМПОЗИЦИОННЫХ СПЛАВОВ НА БАЗЕ СФЕРИЧЕСКОГО РЕЛИТА

Известно, что для наплавки деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, наиболее эффективно применение сплавов на основе литых карбидов вольфрама (далее релит). Несмотря на высокую стоимость они часто незаменимы, особенно в горнодобывающей отрасли. Композиционные сплавы успешно применяют для наплавки таких деталей, как замки буровых труб, шарошки буровых долот, зубья дробилок и др. Однако наплавка таких сплавов является сложной технической задачей и сегодня, кроме печного способа, разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона еще в 60-е годы прошлого столетия, другие технологии практически не применяют в странах СНГ. За рубежом для наплавки деталей горнодобывающего оборудования широко используют плазменно-порошковую наплавку, а в качестве матрицы — мягкие легкоплавкие самофлюсующиеся сплавы на основе никеля системы Ni–Si–В. Для этого используют специальные смеси порошков с соотношением матричного и армирующего порошков примерно 50% на 50% по массе. К сожалению, из-за сепарации порошков по удельному весу при наплавке наблюдается неравномерное распределение частиц релита в наплавленном слое, что приводит к нарушению формирования и появлению дефектов в виде пор, трещин и т. д.

ООО фирма «Плазма-Мастер Лтд» (г. Киев) разработала технологию и оборудование для плазменно-порошковой наплавки с отдельной подачей матричного и армирующего порошков. Подача порошков осуществляется с двух отдельных питателей, а смешивание происходит либо на входе либо непосредственно в самом плазмотроне (в зависимости от его конструкции). Управление питателями в рамках общего сварочного цикла производится контроллером PLC либо системой с ЧПУ (CNC). Это позволяет обеспечить равномерное распределение релита в наплавленном слое и легко регулировать соотношение матричного и армирующего порошков в нем. Последнее очень важно для деталей, в которых необходимо обрабатывать наплавленный слой для обеспечения определенного размера, например, деталей центробежных секционных насосов (см. 2-ю с. обложки). Поскольку заполнение наплавленного металла релитом происходит снизу, то можно подобрать такое соотношение порошков, при котором припуск на механическую обработку будет состоять из одного матричного сплава, что существенно облегчает эту операцию.

Компоновка оборудования и конструкции плазмотронов позволяют наплавливать как внутренние, так и наружные поверхности.

Кроме никелевых сплавов, в качестве матричного материала перспективно использовать и специальные сплавы на основе железа. Опыт наплавки таких композиций показал, что они прекрасно формируются, более износостойкие и значительно дешевле.



## ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА В ВАКУУМЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА $\gamma$ -TiAl СО СТАЛЬЮ 12X18H10T

**Г. К. ХАРЧЕНКО**, д-р техн. наук, **А. И. УСТИНОВ**, д-р физ.-мат. наук, **Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО**, канд. техн. наук,  
**Л. В. ПЕТРУШИНЕЦ**, инж., **С. Г. ГРИГОРЕНКО**, **В. А. КОСТИН**, кандидаты техн. наук,  
**В. П. ГУРИЕНКО**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана двухстадийная технология диффузионной сварки в вакууме интерметаллидного сплава  $\gamma$ -TiAl со сталью 12X18H10T с применением промежуточных прослоек. Показано, что использование нанослойной промежуточной прослойки системы Ti-Al со стороны интерметаллида и прослойки из никеля со стороны стали способствует равномерному распределению микротвердости в стыке.

*Ключевые слова:* диффузионная сварка в вакууме, интерметаллидный сплав  $\gamma$ -TiAl, сталь 12X18H10T, нанослойная прослойка, зона соединения, микроструктура, микротвердость

Сложность сварки интерметаллидов системы Ti-Al со сталью определяется малой взаимной растворимостью титана и железа, а образование карбидов, интерметаллидов и эвтектик в зоне соединения исключает возможность непосредственной сварки интерметаллида со сталью всеми известными способами сварки плавлением.

Как правило, соединения титана и его сплавов со сталью, выполненные способом диффузионной сварки, имеют низкие показатели ударной вязкости [1–3].

При сварке в твердой фазе титана со сталью для получения качественных соединений без образования в стыке хрупких интерметаллидных фаз [4, 5] применяют промежуточные прослойки, в частности, ниобий (или ванадий) и медь. Однако эти материалы отличаются друг от друга как температурой плавления, так и прочностными характеристиками (табл. 1). Медь применяют как материал, блокирующий диффузию углерода в ниобий (сильный карбидобразующий металл). Главный недостаток меди в данной композиции — это низкая температура плавления  $T_{пл} = 1083$  °C.

Согласно данным работы [2] при сварке сплавов титана с нержавеющей сталью через промежуточные барьерные прослойки наименьшую прочность в зоне соединения имеет участок меди, по которому происходит разрушение.

Существуют немногочисленные работы по сварке интерметаллидов системы Ti-Al со сталью [6, 7]. При диффузионной сварке интерметаллида системы Ti-Al (Ti-48Al-2Cr-2Nb ат. %) со сталью без применения промежуточных прослоек ( $T_{св} = 950$  °C,  $P_{св} = 25$  МПа,  $t_{св} = 6$  мин) в стыке

между  $\gamma$ -TiAl и сталью формируются переходные интерметаллидные слои  $Ti_3Al + FeAl + FeAl_2/TiC$ , приводящие к охрупчиванию сварного соединения [6].

Сварку интерметаллида с нержавеющей сталью с применением тонких прослоек в виде фольг из титана, ванадия, меди, препятствующих образованию хрупких интерметаллидов в стыке, исследовали в работе [7]. Интерметаллидный сплав (Ti-47,2Al-1,17Ni-0,56Cr-0,11Nb ат. %) сваривали со сталью. Сварку выполняли при температуре  $T_{св} = 1000$  °C, давлении  $P_{св} = 20$  МПа, длительности сварки  $t_{св} = 60$  мин. При выборе температуры сварки авторы прежде всего ориентировались на физические свойства меди, поскольку при повышении температуры сварки выше 1083 °C происходит расплавление медной прослойки и выдавливание меди из стыка, а прочность сварных соединений резко снижается [6]. При оптимальном режиме сварки разрушение образцов в основном происходит по слою  $Ti_3Al-TiAl$  и частично по основному металлу ( $\gamma$ -TiAl).

Цель наших исследований заключалась в разработке технологии диффузионной сварки в вакууме (ДСВ) интерметаллидного сплава  $\gamma$ -TiAl со

**Таблица 1.** Механические свойства применяемых материалов

Материал	$T_{пл}$ , °C	$\delta$ , %	$\sigma_b$ , МПа	$E$ , МПа
12X18H10T	1455	40	510...860	198000
Медь	1083	60	216...235	128700
Никель	1453	35...40	390...490	201900
Ниобий	2468	30...40	345...491	89100
Титан	1668	40...55	245...345	108000
$\gamma$ -TiAl	~ 1450	1,5	550...900	180000



Таблица 2. Состав и толщина применяемых при сварке прослоек

Тип прослойки	Состав прослойки	Толщина, мкм
Ti-Al	Ti-52Al ат. %	20
Титан	Титан	100
Ниобий	Ниобий	50
Медь	Медь	50
Никель	Никель	50

сталью 12X18H10T с более равномерным распределением прочности в стыке. Объектом исследований служили интерметаллидный сплав  $\gamma$ -TiAl (Ti-48Al-2Nb-2Cr ат. %) и сталь 12X18H10T.

При температуре сварки  $\gamma$ -TiAl, равной 1000 °С, в стыке вследствие большой твердости и малой пластичности материала образование физического контакта в полной мере не происходит [8]. В зоне соединения обнаружено значительное количество дефектов. Качественные сварные соединения  $\gamma$ -TiAl, по нашим результатам, можно получить при более высоких значениях температуры (примерно 1200 °С), что согласуется с данными работы [9].

Поскольку соединяются такие разные материалы, как интерметаллидный сплав и медная прослойка с отличающимися физико-химическими свойствами, то сварку интерметаллида  $\gamma$ -TiAl со сталью 12X18H10T осуществляли в две стадии. На первой при температуре 1200 °С к интерметаллиду приваривали прослойки из титана и ниобия, а на второй стадии при более низкой температуре (1000 °С) к сборке через медную прослойку присоединяли нержавеющую сталь.

Образцы размерами 15×15×5 мм вырезали на электроэрозионном станке. Характеристики применяемых при сварке прослоек приведены в табл. 2. Образцы сваривали в свободном состоянии.

Микроструктура сварного соединения, полученного ДСВ интерметаллидного сплава  $\gamma$ -TiAl со сталью 12X18H10T через прослойки из титана, ниобия и меди, представлена на рис. 1. Металлографические исследования показали, что в зоне соединения  $\gamma$ -TiAl/Ti/Nb+Cu/12X18H10T такие дефекты, как трещины и поры, отсутствуют. Как следует из рис. 1 и 2, в процессе сварки в зоне соединения происходят активные диффузионные процессы с образованием со стороны  $\gamma$ -TiAl широкой зоны объемного взаимодействия.

При исследовании распределения микротвердости в зоне соединения  $\gamma$ -TiAl+12X18H10T (рис. 3) определено, что на границе интерметаллида  $\gamma$ -TiAl-прослойка титана отмечено повышение микротвердости до 4050 МПа. В данной области

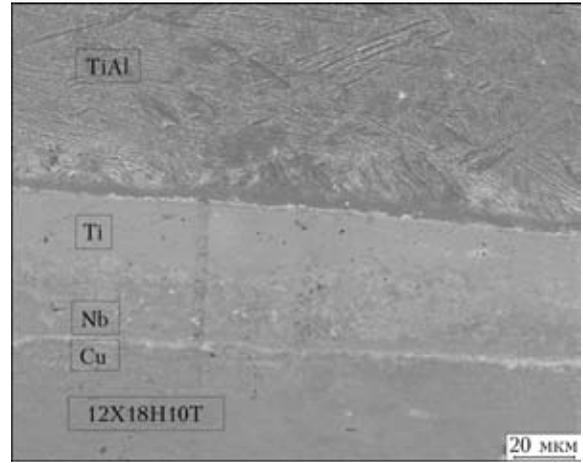


Рис. 1. Микроструктура ( $\times 600$ ) зоны соединения  $\gamma$ -TiAl со сталью 12X18H10T с применением промежуточных прослоек сплошного сечения (титан, ниобий, медь)

фиксируется 8,95 ат. % Al за счет диффузии алюминия из интерметаллида в сторону титана.

Со стороны нержавеющей стали на границе с медной прослойкой обнаружено резкое снижение микротвердости (до 1100 МПа), что соответствует значению микротвердости меди. Очевидно, опасным местом с точки зрения работоспособности сварного соединения  $\gamma$ -TiAl/Ti/Nb+Cu/12X18H10T является участок размещения меди, где значения микротвердости в 2 раза ниже, чем в соседних участках.

Для выравнивания микротвердости в зоне соединения со стороны интерметаллида применяли

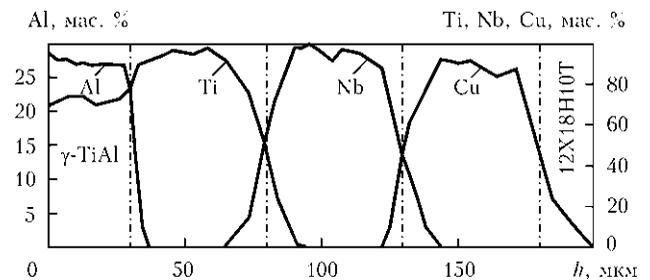


Рис. 2. Распределение элементов в зоне соединения  $\gamma$ -TiAl со сталью 12X18H10T с применением промежуточных прослоек сплошного сечения из титана, ниобия и меди ( $h$  — толщина прослойки)

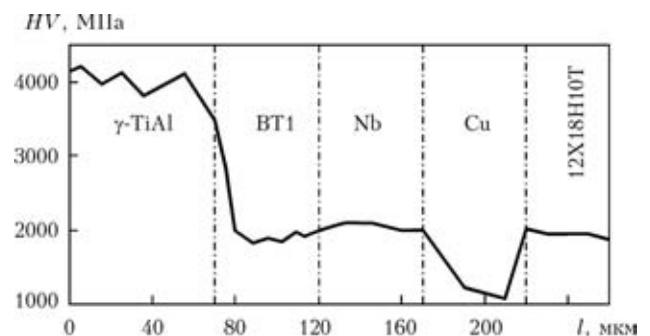


Рис. 3. Распределение значений микротвердости поперек зоны соединения  $\gamma$ -TiAl+12X18H10T, полученного с применением промежуточных прослоек из титана, ниобия, меди

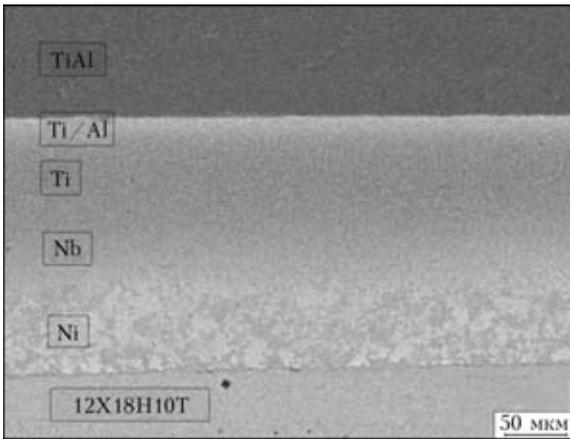


Рис. 4. Микроструктура зоны соединения TiAl+12X18H10T, полученного с применением прослоек Ti/Al–Ti–Nb–Ni

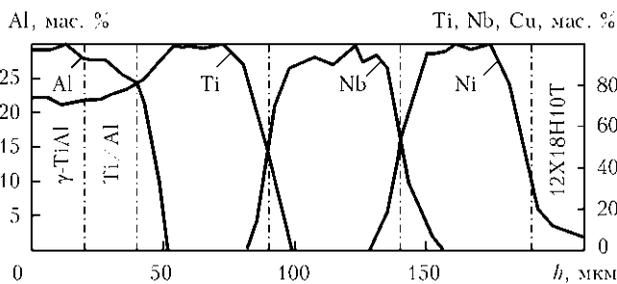


Рис. 5. Распределение элементов в зоне соединения TiAl+12X18H10T, полученного с применением прослоек Ti/Al–Ti–Nb–Ni

нанослойную прослойку типа Ti–Al (см. табл. 2) общей толщиной 20 мкм и толщиной отдельных слоев алюминия и титана примерно 20 нм, что обеспечивает дополнительную активацию свариваемых поверхностей.

Необходимо также отметить, что при медленном нагреве нанослойных прослоек Ti/Al со скоростью 50 °C/мин, характерной для ДСВ, зафиксирована следующая последовательность фазовых превращений:  $Al_3Ti_2 \rightarrow Al_5Ti_2 \rightarrow Al_2Ti \rightarrow AlTi$  [10]. В нанослойных прослойках дифракционные признаки формирования интерметаллида  $Ti_3Al$  отсутствуют. Образование в процессе сварки между интерметаллидным сплавом и прослойкой титана диффузионного слоя с составом Ti/Al, более пластичным, чем  $Ti_3Al$ , может существенно влиять на повышение качества сварных соединений [6].

Прослойку типа Ti/Al размещали между интерметаллидом и прослойкой из титана. Между сталью и ниобием располагали прослойку из никеля, так как диффузионная подвижность его в железо и его прочностные характеристики выше, чем у меди (см. табл. 1).

В паре Nb–Ni при образовании интерметаллида существует латентный период. Так, при температуре 1000 °C время образования интерметаллида толщиной примерно 1,5 мкм составляет 11 мин [11].

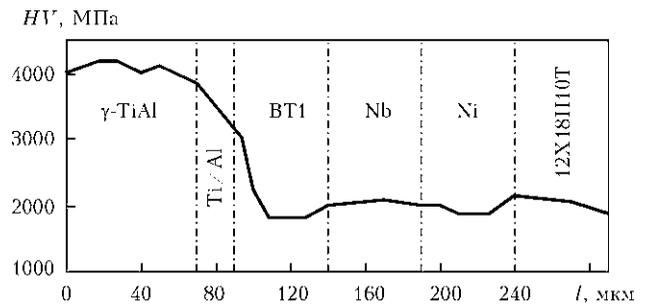


Рис. 6. Распределение микротвердости поперек зоны соединения  $\gamma$ -TiAl+12X18H10T, полученного с применением прослойки Ti/Al–Ti–Nb–Ni

Сварку проводили в две стадии: соединяли интерметаллид с прослойками Ti/Al–Ti–Nb при  $T_{св} = 1200$  °C,  $P_{св} = 40$  МПа,  $t_{св} = 20$  мин с последующей приваркой прослойки из никеля и стали 12X18H10T при  $T_{св} = 1000$  °C,  $P_{св} = 20$  МПа,  $t_{св} = 10$  мин.

Металлографические исследования соединения показали, что в стыке дефекты сварки отсутствуют. Как видно из микроструктуры сварного соединения (рис. 4) и распределения элементов (рис. 5), в процессе сварки в стыке активно проходят диффузионные процессы, что приводит к образованию между интерметаллидом и титаном, а также ниобием и титаном зон объемного взаимодействия. Анализ значений микротвердости в зоне соединения  $\gamma$ -TiAl–Ti/Al–Ti–Nb–Ni–12X18H10T (рис. 6), полученного ДВС, показал, что характер распределения микротвердости более равномерный, чем при сварке с прослойками Ti–Nb–Cu.

### Выводы

1. С учетом различий физико-химических свойств свариваемых материалов предложена двухстадийная схема сварки  $\gamma$ -TiAl со сталью 12X18H10T.
2. В соединениях, полученных ДВС, интерметаллидного сплава  $\gamma$ -TiAl со сталью 12X18H10T через промежуточные прослойки Ti–Nb–Cu отмечается резкое снижение значений микротвердости на медной прослойке.
3. Применение никеля вместо медной прослойки при сварке  $\gamma$ -TiAl со сталью 12X18H10T позволяет получать бездефектные сварные соединения при равномерном распределении микротвердости в стыке.

1. Биметаллические соединения / К. Е. Чарухина, С. А. Голованенко, В. А. Мастеров, Н. Ф. Казаков. — М.: Металлургия, 1970. — 280 с.
2. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блащук и др. — 2-е изд., доп. и перераб. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
3. Чарухина К. Е., Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка в вакууме разнородных металлов. — Л.: ЛДНТП, 1964. — 24 с.



4. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка материалов. — М.: Машиностроение, 1976. — 312 с.
5. Шмаков В. М., Измирлиева А. Н. Диффузионная сварка разнородных металлов // Сварка новых высокопрочных материалов. — Куйбыш. кн. изд-во, 1967. — С. 82–86.
6. *Microstructure and strength of diffusion-bonded joints of TiAl base alloy to steel* / P. He, J. C. Feng, B. G. Zang, Y. Y. Qian // *Materials Characterization*. — 2002. — № 48. — P. 401–406.
7. *A new technology for diffusion intermetallic TiAl to steel with composite barrier layers* / P. He, J. C. Feng, B. G. Zang, Y. Y. Qian // *Ibid.* — 2003. — № 50. — P. 87–92.
8. *Получение неразъемных соединений сплавов на основе  $\gamma$ -TiAl с использованием нанослойной прослойки Ti/Al способом диффузионной сварки в вакууме* / А. И. Устинов, Ю. В. Фальченко, А. Я. Ищенко и др. // *Автомат. сварка*. — 2009. — № 1. — С. 17–21.
9. *Yoshikuni Nakao, Kenji Shinozaki, Masahiko Hamada. Diffusion bonding of intermetallic compound TiAl* // *ISIJ Intern.* — 1991. — **31**, № 10. — P. 1260–1266.
10. *Твердофазные реакции при нагреве многослойных фольг Al/Ti, полученных методом электронно-лучевого осаждения* / А. И. Устинов, Л. А. Олиховская, Т. В. Мельниченко и др. // *Современ. электрометаллургия*. — 2008. — № 2. — С. 21–28.
11. *Харченко Г. К., Шевчук Т. В., Игнатенко А. И. Исследование соединения ниобий–прослойка никеля–сталь, выполненого сваркой давлением* // *Автомат. сварка*. — 1976. — № 9. — С. 71–72.

A two-stage technology for vacuum diffusion bonding of intermetallic alloy  $\gamma$ -TiAl to steel 12Kh18N10T by using interlayers has been developed. It is shown that application of a nanolayered interlayer of the Ti–Al system on the side of intermetallic and nickel interlayer on the side of steel provides a uniform distribution of microhardness in the bond.

Поступила в редакцию 08.12.2011

## 12-я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ И РЕНОВАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ»

28.05–01.06.2012

г. Ялта, Украина

### Тематика конференции:

- *научные основы инженерии поверхности:*
  - *материаловедение*
  - *физико-химическая механика материалов*
  - *физико-химия контактного взаимодействия*
  - *износо- и коррозионная стойкость, прочность поверхностного слоя*
  - *функциональные покрытия и поверхности*
  - *технологическое управление качеством деталей машин*
  - *вопросы трибологии в машиностроении*
- *технология ремонта машин, восстановления и упрочнения деталей*
- *метрологическое обеспечение ремонтного производства*
- *экология ремонтно-восстановительных работ*

**В рамках конференции будет проведен практический семинар «Сварка, наплавка и другие реновационные технологии на предприятиях горно-металлургической, машиностроительной промышленности и на транспорте».**

**Организаторы:** Ассоциация технологов-машиностроителей Украины

**Контакты:** 04074, г. Киев, ул. Автозаводская, 2.

Тел./факс: +38044-430-85-00

www: [atmu@ism.kiev.ua](mailto:atmu@ism.kiev.ua)



# ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА ТОНКОЛИСТОВОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ МОДУЛИРОВАННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

А. Г. ЛУКАШЕНКО, Т. В. МЕЛЬНИЧЕНКО, кандидаты техн. наук, Д. А. ЛУКАШЕНКО, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние частоты модуляции мощности и формы импульсов лазерного излучения на формирование структуры металла шва при сварке аустенитной стали типа 18-10. Показано, что импульсное лазерное воздействие может оказывать влияние на кристаллизацию металла шва и формирование мелкозернистой структуры в нем. Определен оптимальный диапазон частоты модуляции.

*Ключевые слова:* лазерная сварка, тонкий лист, нержавеющая сталь, кристаллизация, сварной шов, модулированное излучение, параметры лазерной сварки, микроструктура

В сварочном производстве эффективное использование энергетических и материальных ресурсов может быть достигнуто путем внедрения принципиально новых энергосберегающих технологий и оборудования.

Известны различные методы влияния на процесс кристаллизации. При этом ставится задача модифицирования структуры шва, в частности, получение мелкозернистой структуры, что в большинстве случаев существенно улучшает свойства сварного соединения. Выделяют два основных способа воздействия на формирование структуры шва: металлургический и технологический [1]. Металлургический основан на модифицировании сварочной ванны химическими элементами с помощью как присадочных материалов, подаваемых в зону сварки, так и предварительной подготовки металла перед сваркой (нагартовка, наклеп, применение технологических вставок) [2]. Технологический способ, помимо оптимизации режимов сварки, предусматривает внешнее воздействие на сварочную ванну (механическое, тепловое, электромагнитное).

В последнее время большое распространение получил метод внешнего импульсно-периодического воздействия с применением в качестве источника тепла лазерного излучения [3–8]. Изучение физических процессов, протекающих в сварочной ванне при таком воздействии, крайне сложно [9]. Отсутствие строгих математических моделей процесса, быстротечность тепловых процессов обуславливают проведение исследований на основе комплексного подхода путем сочетания качественных оценок, экспериментов, локального моделирования с теоретическим обоснованием.

Получение высоких технологической прочности и механических характеристик сварных сое-

динений является одной из основных задач при лазерной сварке тонкостенных конструкций. При этом для предотвращения горячих и холодных трещин в металле шва при сварке тонких металлов важное значение приобретает возможность получения в нем мелкозернистой первичной структуры [10–12].

В данной работе исследовано влияние параметров импульсно-периодического лазерного воздействия, формы импульсов лазерного излучения и частоты их следования на формирование структуры шва при сварке аустенитной стали при постоянной средней мощности энерговыделения.

Согласно статистическим представлениям термодинамики [13] при кристаллизации металла вероятность образования зародышей  $w_1$  можно представить как

$$w_1 = M_1 \exp(-\Delta G_k / (k_B T)), \quad (1)$$

где  $k_B$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура;  $\Delta G_k$  — критическое или максимальное значение свободной энергии.

При этом

$$\Delta G_k = \frac{16\pi s^3 T_{пл}^2}{3\Delta T^2 Q^2}, \quad (2)$$

где  $s$  — поверхностное натяжение;  $T_{пл}$  — температура плавления металла;  $Q$  — скрытая теплота кристаллизации.

Однако с увеличением переохлаждения процесс диффузии тормозится, замедляя подход новых атомов из жидкости к кристаллу. При этом вероятность перехода из жидкой фазы в твердую при образовании зародыша

$$w_2 = M_2 \exp(-U / (k_B T)), \quad (3)$$

где  $U$  — энергия активации самодиффузии.

Вероятность  $w$ , определяющая количество центров кристаллизации  $n$ , равна произведению вероятностей составляющих процессов:

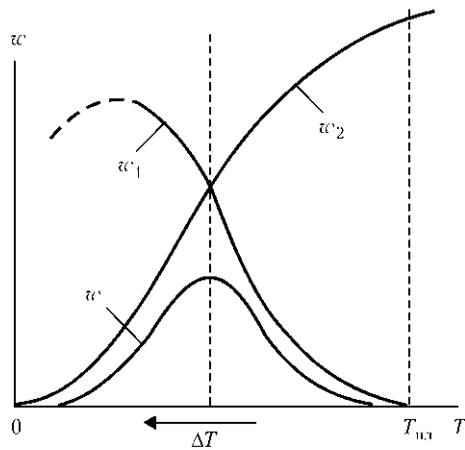


Рис. 1. Влияние степени переохлаждения на условия образования зародышей [13]

$$w = w_1 w_2 = M_3 \exp(-(\Delta G_k + U)/(k_B T)), \quad (4)$$

где  $M_1$ – $M_3$  — постоянные коэффициенты, зависящие от свойств металла.

После подстановки выражения (2) в (4) получим зависимость количества центров кристаллизации от температуры:

$$w = M_3 \exp\left(-\left(\frac{16\pi s^3 T_{пл}^2}{3\Delta T^2 Q^2} + U\right)/(k_B T)\right). \quad (5)$$

Зависимость вероятности появления зародышей от степени переохлаждения приведена на рис. 1.

Таким образом, под влиянием двух противоположных тенденций существует значение переохлаждения, обеспечивающее оптимальные условия для образования максимального количества зародышей.

На образующуюся структуру шва существенное влияние оказывает также скорость кристаллизации. Так, линейная скорость роста грани кристалла определяется как

$$w = M_4 \exp\left(-\left(\frac{\pi s^3 \alpha T_{пл}}{\Delta T Q} + U_1\right)/(k_B T)\right). \quad (6)$$

Увеличение количества центров кристаллизации и замедление скорости роста кристаллов способствует измельчению кристаллитов.

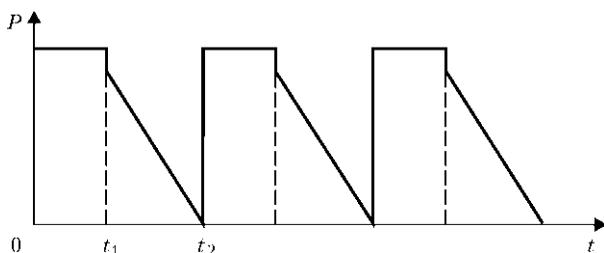


Рис. 2. Импульсно-периодический закон изменения мощности лазерного излучения

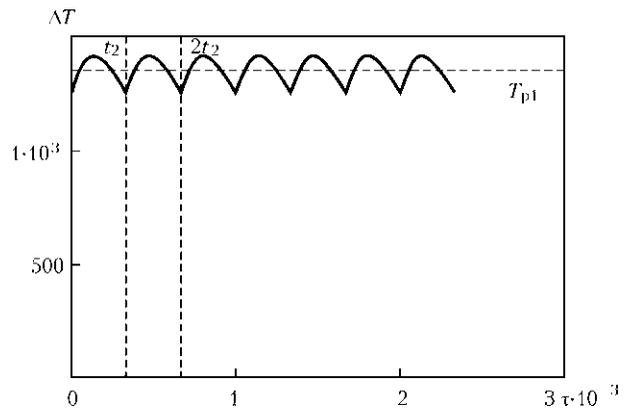


Рис. 3. Квазиустановившийся процесс изменения температуры сварочной ванны

Для определения технологических параметров, обеспечивающих оптимальные условия создания мелкозернистой структуры металла шва, лазерную сварку осуществляли модулированным излучением сложной формы (рис. 2). Форма импульсов имела крутой передний фронт и плавно ниспадающий задний, который содержал два участка: плавящийся и кристаллизационный. Первый ( $0; t_1$ ) обеспечивает плавление материала без интенсивного испарения, а второй участок ( $t_1; t_2$ ) имеет наклон, изменение угла которого позволяет изменять скорость кристаллизации, при этом длительность участка определяет оптимальную степень переохлаждения свариваемого металла.

Используя в качестве модели процесса теплопередачи движущийся линейный сосредоточенный источник в пластине с применением метода источников, получим квазиустановившийся температурный процесс (рис. 3).

Задачей моделирования является выбор формы и частоты следования лазерных импульсов, при которых обеспечивается изменение температуры сварочной ванны в области зоны фазовых переходов ликвидус–солидус, а также получение расчетных значений степени переохлаждения свариваемого металла.

**Материалы и аппаратура.** Применяли ленту толщиной 0,2 мм из стали 1.4541 согласно DIN EN 10028-7:2000, являющуюся аналогом стали 08X18H10T.

Образцы проваривали на трехкоординатном лазерном сварочном комплексе «АРМА-100М» (производитель — ИЭС им. Е. О. Патона), оснащенном иттербиевым волоконным одномодовым лазером типа YLR-100-AC с мощностью излучения 100 Вт (производитель — IPG Laser, Германия), генерирующая сердцевина которого имеет диаметр 10 мкм [14]. Лазерное излучение фокусировалось на металл в пучок диаметром 40 мкм. В качестве защитного газа сверху и снизу использовали аргон. Проплавление изучали по целому листу металла.



Частота модуляции, Гц	Макроструктура шва, ×100	Распределение основных компонентов в сварном шве	Распределение микротвердости в сварном шве
Непрерывное излучение			
100			
1000			
2000			

Рис. 4. Макроструктура шва, распределение основных компонентов и микротвердости в поперечном сечении сварных соединений, полученных при различных частотах модуляции лазерного излучения

**Методика эксперимента.** Образцы ленты нержавеющей стали (химический состав, мас. %: 0,72 Si; 0,25 Ti; 18,8 Cr; 1,68 Mn; 69,65 Fe; 8,9 Ni) были проварены непрерывным лазерным излучением мощностью 57 Вт и модулированным лазерным излучением. Форма модулированного импульса соответствовала приведенному на рис. 2. Амплитуда импульсов 100 Вт, частота модуляции 100, 1000, 2000, 3000, 5000, 10000 Гц, расчетные значения степени переохлаждения соответственно 151, 143, 136, 125, 106, 82 К. Среднее значение вкладываемой мощности 57 Вт, скорость сварки 0,33 см/с. Образцы для металлографического анализа в виде шлифов поперечных сечений сварных соединений готовили по стандартной методике с использованием шлифовально-полировального станка фирмы «Struers». Микроструктуру и химический состав основного металла и сварных соединений анализировали с помощью оптического микроскопа «Reichert Polyvar Met» и ска-

нирующего микроскопа «CamScan», оснащенного энергодисперсионной системой локального анализа «Energy 200». Микротвердость сварных соединений в поперечном сечении шва измеряли индентором Виккерса на микроскопе «Reichert Polyvar Met» при нагрузке 0,2 Н с шагом 50 мкм.

**Результаты и их обсуждение.** Макроструктура сварного соединения образцов нержавеющей стали, полученных при различных типах лазерного излучения, распределение основных компонентов в зоне шва и характер изменения микротвердости в зоне соединения приведены на рис. 4.

Результаты исследования показывают, что предложенный способ сварки лазерным лучом обеспечивает химический состав зоны шва по основным элементам на уровне основного металла как непрерывным, так и циклическим воздействием лазерного излучения. Следует отметить некоторое обеднение зоны расплавления по марганцу примерно до 1,2 мас. %. При всех режимах



Частота модуляции, Гц	Микроструктура шва, $\times 300$	Микроструктура околошовной зоны, $\times 600$
Непрерывное излучение		
100		
1000		
2000		
3000		
5000		
10000		

Рис. 6. Микроструктуры шва и околошовной зоны в сварных соединениях, полученных при различных частотах модуляции лазерного излучения

сварки трещины отсутствуют как в зоне шва, так и в металле ЗТВ.

При воздействии непрерывным излучением в сварном шве формируется дендритная аустенитная структура (рис. 5), характерная для высокой скорости кристаллизации при лазерной сварке. В зоне, примыкающей к линии сплавления, формируются крупные равноосные зерна аустенита размером до 10 мкм.

Лазерная обработка нержавеющей стали модулированным излучением с частотой модуляции 100 Гц приводит к формированию сварочных линий в структуре шва, что существенно ухудшает его качество. Структура шва неоднородна в результате смешанной формы кристаллизации, что вызывает формирование крупных кристаллитов с участками видманштеттовой структуры. Из-за структурной неоднородности микротвердость раз-



личных участков шва отличается (см. рис. 4), что может привести к ухудшению механических свойств сварного соединения.

При частоте модуляции лазерного излучения 1000 Гц однородность структуры не улучшилась, однако появились участки с ячеистой формой кристаллизации (см. рис. 5). При этом микротвердость шва выровнялась. Увеличение частоты модуляции лазерного воздействия до 2000 Гц обеспечивает преимущественно ячеистую форму кристаллизации и формирование мелких аустенитных зерен размером около 3 мкм с ферритными выделениями по границам. При данном режиме сварки формируется структурно-однородный шов, микротвердость различных зон которого одинакова.

Аналогичная однородная микроструктура наблюдалась также при частоте модуляции 3000 Гц. Характеристики распределения основных компонентов и микротвердости практически не отличались от предыдущего эксперимента. Следует отметить, что в этих случаях линия сплавления становится более тонкой, а аустенитное зерно более мелким, что положительно влияет на механические свойства околошовной зоны.

Дальнейшее повышение частоты импульсов до 5000 и 10000 Гц привело к ухудшению однородности формирования структуры шва и ее огрублению.

Данный способ лазерной сварки был применен при разработке технологии изготовления мелких серий прямошовных тонкостенных сварных труб различного диаметра из нержавеющей сталей, используемых для изготовления сильфонов и сильфонных сборок.

## Выводы

1. Использование модулированного лазерного воздействия при сварке образцов нержавеющей стали влияет на морфологические особенности кристаллизации структурных составляющих сварного соединения.

2. Повышение частоты модуляции способствует увеличению количества центров кристаллизации и формированию мелкозернистой ячеистой аустенитной структуры.

3. Применение наклонной формы заднего фронта импульса лазерного излучения обеспечивает замедление роста кристаллитов, что также

приводит к формированию мелкозернистой ячеистой структуры шва.

4. Влияние частоты модуляции на структуру сварного шва имеет предельный характер. Определены оптимальные параметры модулируемого импульса на структуру металла шва. Формирование структурно-однородного шва с минимальным размером аустенитного зерна около 3 мкм происходит при частоте модуляции 2...3 кГц. При этом расчетные значения оптимальной степени переохлаждения находятся в пределах 125...136 К.

1. Морозов В. П. Влияние колебательного механизма кристаллизации на процесс измельчения первичной структуры металла шва и зоны термического влияния // Наука и образование. — 2010. — № 9. — С. 1–18.
2. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
3. Левин Ю. Ю., Ерофеев В. А., Судник В. А. Физико-технологические условия получения бездефектных соединений при импульсной лазерной сварке // Свароч. пр-во. — 2008. — № 4. — С. 20–24.
4. Пат. 2120364 РФ, МКИ В 23 К26/00. Способ импульсной лазерной сварки и установка для его осуществления / С. В. Каюков, А. А. Гусев, Г. В. Самарцев, А. Н. Канавин. — Заявл. 27.09.96; Опубл. 20.10.98, Бюл. № 28, 2002.
5. Пат. 2186667 РФ, МКИ В 23 К26/20. Способ лазерной сварки металлов и сплавов / Т. Т. Басиев, А. В. Федин, Е. А. Чашин, И. В. Шилов. — Заявл. 10.01.2000; Опубл. 10.08.02.
6. Пат. 2269401 РФ, МКИ В 23 К26/20. Способ лазерной сварки металлов / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, С. В. Шалупаев и др. — Заявл. 27.08.04; Опубл. 10.02.06.
7. Bruncko J. Laserove mikrozvaranie kovovych materialov // Zvaranie-svarovani. — 2010. — № 9/10. — S. 219–222.
8. Celen S., Karadeniz S., Ozden H. Effect of laser welding parameters on fusion zone morphological, mechanical and microstructural characteristics of AISI 304 stainless steel // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. — 2008. — 39, № 11. — S. 845–850.
9. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки: Уч. пос. для вузов / Под ред. А. Г. Григорьянца. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 664 с.
10. Назарчук А. Т., Снисарь В. В., Демченко Э. Л. Получение равнопрочных сварных соединений закаливающихся сталей без подогрева и термической обработки // Автомат. сварка. — 2005. — № 5. — С. 41–46.
11. Раямяки П., Кархин В. А., Хомич П. Н. Определение основных характеристик температурного поля для оценки типа затвердевания металла шва при сварке плавлением // Свароч. пр-во. — 2007. — № 2. — С. 3–7.
12. Силлен Р. Введение в термический анализ металлов // Литье Украины. — 2005. — № 5. — С. 6–8.
13. Теория сварочных процессов: Учеб. пособие для вузов / В. Н. Волченко, В. М. Ямпольский и др.; под ред. В. В. Фролова. — М.: Высш. шк., 1988. — 559 с.
14. YLR-100-AC. Ytterbium fiber laser: User's guide. — IPG Laser GmbH, 2009.

The effect of power modulation frequency and shape of laser radiation pulses on formation of structure of the weld metal in welding of austenitic steel of the 18-10 type was investigated. It is shown that the pulse laser radiation can affect solidification of the weld metal and formation of the fine-grained structure in it. The optimal range of the modulation frequency was determined.

Поступила в редакцию 10.11.2011



## МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 7025-T6

М. ОЛАБОДЕ, П. КАХ, Дж. МАРТИКАЙНЕН (Техн. ун-т г. Лаппеенранта, Финляндия)

Приведены обозначения, характеристики, области применения, свойства и особенности свариваемости высокопрочных алюминиевых сплавов. Исследовано влияние тепловложения на микроструктуру и твердость сварных соединений алюминиевого сплава 7025-T6. Показано, что ограничение тепловложения при сварке высокопрочных алюминиевых сплавов имеет важное значение для обеспечения высоких физико-механических свойств металла соединений.

*Ключевые слова:* высокопрочные алюминиевые сплавы, сплав 7025-T6, импульсная сварка МИГ, тепловложение, твердость по Виккерсу, металлургические особенности

Легкие сварные металлические конструкции пользуются большим спросом и их рынок постоянно растет, увеличиваются объемы потребления, появляются новые виды алюминиевых конструкций. Сварка является важным процессом в изготовлении этих конструкций. Способ сварки плавлением высокопрочных алюминиевых сплавов с использованием импульсной МИГ характеризуется регулируемым тепловложением и является перспективным, но только при условии понимания поведения этих материалов под влиянием термодеформационного цикла сварки.

Многочисленные исследования [1–3] показали, что ранее применяемые технологии сварки высокопрочных сплавов не обеспечивают хорошую свариваемость из-за наличия в их составе меди. Вместе с тем внедрение новых технологий, например, импульсной сварки МИГ, импульсной сварки ТИГ и сварки трением с перемешиванием обеспечивает хорошую свариваемость сплавов по сравнению с традиционной сваркой плавлением. В настоящее время сварка трением с перемешиванием зарекомендовала себя наиболее приемлемым процессом, поскольку имеет металлургические преимущества над сваркой плавлением, выраженные, в частности, в обеспечении высокой стойкости швов против образования кристаллизационных и ликвационных трещин [4].

В данной статье обобщены сведения, касающиеся классификации высокопрочных алюминиевых сплавов, их обозначений, свойств, применения, свариваемости и характерных дефектов сварки. Экспериментальная часть статьи включает описание экспериментальной установки и результатов оценки влияния тепловложения на твердость сварных соединений указанных сплавов. В ней также исследована свариваемость высокопрочных алюминиевых сплавов. Особое внимание уделено изучению влияния тепловложения при роботизи-

рованной импульсной сварке МИГ на металлургические процессы.

**Классификация сплавов.** Алюминиевые сплавы разделяют на литые и деформированные и идентифицируют с помощью четырехзначной системы. Обозначение литых сплавов такое же, как деформированных сплавов, но с десятичным значением между третьим и четвертым числом (123,0). Вторая часть обозначения (через дефис) учитывает процесс изготовления сплава. Если вторая часть начинается с «Т» (например, Т6), то это значит, что сплав был термически обработан. Числа указывают на тип обработки и другие последующие механические обработки: например, Т6 — сплав термообработан в растворе и подвергнут искусственному старению [5]. В идентификации сплава «F» обозначает готовое изделие, а «O» — состояние после отжига. Дополнительный суффикс показывает специальную термообработку, «Н» — деформационное упрочнение (нагартовку). За обозначением «Н» всегда следуют хотя бы две цифры, которые свидетельствуют об уровне нагартовки и других термообработок, выполняемых для получения требуемых механических свойств. Обозначение «W» указывает на термообработку в растворе. Далее следует время, показывающее период естественного старения, например, «W» — 1 ч.

Полное обозначение сплава включает две части, которые уточняют химический состав и историю изготовления, например, в 7025-T6, 7025 — химический состав, в то время как Т6 — особенности изготовления. Алюминий классифицируется на основе химического состава главным образом в двух категориях с учетом типа производства: деформированные и литые алюминиевые сплавы. Другие сплавы могут подразделяться по типу деформационного упрочнения или термообработки [6]. Категория деформированного алюминия большая, так как алюминий может формироваться в фасонные профили с применением любого процесса, включая экструзию, протяжку, ковку, прокатку и т. д. Деформированные сплавы должны быть пластичными в изготов-



Таблица 1. Классификация литых алюминиевых сплавов [6–9]

Серия	Элемент сплава	Содержание, %	Временное сопротивление, МПа	Среднее значение серии, МПа
1xx.x	Алюминий	99,0	—	—
2xx.x	Медь	4,0...4,6	145...476	302
3xx.x	Кремний	5...17	159...359	249
	С добавлением меди и/или магния	5...17	159...359	249
4xx.x	Кремний	5...12	131...296	187
5xx.x	Магний	4...10	138...331	232
7xx.x	Цинк	6,2...7,5	241	241
8xx.x	Олово	—	138...221	163
9xx.x	Другие	—	—	—

лении, а литые алюминиевые — текучими по природе, чтобы заполнять литейную форму [7].

*Литые алюминиевые сплавы* в своей классификации идентифицируют четырьмя цифрами. Десятичная точка отделяет третью и четвертую цифры. Первая цифра обозначает группу сплава, включающего основной легирующий элемент (табл. 1) [8]. Следующие две цифры отображают сам алюминиевый сплав или его чистоту. В сплавах серии 1xx.x эти две цифры указывают на чистоту в процентах. Например, 150,0 — минимальная чистота 99,5 % алюминиевого сплава. В группах от 2x.x до 9xx.x серий две цифры указывают на различные сплавы, присутствующие в группе. Последняя цифра иллюстрирует формирование изделия. Например, «0» — это отливка, а «1» или «2» — слиток, основанный на его химическом составе.

Следующая модификация оригинальных групп литых алюминиевых сплавов идентифицируется путем добавления серийной буквы впереди цифровых обозначений. Серийные буквы добавляют в алфавитном порядке, начиная с А, но без I, O,

Q и X [8], X остается в экспериментальных сплавах. Четыре цифры в обозначении используют для деформированных сплавов, первая — для группы сплавов на базе основного легирующего элемента (табл. 2), вторая — это модифицирование сплава или количество примесей. «O» во второй цифре обозначает основной сплав. Цифры 1–9 указывают на различные модификации сплава с небольшим изменением в их химических составах. В серии 1xxx вторая цифра — модификация в пределах примесей «O» — сплав с естественным пределом примесей, 1–9 — специальный контроль, выполненный по одному или более примесям или по легирующему элементу. Последние две цифры указывают на чистоту сплава [6].

В серии 1xxx две последние цифры обозначают уровень чистоты сплава. Например, в 1070 или 1170 подразумевается, что хотя бы 99,7 % алюминия содержится в сплаве, 1050 или 1250 — не менее 99,5, а 1100 или 1200 — 99 % алюминия. Для всех других серий алюминиевых сплавов (2xxx–8xxx) два последних числа не имеют особого значения, но используются для идентификации сплавов в группе [6, 8].

**Высокопрочные сплавы и сверхпрочные алюминиевые сплавы.** Алюминиевые сплавы с пределом текучести от 300 МПа и выше рассматриваются как высокопрочные, в то время как сверхпрочными алюминиевыми сплавами являются сплавы с пределом текучести 400 МПа и более. Они обычно включены в серии 2xxx, 7xxx и 8xxx. Нет строгих указаний о том, к какой серии эти сплавы принадлежат. Например, в двух сплавах одной и той же серии предел текучести может значительно отличаться, точнее, эти два сплава могут классифицироваться только по определенным свойствам сплавов в серии. Однако в общем среднем диапазоне предела текучести серии используется для идентификации высоко- и сверхпрочных алюминиевых сплавов (табл. 2).

*Свойства и применения высоко- и сверхпрочных алюминиевых сплавов.* Серия 2xxx включает сплавы типа Al–Cu. Основными характеристиками серии 2xxx являются термообработываемость, высокая прочность при комнатных и повышенных температурах, а также большой диапазон временного сопротивления (68,9...520 МПа) [9, 10]. Сплавы могут соединяться механически, некоторые из них — свариваться [10]. В их химическом составе обычно имеет место наличие меди и некоторых других

Таблица 2. Классификация деформированных алюминиевых сплавов [6, 8, 9]

Серия	Элемент сплава	Содержание, %	Временное сопротивление, МПа	Среднее значение серии, МПа
1xx.x	Алюминий	99,0	10,0...165	94,4
2xx.x	Медь	1,9...6,8	68,9...520	303
3xx.x	Марганец	0,3...1,5	41,4...285	163
4xx.x	Кремний	3,6...13,5	70,0...393	275
5xx.x	Магний	0,5...5,5	40,0...435	194
6xx.x	Магний и кремний	0,4...1,5	40,0...435	241
	Кремний	0,2...1,7	40,0...435	241
7xx.x	Цинк	1,0...8,2	80,0...725	399
8xx.x	Другие	—	110...515	365





нове изучения различных сварочных процессов можно утверждать следующее:

в объеме промышленных технологий 94 % сплавов могут быть сварены и свыше 50 % имеют оптимальную свариваемость;

диапазон толщин свариваемых сплавов в условиях промышленности составляет 0,1...450,0 мм (верхний предел достигается при одном проходе с использованием ЭЛС);

высоких скоростей сварки (5...3 м/мин) можно достичь при меньших толщинах (0,8...3,0 мм), например, при лазерной сварке стыковых соединений;

металлургические проблемы, вызванные влиянием тепловложения при сварке, характерны для всех способов сварки плавлением и уменьшаются при использовании процессов с концентрированной энергией, где тепловложение носит локальный характер, и ЗТВ намного меньше. Сварка трением с перемешиванием сопровождается меньшими металлургическими проблемами;

в процессах, где используется концентрированная энергия, наличие пленки  $Al_2O_3$  на поверхностях заготовок, подвергающихся сварке, не влияет на качество металла шва, хотя желательна их предварительная очистка;

и ЭЛС, и сварку трением с перемешиванием можно выполнять без использования газа для защиты сварочной ванны от окисления;

традиционные способы сварки дают более низкие значения механических свойств металла, чем у основного материала в пределах 20...35 %. Значительное влияние на уровень свойств оказывает металлургическое состояние основного материала. В частности, незначительное или даже нулевое уменьшение обнаружено только в процессе сварки трением с перемешиванием, при котором усталостные характеристики стыковых соединений полностью соответствуют показателям основного металла;

все способы сварки плавлением, за исключением сварки трением с перемешиванием, сопровождаются появлением пор в металле швов;

для сварочного оборудования одного назначения, лазерной технологии и технологии сварки трением с перемешиванием требуются в 10 раз большие капиталовложения, чем для традиционных, но производительность сварки при этом намного выше. В настоящее время большинство конструктивных элементов из алюминиевых сплавов, полученных способом сварки трением с перемешиванием, имеют на 10 % большую стоимость, чем с использованием процесса сварки МИГ [13].

*Подготовка под сварку.* Сварка высокопрочных алюминиевых сплавов в отличие от стальных изделий во многом зависит от комплекса подготовительных операций изделия. Он включает вы-

бор рационального сварочного процесса, способа хранения сплава, транспортировки и подготовки деталей, применяемых в сварной конструкции [1].

В зависимости от толщины изделия соединения следует подвергать скосу кромки и в некоторых случаях применять подкладку для качественного формирования корня шва. Требуется зачищать поверхность соединения для удаления тонкого слоя оксида алюминия  $Al_2O_3$  механическими абразивными материалами, подобно зачистке щетками из нержавеющей стали или химическим травлением. Слой  $Al_2O_3$  сам восстанавливается при обработке щетками. Он является ответственным за коррозионную стойкость алюминиевых сплавов [14], а также отрицательно влияет на нестабильность горения дуги, поскольку электрически непроводим.  $Al_2O_3$  гигроскопичен и обычно содержит влагу. Кроме того, температура его плавления составляет 2060 °С [4, 14], что значительно выше, чем температура плавления (476...657 °С) сплавов серии 7xxx [9]. Рекомендации по подготовке изделий представлены в табл. 3.

*Защитный газ.* Основная функция защитного газа — защита металла шва от атмосферы, потому что нагретый металл (примерно до точки плавления) может вступать в реакцию с атмосферным воздухом и образовывать соединения оксидов и нитридов. Что касается алюминия, то он легко вступает в реакцию с кислородом при комнатной температуре. Таким образом, при выборе защитного газа должны учитываться следующие критерии [4, 16–18]:

способность генерировать плазму и обеспечивать механизмы и характеристики горения стабильной дуги;

обеспечение хорошего отделения расплавленного металла от проволоки и выполнение требуемого режима переноса металла;

защита сварочной головки (в непосредственной близости от дуги), жидкой ванны и конца проволоки от окисления;

помощь в получении хороших провара и профиля валика шва;

отсутствие помех в процессе корректировки скорости сварки;

предотвращение подрезов;

ограничение операций по зачистке стыков после сварки;

способность не ухудшать механические свойства металла шва.

Рекомендуемым защитным газом при импульсной сварке МИГ алюминиевых сплавов серии 7xxx является аргон [1, 17]. Скорость подачи при этом составляет около 20 л/мин. Смесь аргона и гелия может также применяться вместе, а гелий отдельно. Гелий увеличивает провар шва, обеспечивает более высокую энергию дуги и в ре-



Таблица 3. Рекомендации по подготовке изделия к сварке [4, 9, 14, 15]

Решаемая задача	Рекомендации
Снижение напряженного состояния	Избегать внезапных изменений толщины, поскольку они действуют как концентраторы напряжений в шве. Лучше сделать плавный переход в сечении шва при необходимости соединения с более тонким сечением Обеспечивать хорошую подгонку до сварки. Алюминий чувствителен к плохой подгонке, соединения должны иметь минимальный зазор для проникновения присадки. Большие зазоры могут легко заполняться сталью, а это провоцирует чрезмерные напряжения в алюминии из-за теплового сжатия, способствует сокращению долговечности шва Обеспечивать надежную центровку соединения перед сваркой. Шов с плохой стыковой провоцирует изгибающие напряжения, что также сокращает долговечность шва Убедиться, что разделка соединения соответствует толщине материала и чертежу
Создание условий для получения хорошего качества швов	Убедиться, что условия окружающей среды подходят для выполнения сварки. Алюминий очень чувствителен к загрязнению водородом, поэтому любая влага создает пористость и влечет за собой появление дефектных швов. Сварка в полевых условиях является особенно опасной, поскольку продукты конденсации могут появляться на соединении при холодной погоде либо под дождем. Если сварку выполняют в условиях атмосферной влажности, во избежание водородной пористости следует применять умеренный предварительный нагрев Необходимо учитывать также риск сквозняка, нарушающего газовую защиту, даже при сухом соединении. Сварку алюминия лучше всего выполнять в специально предназначенном теплом, сухом помещении, свободном от сквозняков
Очистка соединения перед сваркой	Алюминий очень чувствителен к загрязнению соединения. Его очистку следует начинать с протирания чистой тканью, смоченной растворителем типа ацетон, для удаления масла в области соединения и по 25 мм с обеих сторон соединения. Все изделия из алюминия имеют очень тонкий слой оксида на поверхности. Он плавится при температуре около 2060 °С [4, 14] в отличие от чистого алюминия при 660 °С [9]. Этот оксид следует удалять после обезжиривания перед сваркой с помощью механической очистки щеткой из нержавеющей стали, предназначенной только для алюминия. Нельзя применять точильный диск, поскольку он изготовлен из корунда (оксида алюминия) и будет оставлять частицы на поверхности. Шов желательно выполнять сразу после очистки. Сварка после трехчасовой очистки неприемлема
Пригодность сварочных материалов	Обычно сварку выполняют с помощью аргона или смеси аргона и гелия, при этом важна их чистота (минимальная чистота составляет 99,995%). При сварке МИГ проволока обычно подается довольно чистой, достаточно снять катушку со сварочной машины и поместить ее в чистый пластиковый мешок на ночь или хотя бы накрыть для сохранения чистоты

зультате повышенную скорость наплавки [1, 19]. При сечении менее 50 мм<sup>2</sup> следует использовать гелий [4]. Более подробная информация приведена в табл. 4.

*Дефекты при сварке высокопрочных и сверхпрочных алюминиевых сплавов.* Сварка алюминия является весьма ответственным процессом несмотря на более низкую температуру плавления, чем у стали, по следующим причинам [6, 18]:

постоянно присутствующую на поверхности металла оксидную пленку требуется удалять непосредственно перед сваркой;

наличие остаточных напряжений вызывает трещинообразование в металле шва из-за высокого значения теплового коэффициента расширения алюминия;

при высоком уровне теплопроводности алюминия подразумевается, что повышенное тепловложение увеличивает возможность деформации и образования трещин;

высокие значения скорости усадки вызывают образование кристаллизационных трещин;

большая растворимость водорода в жидком алюминии способствует образованию пористости и высокой склонностью чувствительности сплавов серий 2xxx, 7xxx и 8xxx к возникновению трещин в металле шва.

Основными дефектами при сварке высокопрочных алюминиевых сплавов являются образование горячих трещин, пористости, разупрочнение соединения, не восстанавливаемого при старении после сварки, низкая пластичность металла шва (ухудшение металла ЗТВ) и чувствительность соединения к образованию коррозионных трещин под напряжением. Характерные дефекты шва и способы их удаления приведены в табл. 5 [15].

**Экспериментальная установка.** Эксперимент выполняли с использованием установки для роботизированной импульсной сварки МИГ. Схематическая компоновка оборудования для проведения сварочного процесса МИГ представлена на рис. 2.

Движение робота программировали и выполнили несколько швов на опытных образцах, после



Таблица 4. Защитные газы для сварки МИГ алюминия [16]

Вид переноса металла	Защитный газ	Характеристика
Струйный	100 % аргона	Лучший перенос металла и стабильность дуги; минимальное разбрызгивание; хорошее действие очистки
	35 % аргона + 65 % гелия	Большее тепловложение, чем у 100%-го аргона; улучшенные характеристики плавления на более толстом материале; уменьшение пористости
	25 % аргона + 75 % гелия	Большее тепловложение, уменьшение пористости, минимальная очистка
Короткими замыканиями	Аргон и аргон + гелий	Достаточное количество аргона на листовом металле; аргон–гелий предпочтителен для более толстых основных материалов

чего сваривали сплав 7025-Т6. Произведено значительное количество наплавов, их параметры сравнивали при изучении влияния тепловложения на свойства металла шва. Далее исследовали влияние скорости сварки.

Применяли горелку Fronius Robacta 5000 360 (максимальный ток 500 А) для сварки МИГ. Горелку соединяли с роботом Motorman (EA1900N), который имеет шесть осей и может поддерживать точность выполнения сварочного процесса до ±0,06 мм. Для обеспечения очистки зоны шва впереди дуги горелку устанавливали под углом 10° в направлении шва. Вылет присадочной проволоки составлял 2 мм, а расстояние от сопла до изделия (длина вылета) — 18 мм. В качестве защитного газа использовали аргон 99,995 %, а присадочной проволоки — алюминий 4043. Изделие представляло собой пластину толщиной 5 мм и площадью 100×250 мм, на которую наплавляли валики. Соединения очищали механически с помощью щетки из нержавеющей стали, предназначенной только для алюминиевых заготовок. Проводили множество испытаний, для которых выбрали шесть разных образцов алюминиевого сплава 7025-Т6. Первые три образца (А–С) имели одинаковую скорость подачи с целью оценки влияния скорости сварки (10, 20, 30 мм/с), другие три (D–F) — приблизительно одинаковое тепловложение для исследования эффекта постоянного тепловложения в шов. Частота тока импульса составляла примерно 250 Гц в каждом шве.

Скорость подачи проволоки для образцов А–С была постоянной на уровне 10 м/мин, а тепловложение  $Q$  (кДж/мм) для каждого образца рассчитывали с помощью следующего уравнения [21]:

$$Q = \frac{UI \times 60}{1000S} 0,8,$$

где  $U$  — напряжение на дуге, В;  $I$  — ток, А;  $S$  — скорость сварки, мм/мин; 0,8 — эффективность сварки импульсным процессом МИГ. Для образцов D–F тепловложение было примерно постоянным, а скорость подачи проволоки выбирали соответственно 10, 12 и 14 м/мин.

В качестве основного материала использовали пластину из сплава 7025-Т6 толщиной 5 мм, сварочную проволоку — из алюминия ER 4043 (табл. 6). Типичные механические свойства проволоки следующие: предел текучести — 55 МПа, временное сопротивление — 165 МПа, удлинение 18 %, защитный газ — 99,995 % аргона, который подавали через горелку для предохранения сварочной ванны от влияния атмосферы, поскольку нагретый металл (примерно до температуры плавления) обычно способен вступать в реакцию с атмосферой с образованием оксидов и нитридов. Алюминий легко взаимодействует с кислородом при комнатной температуре. Рекомендуемый защитный газ для сварки сплава серии 7xxx с помощью импульсной сварки МИГ — аргон [17].

Твердость металла швов определяли по Виккерсу. Испытания выполняли с помощью нагрузки в 3 кг кончиком алмазного инструмента на поперечном сечении подготовленного образца со швом. Вмятины сделаны примерно на расстоянии 1 мм от поверхности шва в ряд (рис. 3). Расстояния между вмятинами составляли 0,7 мм, их форма напоминала ромб, глубина зависела от твердости материала. Размеры диагоналей вмятины измеряли, а среднее значение диагоналей сверяли в таблице твердости  $HV 3$  для определения уровня твердости. Затем их проставляли в

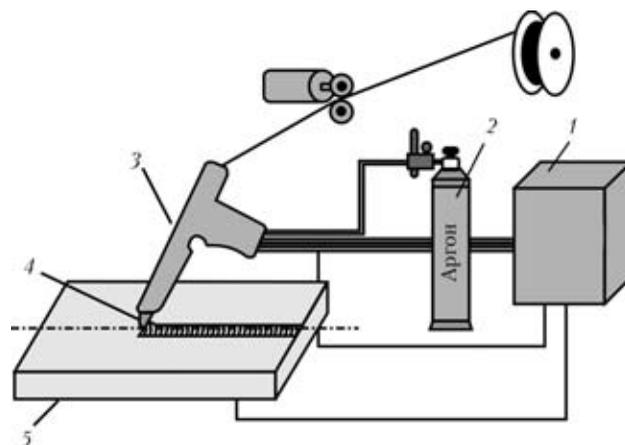


Рис. 2. Схема процесса сварки МИГ: 1 — источник питания; 2 — защитный газ (аргон); 3 — горелка; 4 — присадочная проволока; 5 — алюминиевый образец



Таблица 5. Дефекты в алюминиевых швах и их устранение [11, 15, 18, 20]

Вид дефекта	Причина	Предотвращение
Оксидные включения	Недостаточная очистка соединения Наличие оксидного слоя на сварочной проволоке или присадочных прутках Острые кромки в канавке соединения	Тщательная очистка проволочной щеткой до сварки и после каждого прохода, затем чистая протирка Очистить проволоку и прутки, потирая их прессованной стружкой из нержавеющей стали или «Scotchbrite» Использование свежей проволочной катушки. Удалить острые кромки в разделке шва
Пористость в шве	Недостаточная степень защиты Цветные пенетранты, смазка Слишком высокое значение тока сварки Загрязненный защитный газ Неправильный угол наклона горелки Слишком высокая скорость перемещения Загрязненные проволока или прутки Наличие влаги	Увеличить поток газа; устранить сквозняки; уменьшить вылет электрода Полностью устранить всевозможные дефекты Очистить поверхности растворителем Держать смазки подальше от области шва Уменьшить ток и вернуться к сварочному процессу Проверить газовые шланги на свободные соединения или повреждения Установить правильный угол и вернуться к сварочному процессу Установить правильную скорость и вернуться к сварочному процессу Очистить проволоку или прутки растворителем То же Предварительно нагреть и очистить поверхность
Пористость в зоне плавления	Высокая насыщенность водородом основного металла	Улучшить дегазацию Сократить добавки натрия Применить 100%-ю гелиевую защиту
Холодное растрескивание	Сильное зажатие металлических заготовок соединения	Ослабить зажимные клещи. Подогрев
Горячее растрескивание	Избыточное расплавление основным металлом Высокая переходная температура	Уменьшить ток сварки. Добавить больше присадочной проволоки Уменьшить ток сварки, увеличить интервал охлаждения между проходами и соблюдать последовательность швов
Подрезы	Высокий ток сварки Скорость перемещения слишком высокая и недостаточное количество присадочного металла Большая длина дуги	Уменьшить ток Уменьшить скорость и вернуться к сварочному процессу. Добавить большее количество присадочного металла Уменьшить длину дуги
Непровары	Низкий ток сварки Высокая скорость перемещения дуги Плохая разделка соединения Неправильный угол наклона горелки Ненадежное прерывание дуги	Увеличить ток и вернуться к сварочному процессу Уменьшить скорость перемещения и вернуться к процессу сварки Улучшить разделку свариваемых кромок Установить правильный угол горелки и вернуться к процессу сварки Постепенно уменьшить ток дуги Если возможно, применить контроль «Заполнение кратера», «Контрольный шов» на последних 25 мм валика
Нахлестка	Недостаточная скорость перемещения Очень низкий ток сварки Избыток присадочного металла Неправильный угол наклона горелки	Увеличить скорость и вернуться к процессу сварки Увеличить ток Уменьшить добавление присадочного металла Поменять угол наклона горелки
Прожоги	Недостаточная скорость перемещения Ток сварки слишком высокий Зазор соединения слишком широкий Подогрев детали	Увеличить скорость перемещения Уменьшить ток сварки Уменьшить зазор и улучшить подгонку кромок Снизить температуру металла между проходами

Таблица 6. Химический состав алюминиевых сплавов 7025 (пластина) и 4043 (присадочная проволока), мас. %

Объект исследования	Al	Be	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Прочие
7025	91,5	—	0,30	0,10	0,40	1,50	0,60	0,30	0,10	5,0	0,5
ER 4043	—	0,0001	—	0,01	0,20	0,01	0,01	4,80	0,02	0,01	—

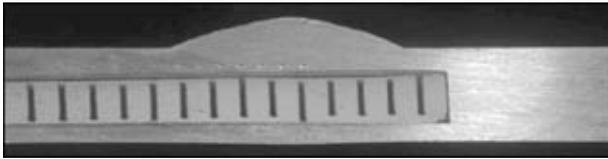


Рис. 3. Испытание твердости на сварном образце. Вмятины расположены на расстоянии 1 мм от поверхности и 0,7 мм друг от друга

диаграмму относительно расстояния каждого вдавливания от центральной линии шва.

*Влияние тепловложения на высокопрочные сплавы при сварке.* Микро- и макроструктуры, а также внешний вид шва образцов А–С представлены на рис. 4–6. Микроструктура каждого образца показана с помощью увеличительного объектива  $\times 8$  для анализа несмешанной зоны, частично расплавленной зоны, ЗТВ и основного металла. Переход вокруг границы раздела шва имеет важное значение. На снимках изображены зерна, прошедшие трансформацию, из чего можно сделать вывод о механических свойствах металла швов. При сравнении образцов А–С (рис. 4–6) видно, что размеры зерен вокруг границы раздела шва небольшие при низком тепловложении, и наоборот. К тому же переходной поток ячеек вокруг границы раздела шва по мере передвижения от несмешанной зоны к ЗТВ плавный с более высоким уровнем тепловложения, зерна крупнее. При низком тепловложении, как на образце С (рис. 6), переход не настолько ровный, как на границе раздела шва. Тепловложение обратно пропорционально скорости сварки: при увеличении скорости сварки уменьшается тепловложение, а с его увеличением повышается скорость остывания. Это обеспечивает эпитаксиальный рост, а также увеличение ячеек, как видно при сравнении микроструктуры образцов А–С. На образце А (рис. 4) ЗТВ составляет приблизительно 17 мм от линии центра шва, что является наиболь-

шим расстоянием среди трех образцов. Таким образом, можно утверждать, что чем больше тепловложение, тем шире ЗТВ.

Зерна несмешанной зоны на образце С по сравнению с образцами В и А очень мелкие, что указывает на то, что малое тепловложение в образцы А и В недостаточно для образования расплавления ванны и проплавления металла шва. Большое тепловложение и высокая скорость сварки вызвали необходимость применения значительной энергии для нагрева образца С, в результате чего валик шва становится широким и с более широким корнем.

У образца С более мелкие зерна, чем у образцов В и А, что свидетельствует о том, что при большом тепловложении и высокой скорости сварки образование ядра происходит лучше. В образце С зерна растут хуже, чем у образцов А и В, поскольку алюминий распространяет тепло относительно быстро через тепловые раковины; небольшое тепловложение свидетельствует о большом влиянии теплопроводности алюминия на микроструктуру шва (образец С остывает быстро).

При сравнении образцов D–F (рис. 7–9) можно отметить, что при поддержании относительно постоянного тепловложения и варьирования скорости сварки в микроструктуре происходят изменения. По мере роста скорости сварки и скорости подачи электрода размер зерен также увеличивается. К тому же, повышенная скорость сварки приводит к более грубой структуре металла шва и околошовной зоны аналогично влиянию тепловложения в швах при сварке сплава 7025-T6.

Изучение образцов сплавов D–F показало, что, чем выше скорость подачи, тем глубже проплавление. У образца С постоянная скорость подачи как у А и В, но переход зерен на границе раздела шва между несмешанной зоной и ЗТВ очень резкий. Возможно, это является слабым местом, пос-

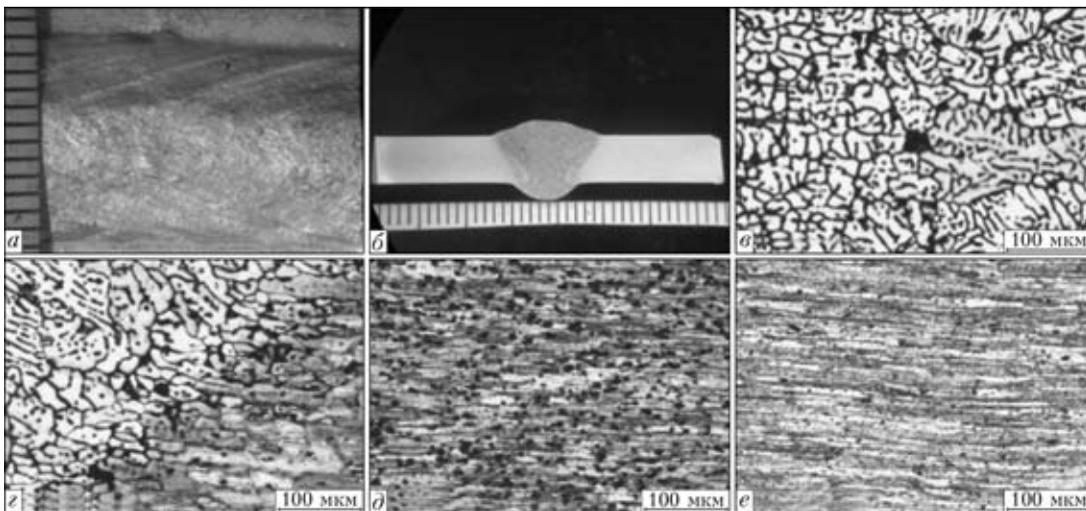


Рис. 4. Результаты экспериментов образца А со скоростью подачи проволоки 10 м/мин при скорости сварки 10 мм/с, тепловложении 0,318 Дж/мм, напряжении на дуге 20,1 В, токе 198 А: а–е — здесь и на рис. 5–9 следующие: а — внешний вид шва; б — макроструктура; в — микроструктура шва; г — частично расплавленная зона; д — ЗТВ; е — основной металл

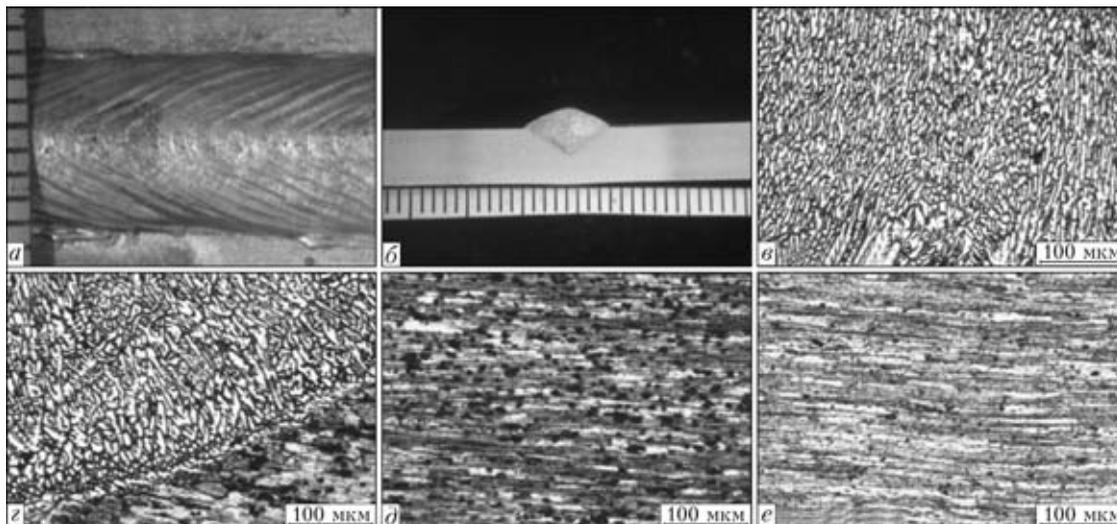


Рис. 5. Результаты экспериментов по сварке образца В со скоростью подачи проволоки 10 м/мин при скорости сварки 25 мм/с, тепловложении 0,127 Дж/мм, напряжении на дуге 19,4 В, токе 205 А

кольку ячейки не настолько заблокированы, как на образце В. На примере образца видно, что чем длиннее период кристаллизации, тем больше размер дендрита [23].

Зерна являются равноосными с дендритами в пределах зерен. Мелкие зерна образуются при малом тепловложении, а крупные — при большом. Например, несмешанная зона на рис. 8 имеет мелкие зерна благодаря небольшому тепловложению (0,106 кДж/мм), в то время как несмешанная зона на рис. 4 — крупные зерна из-за тепловложения в 0,318 кДж/мм. Вариации размера зерен в несмешанной зоне на рис. 4–9 в основном обусловлены количеством тепловложения, поскольку при большом тепловложении скорость охлаждения повышается.

Увеличенная скорость сварки позволяет уменьшить ширину швов даже при меньшем тепловложении (по сравнению с образцами А–F). Образец F имеет качественную структуру шва с уз-

кими сварным швом, ЗТВ и полным проплавлением. Окисление происходило на поверхности. При постоянной скорости сварки большое тепловложение способствует увеличению валика шва и размера ЗТВ. Частично расплавленная зона показывает эпитаксиальный рост, свидетельствующий о зарождении в различных местах на границе раздела шва новых зерен. Между зернами основного металла и зернами металла шва существует произвольная ориентация.

На образцах А–F видно, что при уменьшении отношения температурного градиента  $G$  7025-T6 и скорости роста  $R$  от границ раздела шва к линии его центра характер кристаллизации изменяется от плоскостного до ячеистого, столбчатого и равноосного дендрита поперек границы раздела шва. Соотношение  $G/R$  определяет режимы кристаллизации, обнаруженные в микроструктуре. Образец С имеет минимальный размер зерен в несмешанной зоне. Таким образом, у него наи-

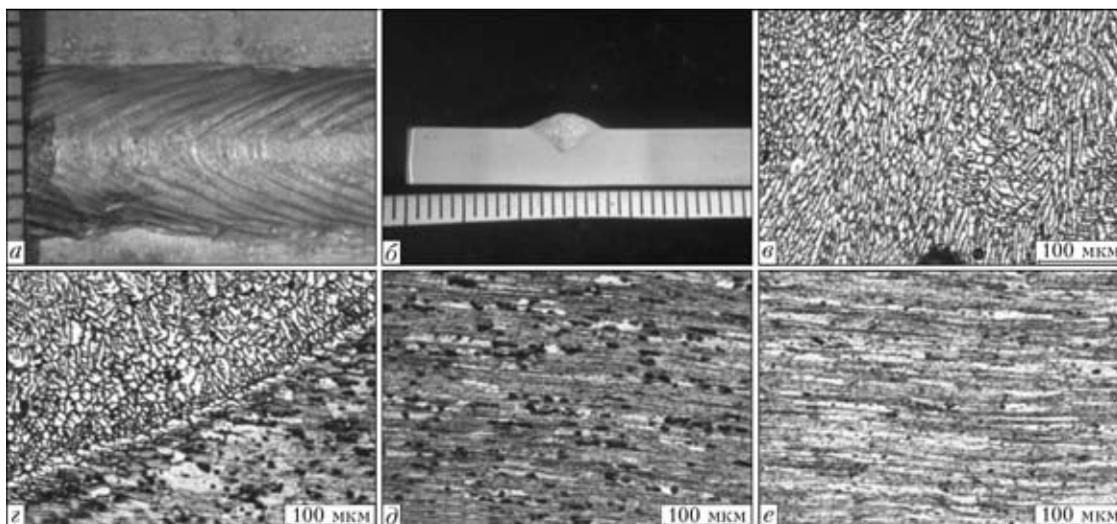


Рис. 6. Результаты исследования образцов С со скоростью подачи проволоки 10 м/мин при скорости сварки 30 мм/с, тепловложении 0,106 Дж/мм, напряжении на дуге 19,4 В, токе 205 А

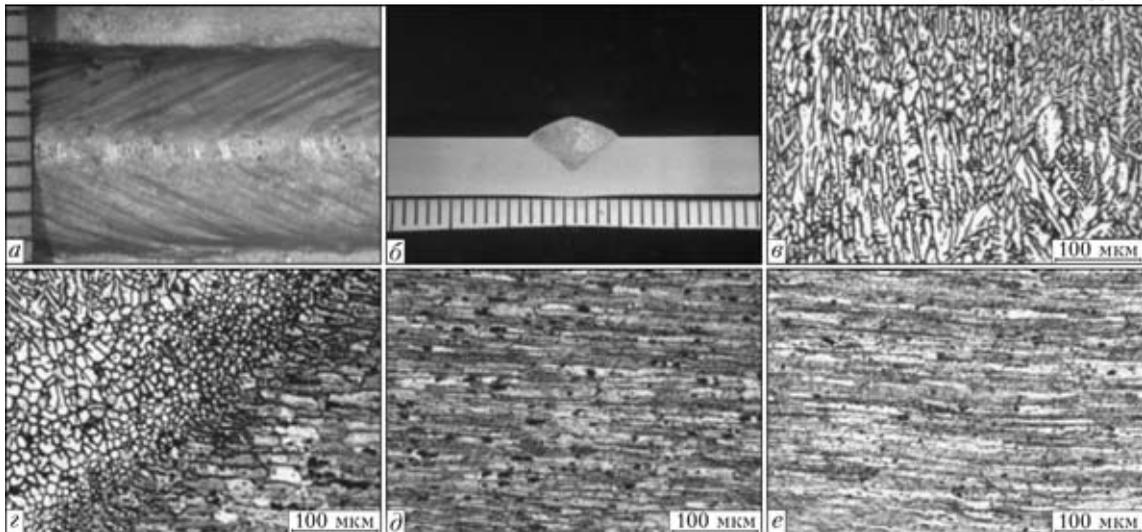


Рис. 7. Результаты исследования образца D со скоростью подачи проволоки 10 м/мин при скорости сварки 20 мм/с, тепловложении 0,16 Дж/мм, напряжении на дуге 19,8, токе 202 А

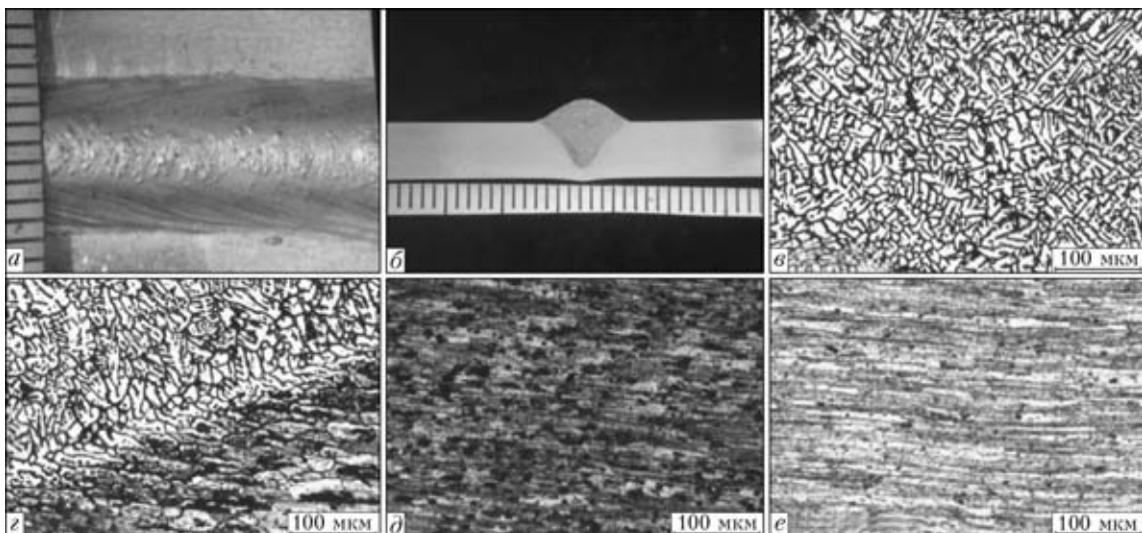


Рис. 8. Результаты исследования образца E со скоростью подачи проволоки 12 м/мин при скорости сварки 24 мм/с, тепловложении 0,163 Дж/мм, напряжении на дуге 20,3 В, токе 241 А

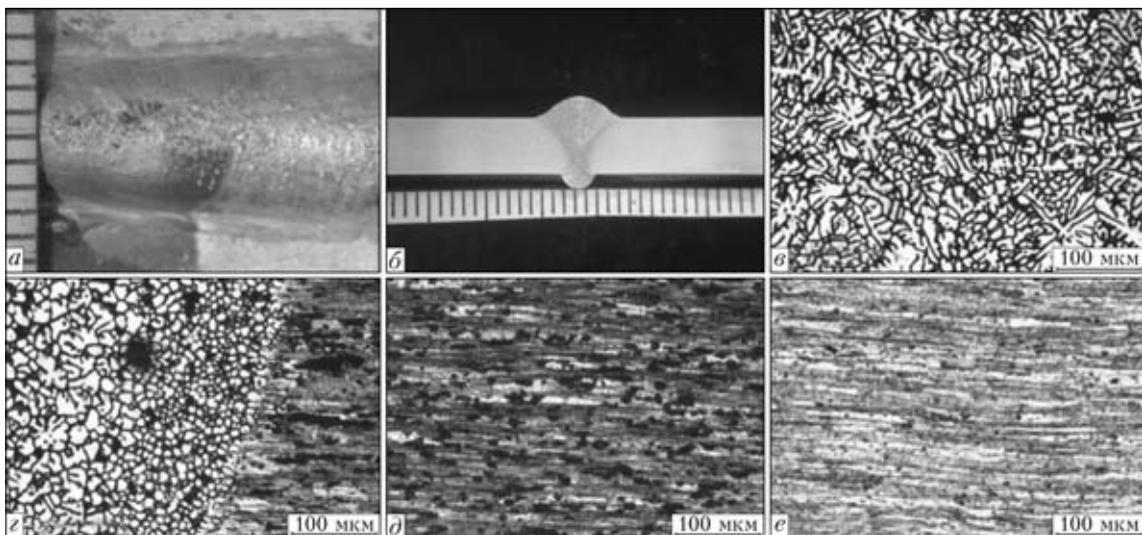


Рис. 9. Результаты исследования образца F со скоростью подачи проволоки 14 м/мин при скорости сварки 28 мм/с, тепловложении 0,158 Дж/мм, напряжении на дуге 20,50 В, токе 278 А

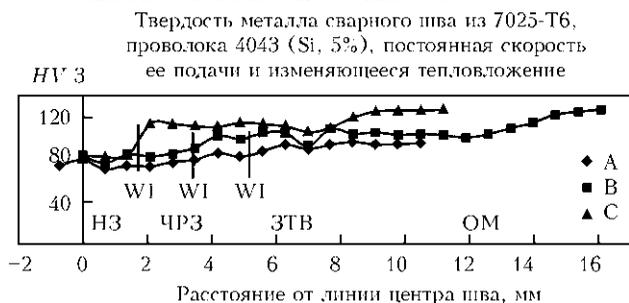


Рис. 10. Распределение твердости в сварных соединениях при различных тепловложениях: для образца А  $Q = 0,318$  кДж/мм; для образца В —  $0,127$ ; для образца С —  $0,106$

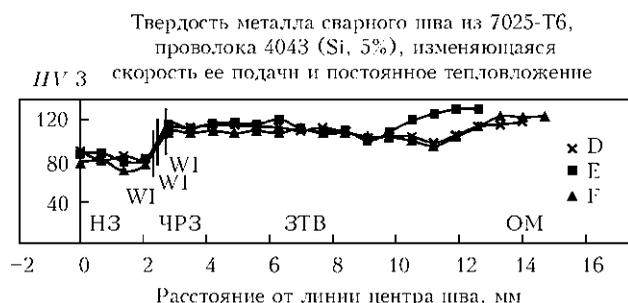


Рис. 11. Распределение твердости в сварных соединениях при различных скоростях подачи проволоки и постоянном тепловложении (около  $0,16$  кДж/мм)

высшие прочность и твердость, поскольку эффект Холла–Петча прогнозирует рост и прочности, и твердости по мере уменьшения размера зерен [25]. Образец F показывает, что полное проплавление шва можно достичь при минимальном тепловложении, если другие параметры шва установлены правильно.

В металле шва обнаружены такие дефекты, как пористость и оксидные включения. Пористость объясняется попаданием газа в процессе сварки, а наличие оксидных включений — плохой газовой защитой (ванна шва контактирует с воздухом).

*Твердость сварных соединений высокопрочных сплавов (7025-Т6).* Испытания на твердость образцов представлены на рис. 10. Вертикальная линия границы раздела шва обозначена WI. Точки на кривой показывают расстояние каждой вмятины от оси шва на оси абсцисс, а уровень твердости — на оси ординат. На рис. 10 указаны характерные участки структуры сварных соединений и основного металла. Образец С имеет минимальное тепловложение  $0,106$  кДж/мм, что дает в результате более высокое значение твердости, образец В — относительно большее тепловложение ( $0,127$  кДж/мм), а в результате — более низкий уровень твердости, чем образец С. У образца А максимальное тепловложение составляет  $0,318$  кДж/мм, твердость является минимальной.

На границе раздела шва с основным металлом у образца С имеет место максимальная твердость, что служит подтверждением высокой твердости границы раздела при большом тепловложении благодаря упрочнению твердого раствора в процессе сварки. Такое тепловложение вызывает растворимость и более значительное упрочнение вследствие процесса кристаллизации. Можно также утверждать, что чем выше тепловложение, тем шире валик шва, и граница раздела шва с основным металлом располагается дальше от оси шва. Испытания на твердость образцов показали эту закономерность при относительно постоянном значении тепловложения. Твердость образцов D и F примерно одинакова, кроме образца E, где есть незначительные изменения, твердость на расстоянии 3 мм от оси шва показывает увеличение

ее значения при удалении от предыдущей точки (около 2 мм от линии центра шва), что объясняется близостью к границе раздела шва с основным металлом. Изучение твердости образцов D–F показало, что для металла шва 7025-Т6 ее значение уменьшается в зоне шва и возрастает по направлению к основному материалу. График твердости представляет собой половину симметричных швов. Можно утверждать, что значения показателя твердости образцов сварных соединений образцов D–F на границе раздела шва близки. Это свидетельствует о том, что постоянное тепловложение, профиль твердости алюминиевого сплава 7025-Т6 являются идентичными. Испытания на твердость образцов D–F (рис. 11) показали, что профили твердости для трех образцов примерно одинаковые. Диапазон границы раздела шва находится в пределах  $0,5$  мм при относительно постоянном значении тепловложения.

## Выводы

1. Исследования показали, что в алюминиевых сплавах 7025-Т6 размер зерен уменьшается по мере снижения тепловложения, а переход ячеек от несмешанной зоны к ЗТВ является более плавным при большом тепловложении. При постоянном тепловложении размер зерен увеличивается, но твердость остается относительно постоянной. В случае большого тепловложения отмечены более широкая ЗТВ, крупнокристаллитная структура шва и более крупные размеры зерна вокруг границы сплавления шва.

2. В сплаве 7025-Т6 большое тепловложение способствует более низким значениям твердости, но в зоне сплавления ее значение одинаково во всех исследуемых образцах. Чем выше уровень тепловложения, тем шире валик шва, тем дальше расположена зона сплавления и глубже проплавление шва. В зависимости от длительности кристаллизации увеличивается количество дендритов, а высокая скорость охлаждения способствует эпитаксиальному формированию ячейки. Сплав 7025-Т6, как и другие высокопрочные алюминиевые сплавы, разупрочняется в ЗТВ, но может быть восстановлен при послесварочной термообработке.



1. *Yeomans S. R.* Successful welding of aluminium and its alloys // Australian Welding J. — 1990. — **35**, № 4. — P. 20–24.
2. *Graeve I. D., Hirsch J.* 7 Series alloys // aluminium-matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=214&pageid=2144417086.
3. *Dickerson P. B., Irving B.* Welding aluminium: It's not as difficult as it sounds // Welding J. — 1992. — **71**, № 4. — P. 45–50.
4. *Mathers G.* Knovel (Firm). The welding of aluminium and its alloys. — Boca Raton, Fla., Cambridge: CRC press; Woodhead publ., 2002.
5. *Maurice S.* Aluminum structures. Handbook of structural engineering. — Second ed. — CRC press, 1997.
6. *Campbell F. C.* Manufacturing technology for aerospace structural materials. — Amsterdam; San Diego: Elsevier, 2006. — 11 p.
7. *Handbook committee and Knovel (Firm).* ASM handbook, Casting. — ASM International, Materials Park, 2008. — Vol. 15. — 937 p.
8. *Kopeliovich D.* Classification of aluminum alloys. — Substances and Technology, 2009.
9. *MatWeb* — the online materials information resource // Matweb, 2010.
10. *Kaufman G. J.* Applications for aluminum alloys and tempers. — ASM International, 2000.
11. *John D.* Heat-treatable alloys // Aluminium design and construction. — New York, 1999. — 301 p.
12. *Aluminum alloys and temper designations 101.* — D. Industries, ed., Dayco Industries, Cal., 1987. — P. 1–5.
13. *Volpone L. M., Mueller S.* Joints in light alloys today: the boundaries of possibility // Welding Intern. — 2008. — **22**, № 9. — P. 597–609.
14. *George E. T., MacKenzie D. S.* Handbook of aluminum. — New York: Marcel Dekker Inc., 2003.
15. *Renshaw M.* The welding of aluminium castings // Aluminium — light strong and beautiful. — A. F. o. S. Africa, 2004. — P. 11–13.
16. *Choosing shielding gases for gas metal arc welding* // Welding J. — 2008. — **87**, № 4. — P. 32–34.
17. *Boughton P., Matani T. M.* Two years of pulsed arc welding // Welding and Metal Fabr. — 1967. — Oct. — P. 410–420.
18. *Olson D. L.* Handbook Committee and American Society for metals. Joining Division 1993 // Welding, Brazing and Soldering. — 1993. — 1299 p.
19. *Blewett R. V.* Welding aluminium and its alloys. — 1991. — № 59 (Oct.). — P. 5.
20. *Ba Ruizhang G. S.* Welding of aluminum-lithium alloy with a high power continuous wave Nd:YAG-laser. — IIW Doc. IV-866–04.
21. *Hirata Y.* Pulsed arc welding // Welding Intern. — 2003. — **17**, № 2. — P. 98–115.
22. *Chandler H.* Hardness testing. — Ohio: ASM International, Materials Park, 1999.
23. *Kou S.* Welding metallurgy. — New York: Wiley-Interscience, Hoboken, 2003.
24. *Hall-petch relationship in friction stir welds of equal channel angular-pressed aluminium alloys / Y. S. Sato, M. Urata, H. Kokawa, K. Ikeda* // Materials Sci. and Eng. A. — 2003. — 354(1/2). — P. 298–305.
25. *Vander Voort G. F.* Metallography and microstructures. — Ohio: ASM International, Materials Park, 2004.

Designations, characteristics, application fields and properties of aluminium alloys are given. Peculiarities of weldability of high-strength aluminium alloys are considered. The effect of heat input on microstructure and hardness of the welded joints on aluminium alloy 7025-T6 has been studied. It is shown that the limitation of heat input in welding of high-strength aluminium alloys is important for ensuring the high properties of metal.

Поступила в редакцию 31.10.2011

## НОВАЯ КНИГА

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И РЕНОВАЦИИ:

Тематическая подборка статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» в 2009–2011 гг. — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2012. — 172 с. Мягкий переплет, 200×290 мм.

Сборник включает 38 статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» за период 2009–2011 гг., по проблемам ремонта, восстановления и реновации изделий ответственного назначения. Авторами статей являются известные в Украине ученые и специалисты в области сварки, наплавки, упорочнения, металлизации и других технологий ревитализации.

Предназначен для научных сотрудников, инженеров, технологов, конструкторов и аспирантов, занимающихся проблемами сварки и других родственных технологий обработки материалов.

Стоимость сборника 160 грн./800 руб. (стоимость указана с учетом стоимости доставки заказной бандеролью соответственно для Украины и России).

#### Заказы на сборник просьба направлять:

Международная ассоциация «Сварка»

03680, г. Киев, ул. Боженко, 11, Украина

тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-54-84, 200-81-45

E-mail: journal@paton.kiev.ua





## ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, СОДЕРЖАЩИХ КВАЗИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ СПЛАВ СИСТЕМЫ Al–Cu–Fe

А. Л. БОРИСОВА, Ю. С. БОРИСОВ, Е. А. АСТАХОВ, доктора техн. наук, А. П. МУРАШОВ, канд. техн. наук, А. Н. БУРЛАЧЕНКО, Т. В. ЦЫМБАЛИСТАЯ, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены результаты исследования теплозащитных свойств плазменных и детонационных покрытий (двухслойных и градиентных), в которых в качестве керамической компоненты использован  $ZrO_2$ , стабилизированный  $Y_2O_3$ , а в качестве металлической — сплав системы Al–Cu–Fe, содержащий квазикристаллическую  $\psi$ -фазу.

*Ключевые слова:* плазменное напыление, детонационное напыление, диоксид циркония, квазикристаллический сплав системы Al–Cu–Fe, теплозащитные покрытия, детали двигателей внутреннего сгорания

Одним из современных путей повышения эффективности работы газотурбинных и дизельных двигателей, увеличения срока службы их компонентов является применение теплозащитных покрытий (ТЗП) [1–4], получивших практическое использование в газотурбинных двигателях (ГТД). В этом случае обычная конструкция ТЗП состоит из трех слоев: NiCrAlY — подслоя, обеспечивающий прочность сцепления ТЗП с поверхностью детали и защиту ее от окисления при рабочих температурах 900...1100 °С;  $Al_2O_3$  — промежуточный слой, служащий барьером для диффузии кислорода к подслою и обеспечивающий адгезию керамики с жаростойким подслоем, и внешний слой  $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ , отличающийся теплоизолирующими свойствами. Для нанесения таких покрытий применяют способы атмосферного плазменного напыления, плазменного напыления при сниженном давлении и электронно-лучевого испарения [1, 5]. В качестве материала деталей для ГТД используют жаропрочные никелевые и железные сплавы.

Другой областью применения ТЗП являются дизельные двигатели, где условия их работы и задачи отличаются от таковых в ГТД. Так, температура нагрева компонентов камеры сгорания в дизелях составляет 350...400 °С. Применение ТЗП позволяет повысить температуру газа в камере сгорания до 850...900 °С, что обеспечивает полноту сгорания топлива, снижение его расхода (на 15...20 %) и увеличение мощности двигателя (на 8 %) [3, 6].

Важнейшей задачей, решение которой связано с использованием ТЗП дизельных двигателей, является повышение экологической эффективности их работы путем снижения объема выбросов в

атмосферу. Результаты исследований показали возможность их уменьшения на 10...11 % [7]. В настоящее время актуальность этой задачи возрастает в связи с ужесточением требований к сокращению объема выбросов в соответствии с переходом в 2012 г. на новый показатель Евро VI [8]. Отличием ТЗП в дизельных двигателях от ГТД является также состав конструктивных материалов дизелей, где все больший объем занимают сплавы алюминия и титана.

Основными способами нанесения ТЗП на поверхность камеры сгорания дизелей является плазменное напыление. Условия формирования ТЗП и их эксплуатации на поверхности таких материалов различны по сравнению с жаропрочными сплавами деталей ГТД. Указанные различия в условиях работы ТЗП для ГТД и дизельных двигателей обуславливают необходимость применения для последних верхних теплоизоляционных слоев с большой толщиной (до 1 мм и более), изменение требований к материалу подслоя, которому не требуется противостоять высокотемпературному окислению и крипу, как в случае покрытий системы Me–Cr–Al–Y [1, 2, 6].

Таким образом, разработка новых составов ТЗП для применения в условиях работы дизельных двигателей и технологии их нанесения на поверхность алюминиевых и титановых сплавов представляет собой актуальную задачу для данной области техники.

В последнее время большой интерес исследователей и технологов вызывают сплавы с квазикристаллической структурой, прежде всего сплавы системы Al–Cu–Fe [9–11]. Так, сплав  $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$ , по своему химическому составу отвечающий области существования квазикристаллической  $\psi$ -фазы, имеет такие характеристики, как низкая теплопроводность (1...2 Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>), высокие значения коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) (1·10<sup>-5</sup> К<sup>-1</sup>) [12], а также твер-



дости (до 10 ГПа) [13], способность к упругому восстановлению ( $H/E < 0,02$ ), коррозионную стойкость во многих агрессивных средах [14–17], жаростойкость до температуры 500 °С [18–21] и износостойкость [22–25]. Все это позволяет предположить возможность использования покрытий из сплава системы Al–Cu–Fe в качестве связующего промежуточного слоя в ТЗП с ZrO<sub>2</sub>, в том числе для алюминиевых сплавов. По теплопроводности этот квазикристаллический сплав близок к ZrO<sub>2</sub>, что снижает уровень внутренних напряжений между слоями подслоя и керамического покрытия, а по КЛТР, равному  $(14...18) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , довольно совместим с защищаемыми деталями из алюминиевых сплавов (КЛТР составляет  $(20...24) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), что должно способствовать снижению остаточных напряжений на границе с основой и повышению прочности сцепления.

В настоящее время довольно хорошо исследованы условия газотермического напыления покрытий из сплава системы Al–Cu–Fe на различные металлы, в том числе алюминий, изучены их свойства [11].

При этом установлено, что основные характеристики покрытий (твердость, теплопроводность, коррозионная стойкость, жаропрочность и др.) зависят от фазового состава напыленного слоя, прежде всего содержания квазикристаллической ψ-фазы.

Зависимость квазикристалличности напыленных покрытий от температурных условий их формирования сопряжена с тем, что размер области существования квазикристаллической ψ-фазы на диаграмме фазового равновесия зависит от температуры. При ее снижении область ψ-фазы сужается, что сопровождается расширением соседней области аппроксимантной кристаллической фазы в результате небольших смещений атомов. Вместе с тем аппроксимантные фазы, расположенные вблизи границ существования квазикристаллической фазы, могут иметь такие же свойства (в том числе теплофизические), как и квазикристаллы [26].

В настоящей работе представлены результаты исследования теплозащитных свойств плазменных и детонационных покрытий различной структуры (двух- и многослойных, градиентных), в которых в качестве материала защитного керамического слоя использован частично стабилизированный диоксид циркония (ZrO<sub>2</sub> + 7 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), а в качестве материала подслоя наряду с традиционным жаростойким сплавом NiCrAlY — такие материалы, как сплав AlCuFe с квазикристаллической ψ-фазой и AlCuFeTiCrSi с аппроксимантной α-фазой.

Теплозащитные свойства покрытий изучали на стенде с помощью прямого нагрева образцов струей пламени газовой горелки ГН-2. Горючей служила смесь C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> и O<sub>2</sub>. Горелку располагали на расстоянии 50...60 мм от поверхности образца.

Образцы нагревали в течение 5 с, затем охлаждали сжатым воздухом в течение 30 с.

Для измерения динамики процесса нагрев–охлаждение в образце диаметром 30 мм и толщиной 3 мм с покрытием из алюминиевого сплава с противоположной стороны от покрытия зачеканивали термопару на глубину 2 мм. Температуру измеряли цифровым мультиметром UT70B. Предел измерения прибора равнялся 40...1000 °С, разрешение — 1 °С, погрешность в зависимости от диапазона измерений — 1...3 %. Для каждого типа покрытий проведено до десяти циклов нагрева–охлаждения, а максимальная температура образца без покрытия, регулируемая расстоянием до образца и тепловой мощностью горелки, составляла около 400 °С. Это соответствовало рабочей температуре деталей поршневой группы двигателей внутреннего сгорания (ДВС), изготавливаемых из алюминиевых сплавов [3].

Исследованы теплозащитные свойства покрытий, полученных детонационным и плазменным способами из порошков AlCuFe с квазикристаллической ψ-фазой, из смеси порошков 75 % AlCuFe + 25 %, содержащего аппроксимантную α-фазу TiCrSi, двухслойных покрытий с керамическим теплозащитным слоем ZrO<sub>2</sub> и металлическим подслоем NiCrAlY или AlCuFe, а также трехслойных и пятислойных (градиентных) покрытий из указанных компонентов. При этом ставилась задача установить зависимость эффективности теплозащитных свойств газотермических покрытий от таких факторов, как способ напыления, структура и фазовый состав покрытия, толщина напыленного слоя.

Для нанесения покрытий использовали технологические параметры, установленные по результатам работ [27–29], посвященных изучению структуры и фазового состава газотермических покрытий AlCuFe, содержащих квазикристаллическую фазу (табл. 1, 2).

На рис. 1–3 представлены типичные структуры некоторых исследуемых покрытий, а на рис. 4 — циклограммы нагрева–охлаждения образцов без покрытия 1 и с покрытиями из сплава системы Al–Cu–Fe, полученных плазменным 2 и детона-

Таблица 1. Режимы плазменного напыления ТЗП

Состав покрытия	Ток, А	Напряжение, В	Расход аргона, л/мин	Дистанция напыления, мм
AlCuFe	500	30	25	130...140
NiCrAlY	500	30	25	130...140
50 % AlCuFe + 50 % ZrO <sub>2</sub>	500	50	25	110...120
50 % NiCrAlY + 50 % ZrO <sub>2</sub>	500	60	25	110...120
ZrO <sub>2</sub>	500	60	25	110...120



Таблица 2. Режимы детонационного напыления ТПЗ

Состав покрытия	Расход рабочих газов, м <sup>3</sup> /ч			Толщина слоя за выстрел, мкм	Дистанция напыления, мм
	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>		
AlCuFe	1,15	0,5	0,4	10...12	110
NiCrAlY	1,15	0,5	0,4	10...12	110
50 % AlCuFe + 50 % ZrO <sub>2</sub>	0,50	2,0	—	6...8	110
50 % NiCrAlY + 50 % ZrO <sub>2</sub>	0,50	2,0	—	6...8	110

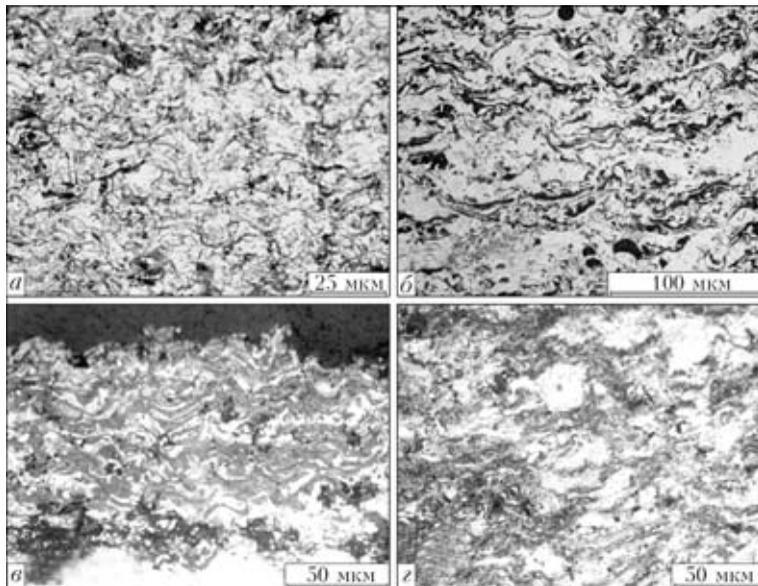


Рис. 1. Микроструктуры однослойных газотермических плазменных (а, б) и детонационных (б, з) покрытий из порошков Al<sub>63</sub>Cu<sub>25</sub>Fe<sub>12</sub> (а, б) и 75 % Al<sub>63</sub>Cu<sub>25</sub>Fe<sub>12</sub> + 25 % Ti<sub>60</sub>Cr<sub>32</sub>Si<sub>8</sub> (в, з)

ционным 3 способами. Анализ циклограмм позволил оценить влияние таких параметров, как способ нанесения, толщина напыленного слоя и содержание в покрытии квазикристаллической ψ-фазы (рис. 5) на эффективность тепловой защиты одинаковых по составу покрытий.

С учетом уровня  $T_{\text{макс}}$  содержание ψ-фазы в исходных порошках AlCuFe оказывает наиболее существенное влияние на эффективность теплозащиты при значении этого показателя до 60 мас. % (рис. 5). Переход к использованию порошков AlCuFe, содержащих 80 % ψ-фазы (при толщине покрытия AlCuFe (800±100) мкм), практически не отражается на уровне  $T_{\text{макс}}$ .

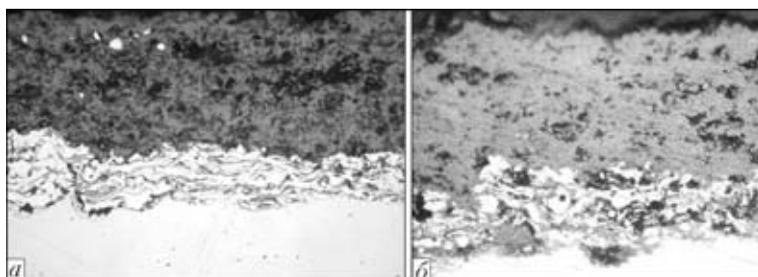


Рис. 2. Микроструктуры (×200) двухслойных газотермических покрытий: а — плазменное NiCrAlY–ZrO<sub>2</sub>; б — детонационное AlCuFe–ZrO<sub>2</sub>

Вместе с тем при оценке влияния толщины покрытия AlCuFe на его теплозащитные свойства (рис. 6) установлено, что данный эффект уменьшается по мере увеличения толщины от 200 до 900 мкм. Снижение уровня  $T_{\text{макс}}$  по сравнению с образцом без покрытия, отнесенное к 100 мкм толщины покрытия, составляет при 200 мкм покрытия 37,0...43,5 °С, при 500 мкм — 23,8...24,0, при 900 мкм — 14,3 °С. Установлено, что плазменные покрытия AlCuFe по сравнению с детонационными эффективнее защищают основу от воздействия тепловых потоков, что, по-видимому, связано с меньшим содержанием в последних ψ-фазы. Это обусловлено более интенсивным окислением материала напыляемых частиц, размер которых при детонационном напылении в 1, 5...2,0 раза меньше, чем при плазменном.

Сравнивали эффективность тепловой защиты газотермических покрытий в зависимости от состава и внутренней структуры (двух- и многослойные) на образцах с одинаковой общей толщиной защитного слоя, равной 500...600 мкм (рис. 6). Анализ результатов показал, что снижение температуры защищаемой основы, свидетельствующее об эффективности теплозащиты покрытий, зависит от следующих факторов:

состава покрытия. Покрытия AlCuFe в качестве металлического компонента превосходят покрытия NiCrAlY (значение  $T_{\text{макс}}$  ниже на 24...47 °С);

структуры покрытия. Наибольший эффект достигается у пятислойных (градиентных) покрытий, которые превосходят традиционные двухслойные покрытия (снижение  $T_{\text{макс}}$  на 125...135 °С против 95 °С);

способа нанесения. Для всех исследуемых покрытий плазменный способ напыления имеет некоторые преимущества по сравнению с детонационным (разница в снижении значения  $T_{\text{макс}}$  составляет 20...30 °С).

С увеличением толщины защитного слоя эффективность защиты возрастает, однако при этом повышается и уровень внутренних напряжений, приводящих к отслоению покрытия от основы из-за различных ТКЛР. С этой точки зрения покрытия AlCuFe имеют преимущества над NiCrAlY при нанесении их на алюминиевые сплавы в связи с близостью значений их ТКЛР. Данные, приведенные на рис. 6, свидетельствуют о наличии оптимального значения толщины пок-

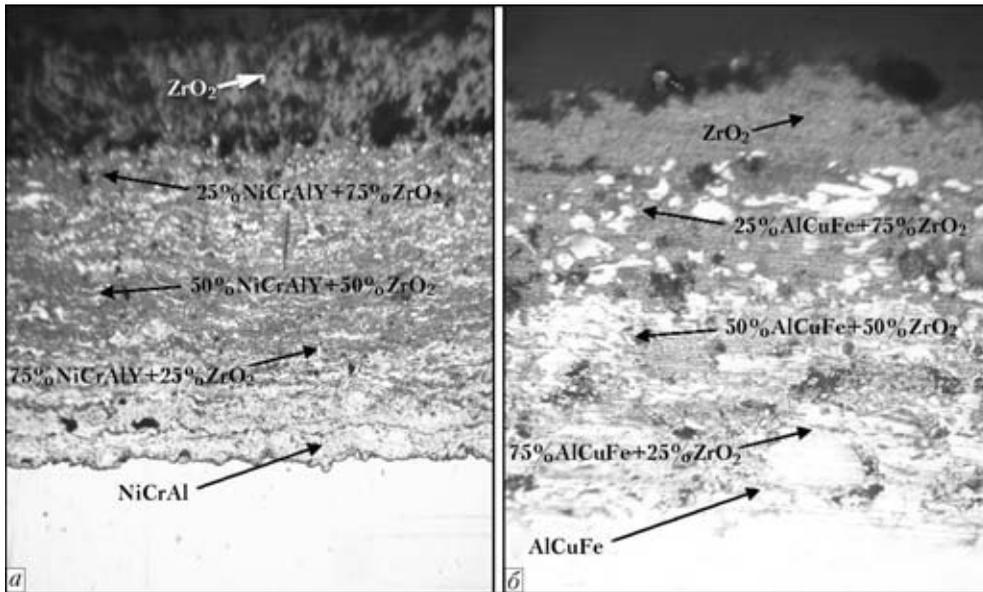


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 100$ ) градиентных газотермических покрытий: *a* — детонационное NiCrAlY–(75 % NiCrAlY + 25 % ZrO<sub>2</sub>)–(50 % NiCrAlY + 50 % ZrO<sub>2</sub>)–(25 % NiCrAlY + 75 % ZrO<sub>2</sub>)–ZrO<sub>2</sub>; *б* — плазменное AlCuFe–(75 % AlCuFe + 25 % ZrO<sub>2</sub>)–(50 % AlCuFe + 50 % ZrO<sub>2</sub>)–(25 % AlCuFe + 75 % ZrO<sub>2</sub>)–ZrO<sub>2</sub>

рытия в связи с затухающим ее влиянием на эффективность тепловой защиты.

Поскольку приведенные результаты показали перспективность использования покрытий AlCuFe, содержащих квазикристаллическую  $\psi$ -фазу, в качестве теплозащитных для деталей ДВС из сплава алюминия, представляет интерес изучить их поведение в условиях, приближенных к рабочим для ДВС.

Испытаны плазменное покрытие AlCuFe, полученное при использовании для напыления порошка с 45 % квазикристаллической  $\psi$ -фазы, детонационное покрытие из порошка сплава AlCuFeTiCrSi, содержащее 50 % аппроксимантной  $\alpha$ -фазы, и для сравнения плазменное покрытие из ZrO<sub>2</sub> с подслоем из сплава NiCrAlY. Покрытия наносили на поршень ДВС диаметром 78 мм, высотой 76 мм, изготовленный из алюминиевого сплава (рис. 7). Толщина покрытия составляла (450 $\pm$ 50) мкм. Испытания проводили на стенде

(рис. 8) с использованием нагрева поверхности поршня горелкой, расположенной на расстоянии (55 $\pm$ 5) см от поверхности поршня. Нагрев осуществляли в течение 3 с, охлаждение — в течение 30 с, усреднение динамики нагрева днища поршня проводили по результатам 10 термоциклов (рис. 9).

Установлено, что предельная температура днища поршня в течение 3 с нагрева пламенем га-

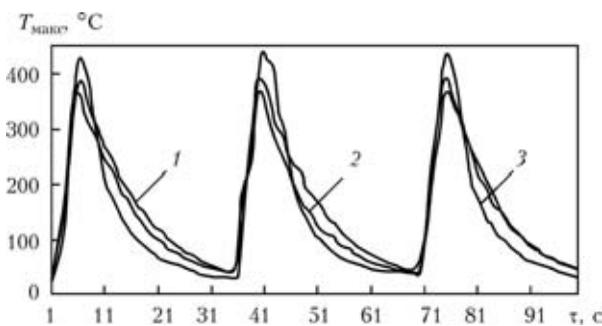


Рис. 4. Циклограмма нагрева и охлаждения образцов из алюминиевого сплава без покрытия *1* и с покрытием из AlCuFe, нанесенным плазменным *2* и детонационным *3* способами (толщина покрытия 400 мкм, содержание квазикристаллической  $\psi$ -фазы — 60 %)

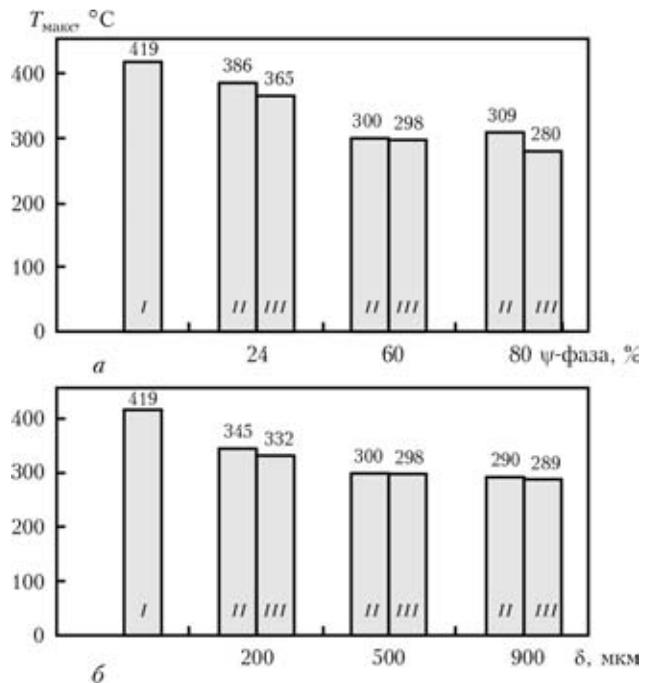


Рис. 5. Эффективность теплозащиты газотермического покрытия толщиной (800 $\pm$ 100) мкм из порошка Al<sub>63</sub>Cu<sub>25</sub>Fe<sub>12</sub> в зависимости от содержания в исходном порошке  $\psi$ -фазы (*a*) и толщины напыленного слоя при содержании  $\psi$ -фазы в исходном порошке 60 % (*б*): *I* — без покрытия; *II* — детонационное; *III* — плазменное покрытие

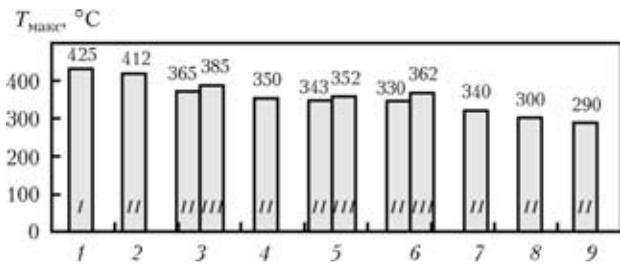


Рис. 6. Эффективность теплозащиты плазменных и детонационных покрытий: 1 — без покрытия; 2 — NiCrAlY; 3 — AlCuFe; 4 — NiCrAlY + ZrO<sub>2</sub>; 5 — NiCrAlY + (50 % NiCrAlY + 50 % ZrO<sub>2</sub>); 6 — AlCuFe + (50 % AlCuFe + 50 % ZrO<sub>2</sub>); 7 — NiCrAlY + (75 % NiCrAlY + 25 % ZrO<sub>2</sub>) + (50 % NiCrAlY + 50 % ZrO<sub>2</sub>) + (25 % NiCrAlY + 75 % ZrO<sub>2</sub>) + ZrO<sub>2</sub>; 8 — AlCuFe + (75 % AlCuFe + 25 % ZrO<sub>2</sub>) + (50 % AlCuFe + 50 % ZrO<sub>2</sub>) + (25 % AlCuFe + 75 % ZrO<sub>2</sub>) + ZrO<sub>2</sub>; 9 — AlCuFeTiCrSi + (75 % AlCuFeTiCrSi + 25 % ZrO<sub>2</sub>) + (50 % AlCuFeTiCrSi + 50 % ZrO<sub>2</sub>) + (25 % AlCuFeTiCrSi + 75 % ZrO<sub>2</sub>) + ZrO<sub>2</sub>; обозначение I–III см. на рис. 5



Рис. 7. Поршень из алюминиевого сплава с теплозащитным покрытием

зовой горелки при отсутствии покрытия составляет 102 °С, для покрытий ZrO<sub>2</sub> с подслоем NiCrAlY, AlCuFe и AlCuFeTiCrSi — соответственно 71, 60 и 56 °С.

Полученные экспериментальные данные о поведении материалов из сплава системы Al–Cu–Fe, содержащего квазикристаллическую ψ-фазу, и сплава системы Al–Cu–Fe–Ti–Cr–Si с аппроксимантной структурой (α-фазой) в качестве теплозащитных покрытий на поверхности деталей из алюминиевых сплавов, свидетельствуют об их высокой эффективности. В условиях циклического нагрева пропан-кислородной струей горелки они по показателю максимально достигаемой температуры основы превосходят традиционное двухслойное теплозащитное покрытие — NiCrAlY/ZrO<sub>2</sub>. Такие теплофизические свойства исследуемых покрытий наряду со значениями ТКЛР, близкими к таковым алюминиевых сплавов, делают их перспективными при разработке

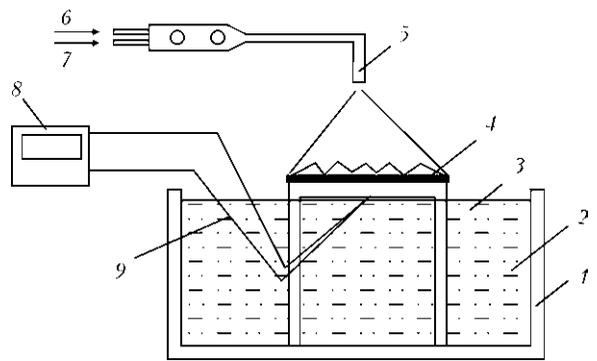


Рис. 8. Схема стенда для испытания теплозащитных свойств квазикристаллических покрытий: 1 — ванна; 2 — вода; 3 — поршень; 4 — покрытие; 5 — газопламенная горелка; 6 — кислород; 7 — пропан; 8 — прибор UT70B; 9 — термопара

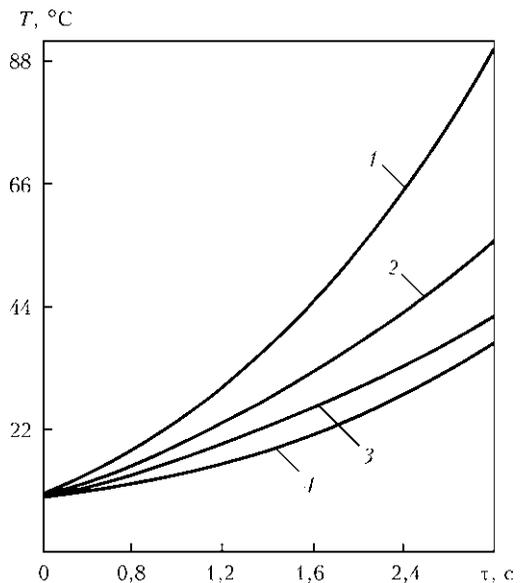


Рис. 9. Динамика нагрева поршня газовой горелкой: 1 — без покрытия; 2 — ZrO<sub>2</sub> с подслоем NiCrAlY; 3 — AlCuFe; 4 — AlCuFeTiCrSi

теплозащитных покрытий для дизельных двигателей, изготавливаемых из легких сплавов. При работе ДВС с теплозащитным покрытием снизятся потери тепла в системе охлаждения, повысится рабочая температура в камере сгорания, улучшатся технико-экономические показатели работы дизельного двигателя. Уменьшение температуры деталей двигателя позволит снизить интенсивность их износа.

1. Теплозащитные покрытия на основе ZrO<sub>2</sub> / А. Ф. Ильющенко, В. С. Ивашко, В. А. Оковитый, С. Б. Соболевский. — Минск: НИИ ПМ с ОП, 1998. — 128 с.
2. Коломыйцев П. Т. Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов. — М.: Металлургия, 1991. — 237 с.
3. Никитин М. Д., Кулик А. Я., Захаров Н. И. Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей дизеля. — Л.: Машиностроение, 1977. — 168 с.
4. Zhu D., Miller R. A. Thermal barrier coatings for advanced gas turbine and diesel engines. — NASA/TM, 1999. — № 209453. — 12 p.
5. Moskal G. Thermal barrier coatings: characteristics of microstructure and properties. Generation and directions of de-



- velopment of bond // *J. Achiev. in Mat. and Manufac. Eng.* — 2009. — **37**, № 2. — P. 323–331.
6. *Development of alternative thermal barrier coatings for diesel engines* / R. Soltani, H. Samadi, E. Garcia, T. W. Coyle // *Proc. of SAE Intern.* — Toronto, 2005. — № 1. — 6 p.
  7. *Buyukkaya E., Engine T., Cerit M.* Effects of thermal barrier coating on gas emissions and performance of a LNR engine with different injection timings and valve adjustments // *Energy Conversion and Management.* — 2006. — **47**. — P. 1298–1310.
  8. *Bailey N., Mill B., Whyman P.* New, low cost thermal barrier coating developed specifically for diesel engine applications to solve heat issues associated with 2013 Euro VI emissions introduction // *Automotive Industry Today.* — 2011. — P. 2.
  9. *Huttunen-Saarivirta E.* Microstructure, fabrication and properties of quasicrystalline Al–Cu–Fe alloys: a review // *J. of Alloys and Compounds.* — 2004. — **363**. — P. 150–174.
  10. *Адеєва Л. І., Борисова А. Л.* Квазікристалічні сплави як новий перспективний матеріал для захисних покриттів // *Фізика і хімія твердого тіла.* — 2002. — **3**, № 3. — С. 454–464.
  11. *Газотермічні покриття, що містять квазікристалічну фазу, властивості і застосування (Огляд)* / А. Л. Борисова, Ю. С. Борисов, Л. І. Адеєва та ін. // *Там само.* — 2005. — **6**, № 1. — С. 124–136.
  12. *Haber Kern R., Lindqvist P., Fritsch G.* Transport properties of quasicrystalline AlCuFe // *J. of Non-Crystalline Solids.* — 1993. — **153/154**. — P. 303–307.
  13. *Edagava K., Kajiyama K., Takeuchi S.* Thermal expansion and Gruneisen parameters of quasicrystals // *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* — 1999. — **553**. — P. 403–408.
  14. *Коррозионная стойкость газотермических покрытий на основе сплава AlCuFe, содержащих квазикристаллическую фазу* / Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова, В. Ф. Гольник, З. Г. Ипатова // *Автомат. сварка.* — 2007. — № 2. — С. 31–36.
  15. *Rudiger A., Koster U.* Corrosion behavior of Al–Cu–Fe quasicrystals // *Mat. Sci. and Eng.* — 2000. — **294/296**. — P. 890–893.
  16. *Hot corrosion of AlCuFeCr quasicrystalline coating on titanium alloys with NaCl deposit* / Chungeng Zhou, Rui Cai, Shengkai Gong, Huibin Xu // *Surface and Coatings Technology.* — 2006. — **201**. — P. 1718–1723.
  17. *Massiani Y., Ait Yaazza S., Dubois J. M.* Electrochemical corrosion behaviour of quasicrystalline coatings in dilute acetic acid // *Proc. of the 5th Intern. conf. on Quasicrystals.* — 1995. — P. 790–793.
  18. *Oxidation behavior of Al–Cu–Fe nanoquasicrystal powders* / V. Srinival, P. Barua, T. B. Chosh, B. S. Murty // *J. of Non-Crystalline Solids.* — 2004. — **334/335**. — P. 540–543.
  19. *Yamasaki Michiaki, Tsai An Pang.* Oxidation behavior of quasicrystalline Al<sub>63</sub>Cu<sub>25</sub>Fe<sub>12</sub> alloys with additional elements // *J. of Alloys and Compounds.* — 2002. — **342**. — P. 473–476.
  20. *Application of quasicrystalline materials as thermal barriers in aeronautics and future perspectives of use for these materials* / A. Sanchez, F. J. Garcia de Blas, J. M. Algaba et al. // *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* — 1999. — **553**. — P. 447–457.
  21. *Oxidation of quasicrystalline and crystalline AlCuFe thin film in air* / A. Haugeneder, T. Eisenhammer, A. Mahr et al. // *Thin Solid Films.* — 1997. — **307**. — P. 120–125.
  22. *Dubois J. M., Kang S. S., Von Stebut J.* Quasicrystalline low-friction coatings // *J. Mat. Sci. Lett.* — 1991. — **10**. — P. 537–541.
  23. *Microstructure and wear behavior of quasicrystalline thermal sprayed coatings* / D. J. Solderet, P. D. Krotz, R. L. Daniel Jr, M. F. Smith // *Proc. of the 8th National therm. spray conf. (Houstin, Sept. 11–15, 1995).* — Houstin, 1995. — P. 627–632.
  24. *Friction and wear behavior of thermally sprayed Al–Cu–Fe quasicrystal coatings* / S. De Palo, S. Usmani, S. Sampath et al. // *Ibid.* — 1997. — P. 135–139.
  25. *Nanoquasicrystalline Al–Cu–Fe–based alloys. Pt II: Mechanical properties* / M. Galano, F. Audebert, A. Garcia Escorial et al. // *Acta Materiala.* — 2009. — **57**. — P. 5120–5130.
  26. *Goldman A. I., Kelton R. F.* Quasicrystals and crystalline approximants // *Amer. Phys. Soc. Rev. of Modern Physics.* — 1993. — **65**, № 1. — P. 213–230.
  27. *Многослойные теплозащитные плазменные покрытия ZrO<sub>2</sub>–NiCrAlY* / А. Л. Борисова, Л. И. Адеєва, А. Ю. Туник и др. // *Автомат. сварка.* — 2010. — № 10. — С. 29–36.
  28. *Плазменные покрытия на основе ZrO<sub>2</sub> с использованием в качестве металлического подслоя сплава AlCuFe* / А. Л. Борисова, Л. И. Адеєва, А. Ю. Туник и др. // *Там же.* — 2010. — № 4. — С. 32–36.
  29. *Исследование структуры и фазового состава детонационных теплозащитных покрытий из квазикристаллического сплава* / Е. А. Астахов, Г. С. Каплина, Н. Н. Кокорина, А. И. Кильдий // *Материалы для работы в экстремальных условиях: Сб. тр. междунар. конф. (Киев, 29–30 сент. 2009 г.).* — Киев, 2009. — С. 101–105.

Given are the investigation results on thermal-barrier properties of plasma and detonation coatings (two-layer and graded), in which ZrO<sub>2</sub> stabilised by Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is used as a ceramic component, and alloy Al–Cu–Fe containing the quasi-crystalline  $\gamma$ -phase is used as a metallic component.

Поступила в редакцию 10.01.2012



## КОНДЕНСАТОРНАЯ ПРИВАРКА ШПИЛЕК В ВАКУУМЕ

Академик **Б. Е. ПАТОН**, **Д. М. КАЛЕКО**, канд. техн. наук, **А. Р. БУЛАЦЕВ**, **В. Ф. ШУЛЫМ**, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты исследований конденсаторной приварки шпилек из алюминиево-магниевого сплава АМг3 и нержавеющей стали 10Х18Н9Т в условиях среднего и высокого вакуума. Показано, что сильноточный кратковременный импульсный разряд, при котором значительная часть испарившегося металла сохраняется в зазоре между свариваемыми поверхностями, может быть использован для стыковой приварки в вакууме деталей компактного сечения к листовому материалу. Экспериментально доказана возможность приварки шпилек диаметром до М6 при давлении 1,33 Па с прочностью на статический разрыв равной прочности материала шпильки.

*Ключевые слова:* конденсаторная сварка в вакууме, дуговой разряд, приварка шпилек, алюминиевый сплав, нержавеющая сталь, вольт-амперные характеристики, макро-структура, механические свойства

Футурологические исследования многих ученых однозначно показывают, что выживание человечества при ускоренном потреблении разного рода земных ресурсов возможно только при условии выхода в космическое пространство. Уже сегодня на Луне с помощью космических аппаратов найдены полезные ископаемые. Кроме того, отсутствие там атмосферной экранизации солнечного излучения дает возможность использовать неиссякаемую (в границах исторического времени) энергию Солнца для удовлетворения потребностей человека, которые увеличиваются в геометрической прогрессии.

В последние годы возобновились разговоры о целесообразности создания научных лабораторий на Луне и планетах Солнечной системы. В 2004 г. президент США представил новую космическую программу, в которой значительное место уделяется освоению межпланетного пространства. В соответствии с планами Администрации американские астронавты должны создать на поверхности спутника Земли станцию для работы там «в течение достаточно продолжительного времени».

Поэтому своевременным является утверждение [1] о том, что «космические корабли и станции, а также инфраструктура экспедиционных поселений на поверхности Луны, рассчитанные на долгосрочную эксплуатацию в условиях космоса, должны быть оснащены комплексами сварочной аппаратуры для выполнения монтажных и ремонтных работ при строительстве и эксплуатации объектов, а экипажи кораблей и экспедиций должны быть научены основам сварочных технологий и иметь практические навыки выполнения указанных работ».

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины накоплен большой опыт [2] по

сварке металлов в вакууме и невесомости, а также институт инициировал эксперименты по сварке металлов в открытом космосе на аппаратуре и по технологии, им разработанной. В ходе выполненных работ на листовом материале установлено [3], что по сравнению с электронно-лучевой все остальные способы сварки имеют недостатки, затрудняющие их использование в условиях космоса.

Однако условия монтажа на объектах космической техники и их ремонта в космосе требуют расширения номенклатуры привариваемых деталей крепежными элементами, из которых наиболее широко используют шпильки разного вида и конструкций.

Все отмеченное выше обуславливает интерес к проверке возможности получить в вакууме дуговой разряд в миллисекундном интервале времени. Именно эту продолжительность имеет приварка шпилек дугой, которая горит при разряде конденсаторов.

Авторам известна только одна работа [4] по приварке шпилек в условиях, имитирующих космическую среду. Эксперименты проводили со шпильками из алюминиевых сплавов А1 5000 (Al-Mg) и А1 2319 (Al-Cu), а также нержавеющей стали SUS 305 (12Х18Н12) диаметром М5. Условия вакуума были ограничены возможностями лабораторного оборудования, а именно  $10^{-4}$  торр (13,3 Па). Ниже показаны существенные отличия между сваркой в низком и высоком ( $10^{-5}$  торр) вакууме. Поэтому предыдущий опыт не позволяет достоверно оценить возможность использования конденсаторной приварки шпилек в открытом космосе. Электрические характеристики процесса, численные показатели прочности и металлографические исследования сварных образцов не приведены в работе [4].

В качестве источника энергии в наших экспериментах использовали установку К747МВ, разработанную в ИЭС им. Е. О. Патона [5]. Вместо обычного сварочного пистолета использовали сварочную головку на штативе, которая распола-

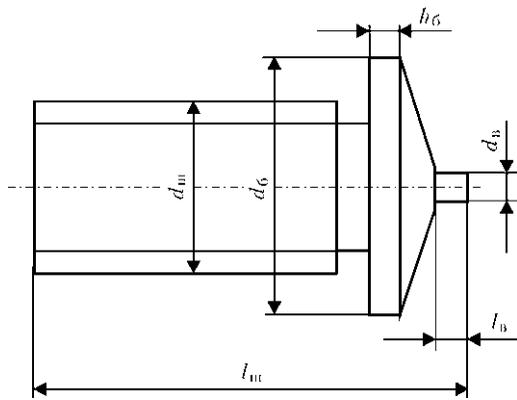


Рис. 1. Конструктивные размеры шпильки РТ для приварки разрядом конденсаторов

гальса в вакуумной камере, управлялась выносным пультом и выполняла те же операции, что и сварочный пистолет.

Эксперименты проводили со шпильками типа РТ диаметром М4 и М6 из АМг3 и 10Х18Н9Т, соответствующими ISO 13918 (рис. 1). Выбор материалов соответствовал условиям применения в космическом пространстве [6]. В соответствии со стандартом размеры шпильки не зависят от материала, из которого она изготовлена. Размеры шпильки диаметром М4 и М6 имеют следующие значения:  $l_{ш} = 20$  мм;  $h_{б} = 1,2$  мм;  $d_{б} = 5,5$  мм и 7,5 (для М6);  $d_{в} = 0,65$  мм (для М4) и 0,75 (для М6);  $l_{в} = 0,55$  мм (для М4) и 0,80 (для М6).

Сварку в форвакууме ( $10^{-2}$  торр) и высоком вакууме вели на режимах, обеспечивающих получение прочного соединения при атмосферных условиях. В соответствии с ISO 14555:2006 соединение считается прочным, если выдерживает изгиб шпильки на  $60^{\circ}$ . Если стандартные испытания подтверждали сохранение прочности соединения, режим сварки считали удовлетворительным, проводили осциллографирование процесса (Textronix TDS2000B) и фоторегистрацию результатов испытания на изгиб.

Известны два основных метода конденсаторной приварки шпильки: с предварительным зазором и предварительным контактом [7]. Оба метода можно использовать для сварки нержавеющей стали, но алюминиевые сплавы хорошо свариваются только с предварительным зазором. Од-

Параметры режима сварки сплава АМг3 и стали 10Х18Н9Т

Материал	Диаметр шпильки	Напряжение зарядки, В	Длина начального зазора, мм	Усилие сжатия, Н
АМг3	М4	100	2,5	104,6
	М6	180	3,0	104,3
10Х18Н9Т	М4	120	2,2	104,9
	М6	140	2,0	105,0

Примечание. Во всех экспериментах емкость батареи конденсаторов составляла 96 мФ.

нако уже первые эксперименты в вакуумной камере показали, что методом с предварительным контактом даже в форвакууме не удастся получить стабильные прочные соединения шпилек М4 из стали 10Х18Н9Т. Анализ осциллограмм (рис. 2) показал, что при сварке с предварительным контактом продолжительность дуговой стадии разряда более чем в 2 раза превышает длительность горения дуги при сварке с предварительным зазором. Кроме того, и разрядный ток при первом способе значительно больше, чем при втором. Это приводит к тому, что за время горения дуги при сварке с предварительным контактом металл из зоны сварки в значительной мере испаряется и оставшегося объема недостаточно для создания прочного соединения. На такой характер процесса указывают и подрезы по периметру стыка.

Исходя из этого, все последующие эксперименты проводили методом конденсаторной приварки шпилек с предварительным зазором.

Параметры режима сварки исследуемых соединений приведены в таблице. Они сохранялись неизменными для условий сварки при атмосферном и низком давлениях с целью последующего сравнения характеристик дуги и сварных соединений.

При сварке шпилек из алюминиевого сплава значения тока (рис. 3) и напряжения (рис. 4) практически не зависят от давления воздуха. При сварке стальных шпилек в высоком вакууме увеличивается «инкубационное» время между первичным касанием деталей и «взрывом» тонкого выступа на торце шпильки, предназначенного для

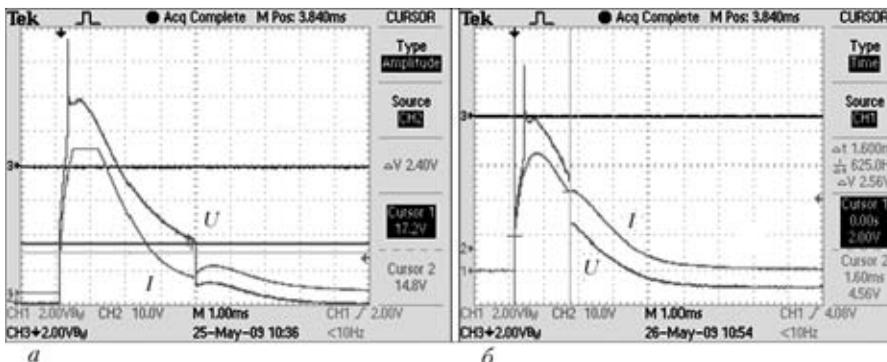


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения дуги при разряде конденсаторов в низком ( $10^{-2}$  торр) вакууме при сварке шпилек из стали 10Х18Н9Т диаметром М4 с предварительным контактом (а) и предварительным зазором (б) (напряжение зарядки конденсаторов 120 В, емкость 96 мФ)

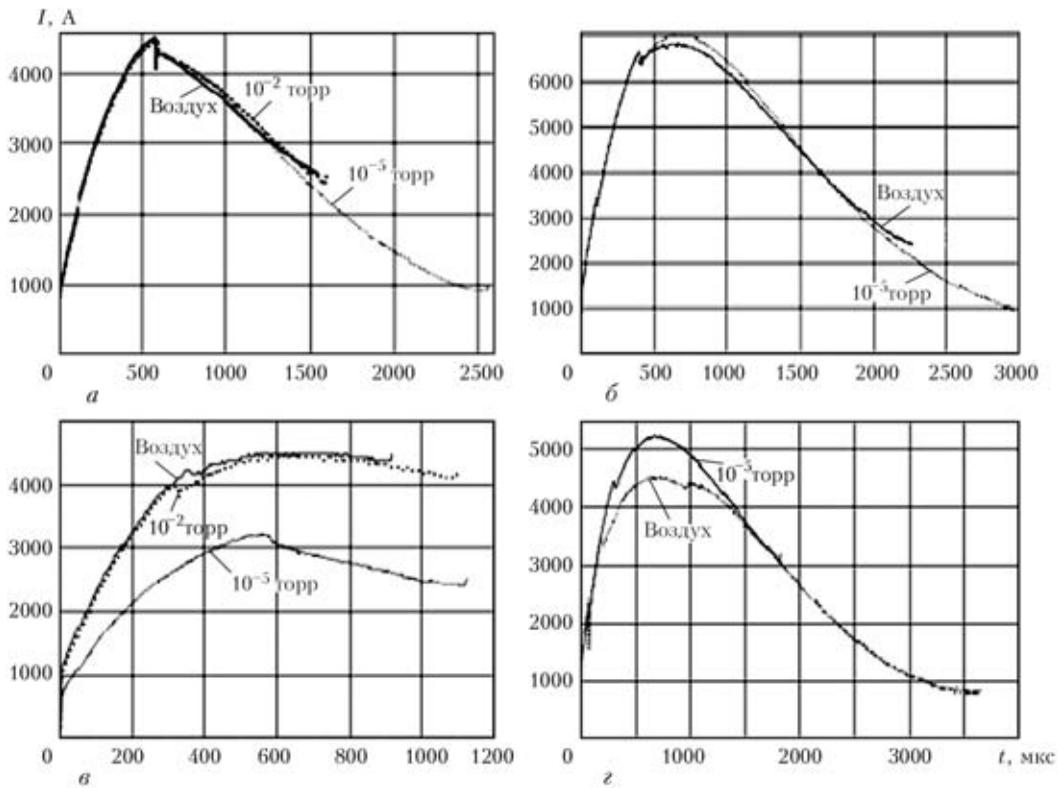


Рис. 3. Сварочный ток при конденсаторной приварке шпилек в условиях сварки при разных давлениях воздуха: а, б — сплав АМг3; в, г — сталь 10Х18Н9Т; а, в — М4; б, г — М6

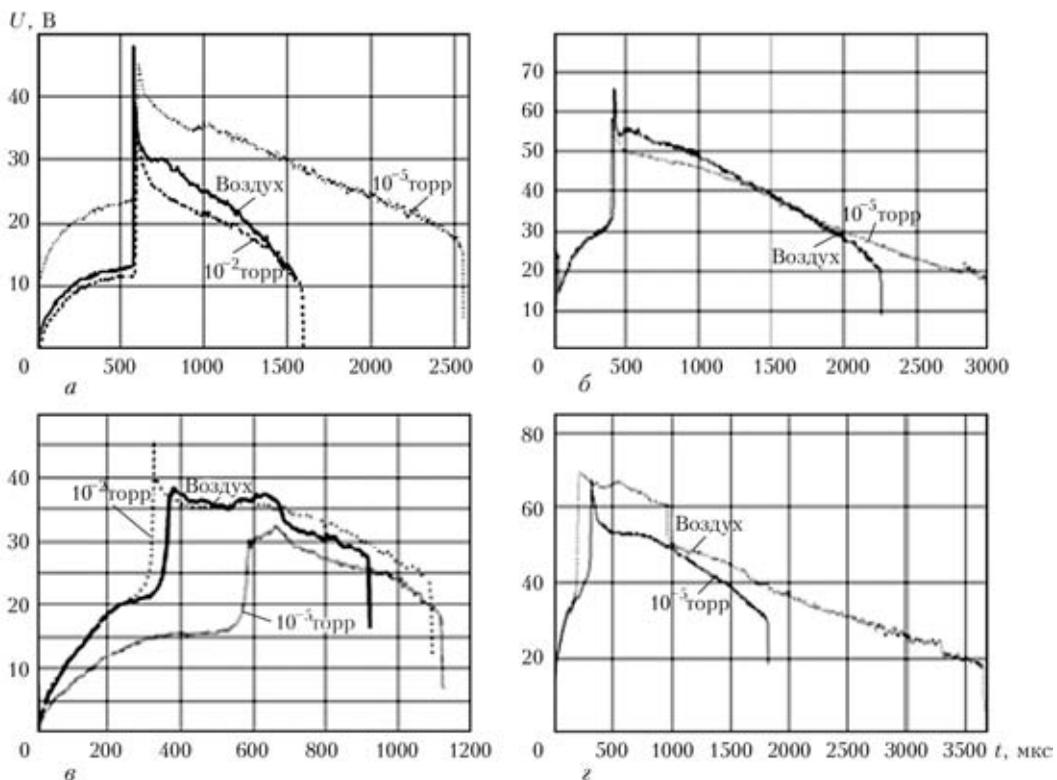


Рис. 4. Напряжение на свариваемых деталях: а-г — то же, что и на рис. 3

возбуждения дуги (момент «взрыва» отмечается снижением тока). Поскольку цепь разряда конденсаторов замыкается уже при слабом касании стыкуемых поверхностей, при начальном контак-

те взрывается микрорельеф и возбуждается дуга между торцом тонкого выступа и поверхностью листа, к которой должна быть приварена шпилька. О наличии дуги свидетельствует повышение нап-

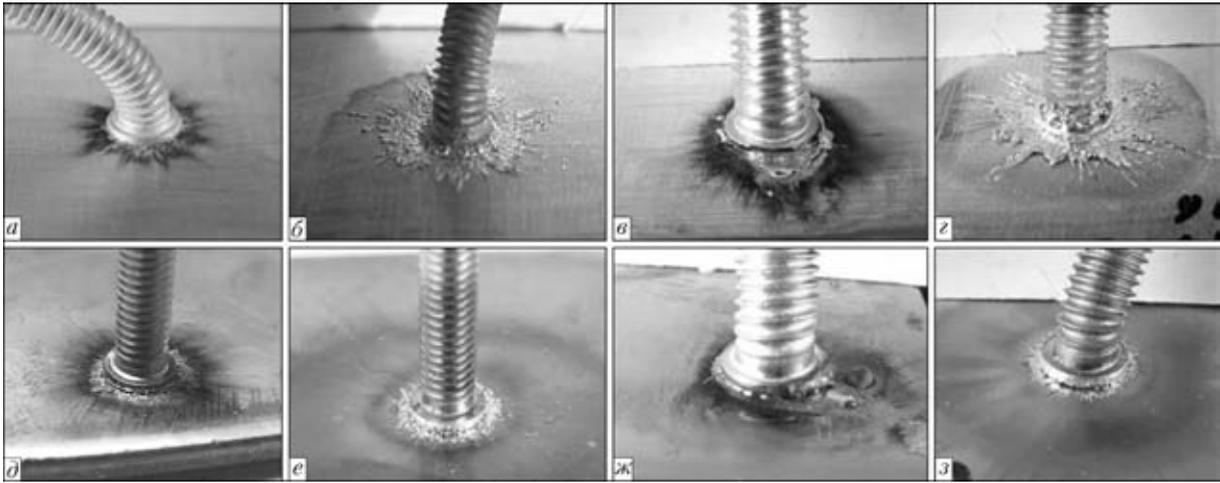


Рис. 5. Внешний вид сварных соединений шпилек из сплава АМг3 диаметром М4 (а, б), М6 (в, г) и стали 10Х18Н9Т диаметром М4 (д, е), М6 (ж, з), полученных при атмосферном давлении (а, в, д, ж) и в вакууме  $10^{-5}$  торр (б, г, е, з)

ряжения свыше 10 В, что типично для дугового разряда.

Далее тонкий выступ нагревается двумя источниками — дугой на торце и проходящим током. Разлет паров начальной микродуги в вакууме приводит к снижению эффективной мощности дуги. Как показывают расчеты на основании данных осциллографирования, несмотря на увеличение «инкубационного» времени при сварке в вакууме по сравнению со сваркой при атмосферном давлении воздуха (шпилька М4, 588 и 366 мкс, соответственно), энергия, выделяемая на свариваемых деталях, к моменту перехода от микродугового к дуговому разряду примерно одинакова (49,2 и 50,9 Дж соответственно).

При приварке шпильки диаметром М6 из-за увеличения длины выступа в 1,5 раза по сравнению со шпилькой М4 (см. рис. 1) при незначительном увеличении диаметра существенно возрастает роль внутреннего источника нагрева проходящим током. К этому добавляется снижение теплоотвода от выступа в основное тело шпильки, что приводит к уменьшению продолжительности нагрева выступа до испарения по сравнению со шпилькой диаметром М4 (до 316 мкс в вакууме и 192 мкс при атмосферном давлении).

Однако при примерно одинаковых отношениях длительностей «инкубационного» периода при сварке шпилек диаметром М4 и М6 в воздухе и вакууме энергия, выделенная за это время на свариваемых деталях, существенно меньше при сварке шпилек диаметром М6 в воздухе (15,2 Дж) по сравнению со сваркой в вакууме (35,3 Дж), при которой снижение эффективной мощности микродуги компенсируется увеличением времени прохождения тока по тонкому выступу.

Сопротивление дуги во всех исследуемых условиях, кроме приварки стальных шпилек М6, повышается с уменьшением давления воздуха, что соответствует классическим представлениям об условиях горения дугового разряда в газовой сре-

де [8]. При приварке стальных шпилек диаметром М6 бурное испарение выступа вызывает кратковременное локальное повышение давления и разлет паров с высокой начальной скоростью, что приводит к укорочению времени горения дуги, определяемого продолжительностью выравнивания давлений в дуговом промежутке и пружины осадки сварочной головки (шпилька опускается на лист при их равенстве).

В остальных исследуемых вариантах продолжительность процесса сварки в вакууме больше, чем на воздухе. Это связано с тем, что вакуумирование при сварке алюминиевых шпилек вызывает увеличение напряжения горения дуги, что при неизменном токе приводит к интенсификации испарения. В эксперименте со стальными шпильками диаметром М4 увеличение длительности процесса (рис. 4) вызвано задержкой фазы возбуждения основной дуги вследствие снижения тока начальной дуги (см. рис. 3).

В соответствии с ISO 14555:2006 соединения с приваренными шпильками проверяются визуально на отсутствие подрезов, перерывов в сварочном валике и других видов несплошностей. Все полученные соединения отвечают требованиям стандарта. Как видно из рис. 5, главное отличие между соединениями, полученными при атмосферном давлении и в вакууме, заключается в увеличении в вакууме площади выплеска расплавленного металла из зоны сварки. Это можно объяснить уменьшением в условиях вакуума противодействия паров металла, демпфирующих удар шпильки по ванне расплавленного металла на поверхности листа под действием пружины сварочной головки. Об этом свидетельствует также ореол паров металла в виде плотного слоя оксидов на поверхности соединения, полученного при атмосферном давлении, и прозрачного, но большого диаметра слоя копоти при сварке в вакууме.

Как отмечено выше, все соединения, сваренные на оптимальном режиме, выдержали изгиб

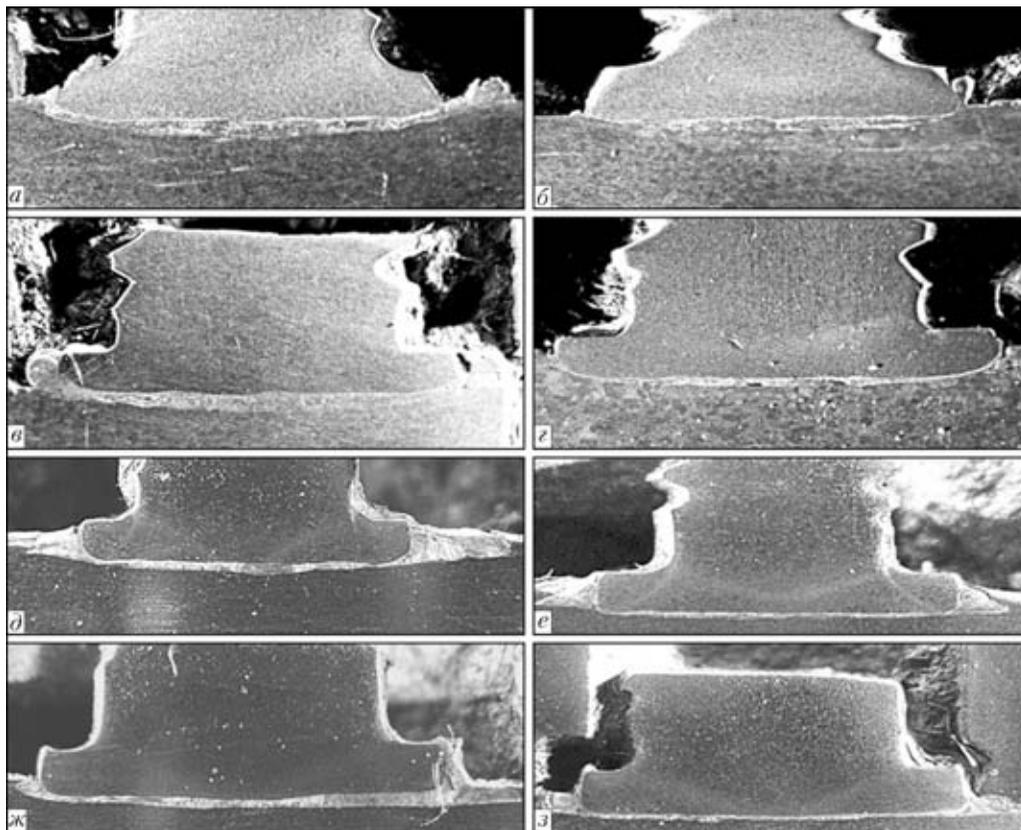


Рис. 6. Макроструктуры сварных соединений, полученных при атмосферном давлении (а, в, д, ж) и в высоком вакууме (б, з, е, з) шпилек из сплава АМг3 диаметром М4 (а, б), М6 (в, з) и стали 10Х18Н9Т диаметром М4 (д, е), М6 (ж, з) с листами алюминия и нержавеющей стали соответственно

на угол не меньше  $60^\circ$ . Испытание на статическое растяжение сварных соединений показало, что все они разрушались по основному металлу шпильки, вдали от места соединения.

Как показывают фотографии шлифов (рис. 6), толщина расплавленного металла, закристаллизовавшегося в стыке, уменьшается при переходе от атмосферного давления к высокому вакууму, несмотря на увеличенную в большинстве случаев продолжительность разряда при почти неизменном токе, т. е. выводы, сделанные из анализа внешнего вида образцов, подтверждаются.

Таким образом, эксперименты показали возможность приварки шпилек диаметром до М6 из алюминиевого сплава АМг6 и нержавеющей стали 10Х18Н9Т в вакууме дуговым разрядом конденсаторов. Полученные соединения равнопрочны с материалом шпильки.

Given are the results of investigations into capacitor-discharge welding of studs of aluminium-magnesium alloy AMg3 and stainless steel 10Kh18N9T under conditions of medium and high vacuum. It is shown that a high-current short-time pulsed discharge, at which the major part of evaporated metal remains in the gap between the mating surfaces, can be used for vacuum butt welding of compact-section parts to a sheet material. It was experimentally proved that up to M6 diameter studs can be welded at pressures of 1,33 Pa with a static tensile strength equal to that of the stud material.

1. Патон Б. Е. 25 лет сварке в открытом космосе // Автомат. сварка. — 2009. — № 7. — С. 3–7.
2. Космос: технология, материаловедение, конструкции: Сб. науч. тр. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000. — 528 с.
3. Особенности и дальнейшее развитие сварки в космосе / В. Ф. Шулым, В. Ф. Лапчинский, Д. Л. Демидов и др. // Космос: технология, материаловедение, конструкции: Сб. науч. тр. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000. — С. 52–59.
4. Masubuchi K., Imakita A., Miyake M. An initial study of remotely manipulated stud welding for space applications // Welding J. — 1988. — № 4. — P. 25–34.
5. Установка К747МВ для конденсаторной приварки шпилек / Д. М. Калеко, Б. И. Кононец, Н. Н. Оселедько и др. // Свароч. пр-во. — 1991. — № 6. — С. 25–27.
6. Патон Б. Е., Кубасов В. Н. Эксперимент по сварке металлов в космосе // Автомат. сварка. — 1970. — № 5. — С. 7–12.
7. Kaleko D. M., Lebedev V. K., Chvertko N. A. Processes of welding using the arc discharge of the capacitors // Welding and Surf. Rev. — 1999. — 13. — P. 1–148.
8. Капцов Н. А. Электрические явления в газах и вакууме. — М., Л.: Гостехтредиздат, 1950. — 836 с.

Поступила в редакцию 16.01.2012

## ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКИ (Обзор)

**М. А. ПОЛЕЩУК**, канд. техн. наук, **И. В. МАТВЕЕВ**, **В. А. БОВКУН**, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены основные направления исследований магнитно-импульсной сварки. Дана оценка свариваемости комбинированных соединений, выполненных этим способом, а также области его применения.

*Ключевые слова:* магнитно-импульсная сварка, направления исследований, трубчатые изделия, оборудование, свариваемость материалов, области применения магнитно-импульсной сварки

В промышленности магнитно-импульсная сварка (МИС) применяется на протяжении нескольких десятков лет и требуется определить ее место в современном промышленном производстве, оценить тенденции реализации.

Для качественной оценки тенденции (тренда) научно-практической активности исследований и применения МИС на современном этапе был проведен мониторинг динамики публикаций (преимущественно электронных) с выборкой по годам и фильтрацией по ключевому словосочетанию в тексте. При этом использовали такие современные поисковые системы, как PdfQueen, FreePatentsOnline, Google-Scholar (Google Академия), Scirus, 2dix, PdfSearch и др. (рис. 1).

В качестве основной поисковой системы использовали Google Scholar, имеющую функцию отбора по годам и фильтрацию по точному словосочетанию. Следует отметить, что многие компании не склонны размещать в открытых источниках данные о производственно-технологических особенностях выпуска своей продукции, в том числе и об использовании МИС, что затрудняет поисковую работу в этом направлении, заставляет проводить анализ косвенными методами и полагаться на мнение экспертов.

Теоретическими вопросами МИС занимаются во многих образовательных центрах развитых стран (University of Waterloo, Technische Universitat Dortmund, Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS, Ohio State University, Wuhan University of Technology, Osaka University, Tokyo Metropolitan College of Technology, Belgian Welding Institute и др.) [1–6], а в плане промышленной разработки и внедрения — научные группы при большинстве ведущих автомобилестроительных и авиакосмических компаний (PST,

DANA, PULSAR, MAXWELL MAGNEFORM и др.).

В странах СНГ исследования теории и практического применения МИС ведутся уже на протяжении десятков лет, сразу после изобретения ее в СССР [7–9]. На фоне роста публикаций по этой теме их абсолютное количество относительно невелико, еще меньше публикаций о практическом применении МИС. Очевидно, это связано с общим состоянием экономики и промышленного производства в этих странах.

Основными центрами научно-практической активности в области магнитно-импульсной обработки металлов и МИС в странах СНГ являются ИЭС им. Е. О. Патона, Харьковский политехнический институт, ГКНПЦ им. М. В. Хруничева, Донской политехнический институт, Самарский государственный аэрокосмический университет совместно с Самарским центром МИОМ и др.

В мировой практике МИС в основном используется при соединении трубчатых деталей. Сварка листовых изделий пока находится преимущественно на стадии исследовательских проработок.

При всей надежности современного оборудования для МИС (индукторы выдерживают до 2 млн импульсов) и его высокой производитель-

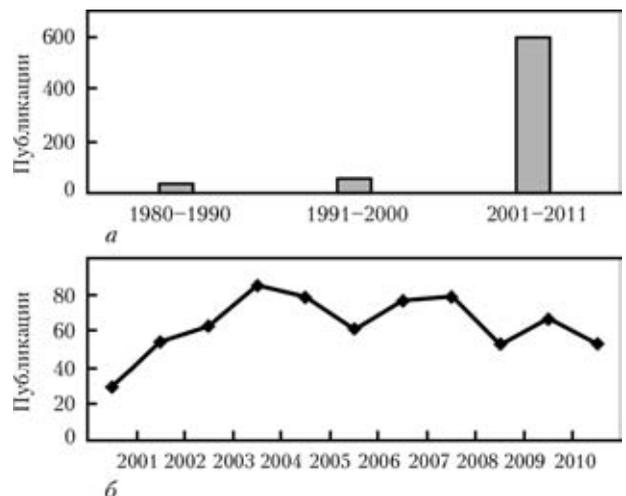


Рис. 1. Динамика публикаций в 1980–2011 (а) и 2000–2011 (б) гг.



ности (минимум шесть сварочных импульсов в минуту; ограничение — длительность операции загрузки/выгрузки детали) основным препятствием внедрению МИС, очевидно, является относительная дороговизна оборудования: начальная цена малой установки составляет от 100 тыс. дол. США.

Другим ограничением является необходимость применения повышенных мер безопасности (высокое напряжение, сильные магнитные поля, опасность разрушения индуктора), которые к тому же требуют значительных капиталовложений. Впрочем, при роботизации и автоматизации процесса эта проблема может быть сведена к абсолютному минимуму [10].

Вероятно, в обозримом будущем по мере прогресса в области импульсных накопителей электрической энергии (в данном случае специальных высоковольтных импульсных конденсаторов) и удешевления их производства (их цена составляет более половины стоимости всего оборудования МИС) МИС станет доступнее. Это вполне возможно, поскольку в настоящий момент значительные научно-практические и финансовые ресурсы сосредоточены в прикладной физике и в ВПК — создание мобильных систем электромагнитного поражения, мобильных электромагнитных пушек (рельсотронов) и лазеров, где одним из основных энергетических компонентов являются высоковольтные импульсные конденсаторные накопители. Очевидно, поэтому в гражданских сферах промышленности вскоре появятся более эффективные конденсаторные системы, что позволит соз-

давать доступные стационарные и даже мобильные системы МИС.

В настоящее время в промышленности с помощью МИС выполняются такие соединения: алюминий–алюминий, алюминий–медь, алюминий–магний, алюминий–титан, медь–медь, медь–сталь, медь–бронза, никель–титан, никель–никель, сталь–сталь. Для трубчатых деталей рекомендуется таблица свариваемости, приведенная в работе [11].

Практическим применением МИС интересуются прежде всего автомобильные компании. По этой причине независимые фирмы по разработке и внедрению магнитно-импульсной техники и технологии (DANA, PULSAR, PST, MAGNEFORM и др.) ориентируют большинство своих разработок на этот сектор. Соответственно и производители оборудования МИС значительную часть своей прибыли получают именно от автомобилестроительного сектора производства.

Производственников здесь привлекают прежде всего возможность сварки разнородных металлов, а также простота ее процесса, высокая степень автоматизации, отсутствие термических деформаций, хорошее качество сварки и повторяемость результатов, исключение операций очистки и применения расходных материалов (сварочная проволока, газы), отсутствие необходимости в локальной вытяжной вентиляции, поскольку нет вредных выбросов, очень низкий процент брака и пр. [12].

Применение МИС в сравнении с другими технологиями в автомобилестроении пока относительно невелико, но имеет постоянную тенденцию

Таблица свариваемости трубчатых деталей при способе МИС

Внешняя труба	Внутренняя труба												
	Al серии 1000	Al серии 3000	Al серии 5000	Al серии 6000	Al серии 7000	Алюминий литейный	Медь	Бронза	Сталь черная	Сталь нержавеющая	Никель	Магний	Титан
Al серии 1000	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-
Al серии 3000	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
Al серии 5000	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-
Al серии 6000	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-
Al серии 7000	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
Алюминий литейный	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Медь	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-
Бронза	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-
Сталь черная	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-
Сталь нержавеющая	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-
Никель	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	+

Примечание. Здесь «+» обозначает свариваемость комбинации материалов, «-» — ее отсутствие.



Рис. 2. Установка МИС на заводе «Spicer Driveshaft»

к росту. Эксперты утверждают, что потенциал МИС значителен и в ближайшие годы предвидится реальное массовое развертывание [13].

Корпорация «DANA» («Dana Holding Corp.») в отличие от «чистых» компаний-разработчиков (PULSAR, PST и др.) создает технологию и оборудование для МИС в основном для собственных нужд (она является крупнейшим изготовителем и поставщиком узлов и деталей на автомобильный рынок). Одно из шести ее подразделений («Spicer Driveshaft») специализируется на изготовлении трансмиссионных валов, в том числе и с помощью МИС (рис. 2). По оценкам специалистов «DANA», широкое внедрение МИС позволит создавать облегченные рамы и другие элементы автомобильных конструкций из разнородных металлов, что приведет к снижению массы на 70 % и сокращению потребления топлива на 10 %. Это повлечет за собой уменьшение вредных выбросов в окружающую среду, в том числе и при производстве самих автомобилей («зеленая технология») [14].

Знаковым событием для автомобилестроения в целом и МИС в частности стала выставка «Schweisstec», проходившая в Штутгарте, где компания PST (PST «Products GmbH») представила первую в мире легковесную раму корпуса легкового автомобиля, состоящую из высокопрочных алюминиевых, стальных и медных элементов, сваренных между собой полностью с помощью МИС (рис. 3) [15].

При этом разработчики выделяют следующие преимущества технологии:

- абсолютное отсутствие термических деформаций;

- сварка между собой разнородных металлов (алюминий–сталь, алюминий–медь);

- длительность импульса сварки 35 мкс;

- возможность выполнения прямолинейных сварных соединений протяженностью до 3 м.

По сути здесь определен вектор развития сборочной технологии, заключающийся в максимально полной замене всех способов сварки плавлением процессом МИС, а также вектор направления инвестиций в ближайшем будущем. В свою



Рис. 3. Первая в мире легковесная рама корпуса автомобиля из разнородных металлов, изготовленная полностью с помощью МИС

очередь это может указывать на направление исследований и разработок.

Вот перечень некоторых автомобильных узлов и деталей (рис. 4–11), где нашел применение процесс МИС [13, 16–18]: амортизаторы (алюминий или сталь); элементы подвески (разнородные металлы); компоненты шасси; блочные элементы; предохранительные крэш-боксы; элементы автомобильных кондиционеров; газовые сосуды высокого давления; маслофильтры; элементы трансмиссионного вала; элементы облегченного сидения; элементы топливопроводов; соединения элементов рамы; элементы выхлопных систем [15].

Изготовление алюминиево-стальных трансмиссионных валов с помощью МИС позволяет существенно уменьшить их массу. При этом отмечается значительное повышение производительности, улучшение экологии, уменьшение отходов и брака практически до нуля [12].

Компания «PULSAR» («Pulsar Ltd.») утверждает, что вложила в развитие и промышленную доработку МИС более 100 человеко-лет, теперь она начинает стремительно внедрять эту технологию по всему миру. Так, недавнее внедрение установки Pulsar MPW 25 на заводе известного производителя автомобильных компонентов (компания «TI Automotive») на линии сборки ресиверов-осушителей автомобильных кондиционеров

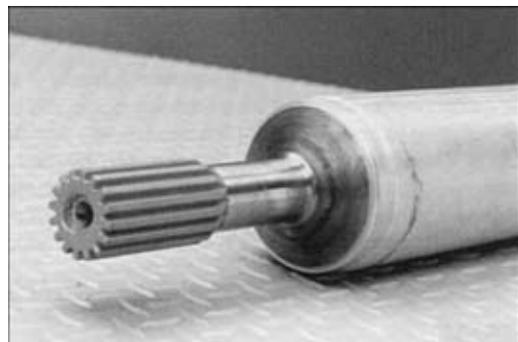


Рис. 4. Сталеалюминиевый вал, сваренный способом МИС

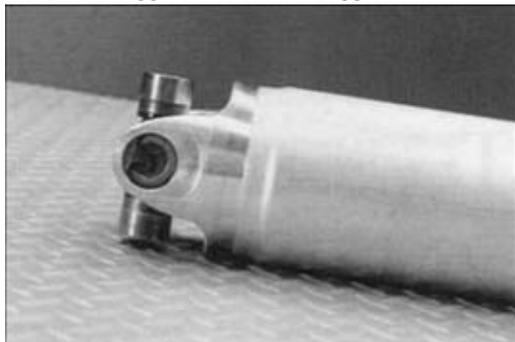


Рис. 5. Алюминиевый (Al–Al) вал, сваренный способом МИС



Рис. 6. Ресивер автомобильного кондиционера, сваренный с помощью МИС



Рис. 7. Фрагмент поперечного сечения медноалюминиевого соединения (диаметр 25 мм)

позволила заменить сварку неплавящимся электродом и достичь производительности 1000 узлов за смену, а также повысить качество изделий, снизить процент брака (рис. 7, 8) [19].

Способ МИС, используемый при сборке корпусов топливных элементов (топливных стержней) для нужд атомной энергетики, по-прежнему изучают. Он, несомненно, найдет широкое применение. В ряде случаев данная технология предпочтительнее других [20]. Этому сопутствует высокое качество и повторяемость результатов, простота, отсутствие прямого контакта с плакированной поверхностью корпуса, появление новых материалов для корпусов (из числа плакиро-



Рис. 8. Алюминиевое кольцо, приваренное к стальному болту



Рис. 9. Топливный фильтр, изготовленный с помощью МИС



Рис. 10. Образец трансмиссионного вала (алюминий–сталь), сваренного МИС, после успешных испытаний на прочность при скручивании

ванных ферритно-мартенситных и дисперсионно-упрочняемых оксидами сталей) [21, 22].

В аэрокосмической области существует постоянно возрастающая потребность в неразъемных соединениях деталей из разнородных материалов. МИС является идеальным способом соединения таких разнородных металлов, как титан–никель. В настоящее время при изготовлении топливопроводов аэрокосмического назначения используют пайку или сварку неплавящимся электродом [10]. Компания «Boeing» применяет МИС, в частности, для изготовления трубопроводной арматуры высокого давления (гидравлика) [23].

В ГКНПЦ им. М. В. Хруничева внедрен процесс МИС трубчатых конструкций с предварительной формовкой (совместная разработка с ДГТУ) [24]. Там же разработан и внедрен новый процесс получения штампованных замкнутых конструкций из тонколистовых материалов (облегченные корпуса электросоединителей) с помощью магнитно-импульсной технологии, названный разработчиками контактной МИС с совместным разогревом перехлеста индуцированными токами и воздействием импульсного магнит-

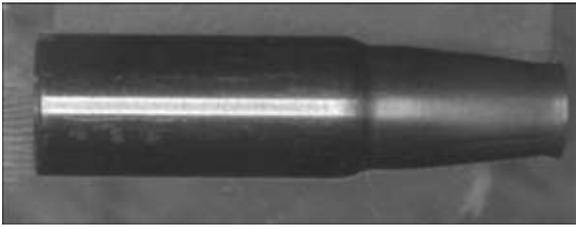


Рис. 11. Фрагмент образца топливного стержня, сваренного с помощью МИС



Рис. 12. Магнитно-импульсная резка (пробивка отверстий) деталей автомобильного назначения в Fraunhofer IWU с использованием элементов оборудования PST [28]

ного давления, т. е. сочетания МИС и электрической контактной сварки [25].

Ударно-импульсный способ сварки признан наилучшим при создании сверхпроводящего ключа с тепловым управлением в виде сэндвича Cu–Al–Cu для нужд криогенной техники и технологии. Такой ключ характеризуется низким тепловым контактным сопротивлением, что делает применение МИС весьма перспективным [26]. Этот же способ дал положительные практические результаты при сварке пленок на базе аморфного никеля («металлическое стекло»), пригодного для нужд производства микроинструмента с уникальными свойствами [27].

В настоящее время на стадии доработки и предпроектного внедрения находится новый родственный процесс МИС — магнитно-импульсная пробивка отверстий (рис. 12), — разработанный специалистами фирмы «Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology» (Германия). Его отличают отсутствие изнашивающегося механического инструмента и очень высокая скорость пробивки отверстий — 0,2 с (с помощью лазерных технологий эта операция выполняется за 1,4 с). Проект финансируется компанией «Volkswagen» [28].

К родственным технологиям МИС можно отнести также получение соединений путем магнитно-импульсного обжата (crimping) и некоторые другие магнитно-импульсные технологии.

### Выводы

1. МИС и родственные технологии являются эффективными и постоянно развивающимися технологиями с большим научно-практическим потенциалом, требующими дальнейшего проведения научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ.

2. С появлением новых материалов область применения МИС будет расширяться.

3. Интерес к МИС будет усиливаться по мере повышения технико-экономических показателей оборудования, в основном благодаря снижению его стоимости и повышению долговечности элементов.

4. Объектом исследований и разработок будут как технологические аспекты МИС (улучшение свариваемости уже существующих материалов, уменьшение энергоемкости процесса), так и опытно-конструкторские разработки по совершенствованию инструментов (например, специальных видов индукторов и др.).

5. Некоторые области промышленности уже готовы к массовому внедрению МИС, ожидаемому в ближайшие годы.

1. ASM handbook / T. Lenen, T. Siewert, S. Babu, V. Acoff // Welding fundamentals and processes. — ASM International. — 2011. — 6А. — 520 p.
2. Berlin A. Magnetic pulse welding of Mg sheet: A thesis for degree master of applied science in mechanical engineering (Waterloo, Ontario, Canada, 2011). — Waterloo, 2011. — P. 10–11.
3. Hahn R. Werkzeuge zum impuls-magnetischen Warmfuegen von Profilen aus Aluminium und Magnesiumlegierungen: Diss. — Berlin, 2004. — 30 S.
4. Groche P., Elsen A. Fundamentals of EMPT-welding. Technische Universitat Darmstadt // 4th Intern. conf. on high speed forming (Columbus, Ohio, March 9/10, 2010). — Ohio, 2010. — P. 40.
5. Zhang Y., Babu S., Daehn G. S. Impact welding in a variety of geometric configurations. — Ohio: State University, 2010. — 230 p.
6. Desai S. V. Scaling relationships for input energy in electromagnetic // J. Electromagnetic Analysis & Applications. — 2010. — № 2. — P. 563–570.
7. Особенности расчета режимов магнитно-импульсной сварки / А. С. Письменный, И. В. Пентегов, Е. П. Стемковский и др. // Автомат. сварка. — 2004. — № 11. — С. 15–19.
8. Уточненный метод расчета режимов магнитно-импульсной сварки / А. С. Письменный, И. В. Пентегов, Е. П. Стемковский и др. // Там же. — 2009. — № 1. — С. 25–28.
9. Использование магнитно-импульсной обработки для изготовления тонкостенных малогабаритных деталей ЛА / А. С. Филимонов, Я. М. Баянова, И. В. Метелин, М. В. Осипов. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. — 210 с.
10. Weber A. The cold welding process is being used for more and more high-volume applications // Assembly Magazine. — 2002. — August. — P. 3–6.
11. L'assemblage par impulsion magnetique — MPT magnetic pulse technology. Technopole. — Saint-Croix, 2011 // dev.swi.heig-vd.ch/fr-ch/Micro/Documents/3-Magnetic-Pulse-Technology.pdf.



12. *The next wave in manufacturing...solid state cold welding*//www.ai-online.com/Adv/Previous/show issue.php?id=1982.
13. *Magnetic pulse welding is Dana original*//www.mtiwelding.com/files/Automotive Engineering Intl Aug 1998 MAGNETIC PULSE WELDING.pdf.
14. *Информационные материалы компании «Dana Corp.»* //www.atp.nist.gov/eao/sp950-3/danacorp.pdf.
15. *PSTproducts presents the world's first EMPT welded light-weight space frame at the Schweisstec fair*//etcna.net-rics.ch/public/pstproducts\_press\_release\_spaceframe\_including\_photos.pdf.
16. *Kallee S. W. Industrialisation of electromagnetic pulse technology (EMPT) in India* // PSTproducts GmbH, 2010 //www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2010/IPM.pdf.
17. *Schafer R., Pasquale P., Kallee S. The electromagnetic pulse technology (EMPT): Forming, welding, crimping and cutting* // PSTproducts GmbH, Alzenau, 2010 //ing.dk/modules/fsArticle/download.php?fileid=740.
18. *Shribman V. Magnetic pulse welding for dissimilar and similar materials* // 3rd Intern. conf. on high speed forming, Dortmund, 2008 //eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/27107/1/29.pdf.
19. *TI Automotive adopts pulsar magnetic pulse welding systems for automotive air-conditioning components leading global manufacturer of automotive HVAC systems to use pulsar MPW 25 to weld automotive dryers. Auto spectator*//www.autospectator.com/cars/automotive-manufacturing/0023205-ti-automotive-adopts-pulsar-magnetic-pulse-welding-systems-automoti.
20. *Fabrication technological development of the oxide dispersion strengthened alloy MA957 for fast reactor applications* / M. L. Hamilton, D. S. Gelles, L. J. Lobsinger et al. — Richmond: Pacific Northwest National Laboratory, Febr. 2000 //www.pnl.gov/main/publications/external/technical\_reports/PNNL-13168.pdf.
21. *McGinley J. Electromagnetic pulse technology as a means of joining generation IV cladding materials. European Commission JRC-ITU* // Proc. of the 17th Intern. conf. on nuclear engineering ICONE 17, July 12–16, 2009, Brussels, Belgium. 11 //www.english.pstproducts.com/index\_htm\_files/icone%2017\_FINAL%20version.pdf.
22. *Shri S. C. Chetal sodium cooled fast reactors.* — Kalpakam: Indira Gandhi centre for atomic research, 2011 //www.igcar.gov.in/gap\_web/l.htm»stl\_4\_2\_4.
23. *Pat. Application 20060208481 USA, F16L47/00; F16L47/00 Electromagnetic pulse welding of fluid joints* / A. Fischer, D. R. Bolser. — Publ. 21.09.2006.
24. *Бацемакин М. Ю. Технология магнитно-импульсной сварки тонкостенных трубчатых деталей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.* — Ростов-на-Дону, 2007. — 23 с.
25. *Плотников В. В. Разработка процесса и оборудования магнитно-импульсной сварки облегченных корпусов электросоединителей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.* — Ростов-на-Дону, 2007. — 23 с.
26. *Impact welding: a superior method of producing joints with high thermal conductivity between petals at very low temperatures* / R. W. Willekers, W. A. Bosch, F. Mathu et al. — 1989. — Vol. 29, Issue 9. — P. 904–906 //www.sciencedirect.com/science/article/pii/0011227589902038.
27. *Explosive welding of Ni-base amorphous foils for micro-tooling applications* / R. M. Mineev, S. S. Dimov, S. R. Koev et al. //www.4m-net.org/files/papers/4M2008/05-13/05-13.pdf.
28. *It's a knockout. Engineers find a new way to punch holes through steel* // The Economist. — 2010, Jan. 14th.

The review considers the research centres dealing with magnetic-pulse welding (MPW) and presents the main area of investigations into this process. Weldability of the combined joints made by MPW is evaluated, and application fields for this process are given.

Поступила в редакцию 18.01.2012

## **Научно-техническая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТАЛЛУРГИИ, ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ И НАПЛАВКИ СТАЛЕЙ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ»**

*К 100-летию со дня рождения засл. деятеля науки и техники,  
проф. Д. М. Рабкина и д-ра техн. наук, проф. И. И. Фрумина*

25-26 октября 2012

г. Киев  
ИЭС им. Е. О. Патона

**Организаторы конференции**  
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины  
Общество сварщиков Украины

### **Тематика конференции**

- исследование физико-металлургических процессов при сварке и наплавке
- современные технологические процессы сварки и наплавки
- новые высокоэффективные сварочные и наплавочные материалы
- развитие способов нанесения покрытий и модифицирования поверхностей
- изготовление и ремонт сварных конструкций с применением современных технологий

*Желающие принять участие в конференции должны направлять в адрес Оргкомитета до 1 июня 2012 г. предложения по теме докладов и составу участников. Условия участия в работе конференции можно уточнить в оргкомитете.*

**Контакты:** (044) 200 54 06; 200 63 57; 200 24 66; 200 82 77  
E-mail: office@paton.kiev.ua; tzu@e-mail.ua

## ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ

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

Описан мобильный комплекс оборудования МКТ 1420, предназначенный для термообработки сварных соединений трубопроводов. Показаны его возможности по отработке заданных режимов нагрева с применением гибких электронагревателей сопротивления. Рассмотрены особенности конструкции и приведены сравнительные характеристики секционных нагревателей сопротивления, предназначенных для термообработки сварных соединений и местного нагрева трубопроводов.

*Ключевые слова:* термообработка, сварные трубопроводы, мобильный комплекс оборудования, нагреватели сопротивления

Термообработка (ТО) сварных соединений трубопроводов является довольно сложным и трудоемким технологическим процессом. К оборудованию и нагревательным устройствам для выполнения ТО предъявляются жесткие требования относительно мощности, надежности, транспортабельности, простоты в обслуживании. Особое внимание уделяется вопросам соблюдения и точности поддержания режимов ТО, поскольку они влияют на релаксацию напряжений в сварных соединениях и их свойства. Кроме того, характерное для местного нагрева трубопроводов неравномерное распределение температурных полей по длине трубы может вызвать появление в металле околошовной зоны напряжений больших, чем остаточные [1]. Для исключения такого влияния необходимо обеспечить равномерный нагрев сварного соединения по периметру трубы при минимальном перепаде температуры по толщине стенки, особенно при ее большой толщине. Этого достигают путем поддержания или изменения по определенной программе основных параметров режима ТО — скорости нагрева, продолжительности выдержки при температуре нагрева и скорости охлаждения. Обеспечить реализацию регламентированных режимов ТО сварных соединений трубопроводов могут мобильные комплексы оборудования, в состав которых должны входить источники питания с пусковой аппаратурой, системы измерения, контроля и регулирования технологических параметров ТО, средства защиты обслуживающего персонала и нагревательные устройства. Автономность работы, относительно небольшие габариты позволяют использовать мобильные комплексы в цеху при питании от стационарных электрических сетей или в условиях строительной-монтажной площадки при питании от передвижной электростанции.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан мобильный комплекс оборудования МКТ 1420 (рис. 1), предназначенный для выполнения ТО горизонтальных или вертикальных сварных соединений трубопроводов диаметром до 1420 мм, подогрева стыков труб перед сваркой и сопутствующего нагрева при сварке [2]. При этом используют радиационный способ нагрева. Работы можно проводить одновременно по трем каналам по независимой программе. Максимальное удаление комплекса от нагревательных устройств составляет 20 м. Источниками питания нагревателей служат модернизированные трансформаторы ТДФЖ-2002 (каналы нагрева 1 и 2) и ТДФЖ-1002 (канал нагрева 3). Управление работой комплекса осуществляют от единого пульта оператора-термиста в ручном и автоматическом режимах. Системы регулирования каналов нагрева построены на базе цифрового прибора ТРЦО2 П. Для измерения температуры нагрева имеются 12 каналов подключения термоэлектрических преобразователей. Предусмотрены визуальный контроль температуры по показаниям приборов и регистрация на носитель информации. В схему комплекса введены сигнализаторы неисправностей элементов оборудования, устройства постоянного и дистанционного контроля сопро-



Рис. 1. Мобильный комплекс оборудования МКТ 1420

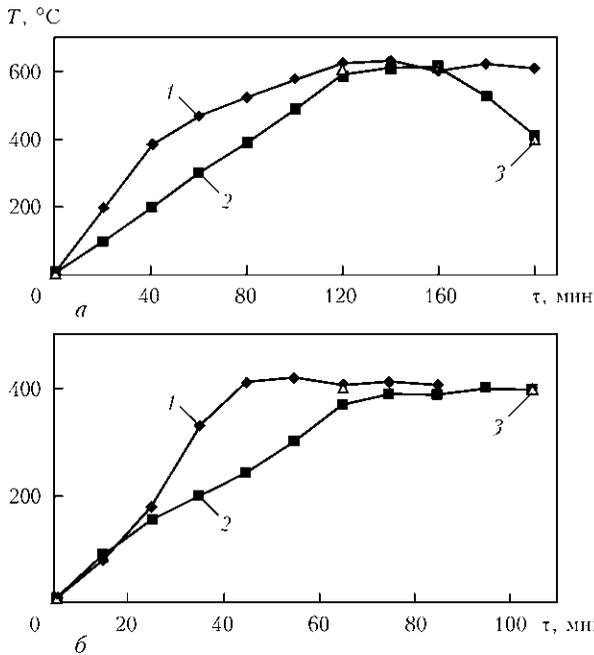


Рис. 2. Динамика местного нагрева  $T$  труб диаметром 1420×18 (а) и 325×9 мм (б) при работе комплекса МКТ 1420 в режимах ручного (1) и автоматического (2) управления относительно заданного режима (3)

тивления изоляции электрических цепей. Оборудование комплекса, включая силовые кабели для подключения нагревательных устройств, смонтировано на крытом прицепе с устройством буксировки на жесткой сцепке. Пульт управления, тепловентиляционная установка и рабочее место оператора-термиста размещены в утепленном отсеке. Для хранения нагревательных устройств организовано складское отделение. Технические средства обеспечивают безопасное обслуживание комплекса при питании от стационарных электрических сетей или передвижной электростанции.

Особенности работы комплекса МКТ 1420 можно проследить при местном нагреве труб диаметрами 1420×18 мм (сталь 17Г1С) и 325×9 мм (сталь 10). В качестве нагревательных устройств использовали гибкие электронагреватели (ГЭН) сопротивления. Каждая секция ГЭН изготовлена в виде плоской спирали из двух проводов, диаметром 3,6 мм. Количество витков в спирали равняется 34 шт. [3], максимальный ток секции — 120 А. При нагреве трубы диаметром 1420×18 мм восемь секций ГЭН стыковали в два пояса по четыре секции. Нагрев трубы диаметром 325×9 мм выполняли с помощью двух секций ГЭН. Тепловая изоляция места нагрева состояла из картона марки ТК-1 и прошивных теплоизоляционных матов МТПБ с оболочкой из кремнеземной ткани и наполнителем из ваты каолинового состава. Динамику нагрева труб отражают зависимости, приведенные на рис. 2. Режимы нагрева труб диаметрами 1420×18 и 325×9 мм заданы следующими параметрами: скорость 300 и 400 °С/ч; тем-

пература 600 и 400 °С; продолжительность выдержки 40 мин; длительность контролируемого охлаждения — 20 мин до температуры 420 °С (для трубы диаметром 1420×18 мм); допустимое отклонение температуры составляло  $\pm 20$  °С. В режиме ручного управления нагрев трубы диаметром 1420×18 мм выполнен до температуры высокого отпуска 620...650 °С (рис. 2, а) при суммарной мощности нагревательных устройств 59,5 кВт·А. Средняя скорость нагрева равнялась 300...320 °С/ч. В интервале 400...650 °С средняя скорость нагрева составляла 180 °С/ч, время нагрева трубы достигало значения температуры 200 °С (не более 20 мин). Это соответствует требованиям нормативных материалов к режимам нагрева при высоком отпуске сварных стыков трубопроводов [4] и технологии подогрева стыков труб перед сваркой.

В режиме ручного управления точность обработки заданного режима нагрева зависит от квалификации оператора-термиста. В данном случае отклонение температуры трубы диаметром 1420×18 мм от заданной в интервале 10...400 °С достигало 200 °С (рис. 2, а), трубы диаметром 325×9 мм — 170 °С (рис. 2, б). На этапе выдержки температура труб была выше заданной на 20...50 °С. При переводе комплекса в режим автоматического управления отклонение температуры трубы диаметром 1420×18 мм уменьшилось до  $\pm 5...8$  °С, включая этап контролируемого охлаждения. Отклонение температуры трубы диаметром 325×9 мм в интервале 10...400 °С находилось в пределах  $\pm 25$  °С. На этапе выдержки температура трубы была ниже заданной на 5...10 °С.

При подготовке ГЭН или комбинированных электронагревателей сопротивления к проведению ТО особое внимание уделяли креплению на трубе секций нагревателей и их выводов. С целью сокращения трудоемкости подготовительных работ и повышения надежности нагревательных устройств в ИЭС им. Е. О. Патона разработаны секционные нагреватели сопротивления (СНС). В базовой конструкции СНС нагревательный элемент, теплоизоляционный картон и несколько слоев ваты каолинового состава размещены в металлическом корпусе с вентиляционными отверстиями (рис. 3, а). Нагревательный элемент (провод из нихрома) выполнен по типу ГЭН. Провод и выводы защищены керамическими изоляторами типа ИКН-302 (рис. 3, б). В отличие от ГЭН в конструкции СНС используют съемные втулки, изготовленные из металлической ленты, с выступами, ограничивающими смещение изоляторов вдоль витков спирали. Ограничители удерживаются стяжным поясом спирали. Выводы нагревательного элемента жестко укреплены внутри корпуса и снабжены переходными керамическими втулками для подклю-

чения к токоподводящим кабелям. Предусмотрена установка замковых приспособлений на корпусе СНС для взаимной стыковки в пояс и крепления по периметру трубы.

Характеристики нагревателей СНС (исполнение 1–5) и ГЭН приведены в таблице. Конструкции СНС различались количеством проводов в спирали нагревательного элемента и устройством теплоизоляции. Характеристики СНС изучали при местном нагреве трубы из стали 17Г1С диаметром 1420×16 мм. По торцам трубы установили заглушки. Температуру нагрева измеряли в точках наружной и внутренней поверхностей трубы по центру спирали нагревательного элемента. При всех скоростях нагрева перепад температуры по толщине трубы не превышал 20 °С. Устройство ГЭН (изоляция картон и два слоя теплоизоляционных матов) обеспечило скорость нагрева выше, чем СНС-1 (изоляция картон) и СНС-2 (спираль из трех проводов, изоляция картон). При объемной мощности 5,94 В·А/см<sup>3</sup> у нагревателей ГЭН, СНС-2 и СНС-3 увеличение скорости нагрева (СНС-3) получено путем введения дополнительной изоляции из картона и теплоизоляционной ваты в конструкцию. Дальнейшее повышение скорости нагрева достигнуто при увеличении мощности нагревателей (СНС-4, СНС-5).

Оценить эффективность конструкции СНС можно по соотношению  $K = \Delta V / \Delta Q$ , где  $\Delta V$  — приращение скорости нагрева;  $\Delta Q$  — приращение объемной мощности (рис. 4). Приращение объем-

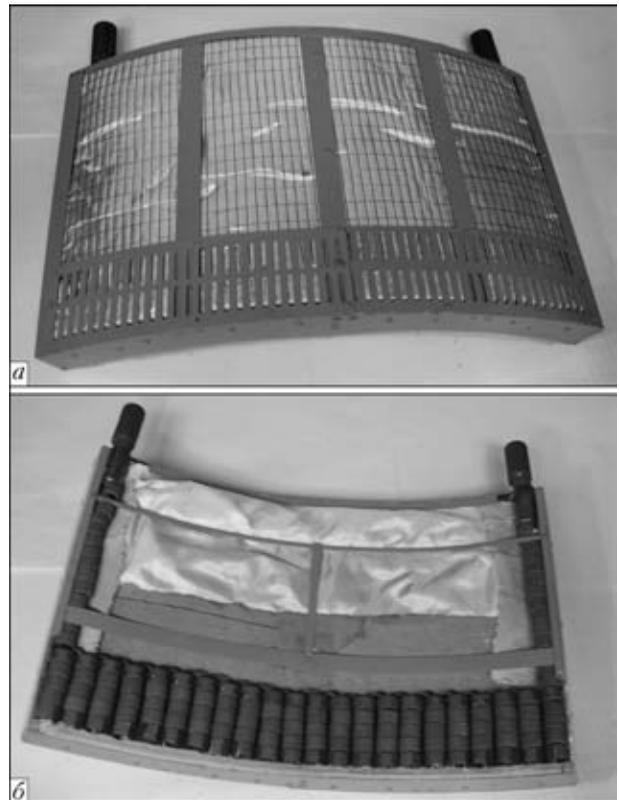


Рис. 3. Общий вид базовой конструкции СНС (а) и расположение нагревательного элемента (б)

ной мощности на 1,52 В·А/см<sup>3</sup> привело к приращению скорости нагрева с применением ГЭН на 90, СНС-2 на 50 и СНС-3 на 110 °С/ч. Ток нагревательного элемента ГЭН, СНС-2 и СНС-3 сос-

**Технические характеристики нагревателей**

Параметр	ГЭН	СНС-1	СНС-2	СНС-3	СНС-4	СНС-5
Длина спирали нагревательного элемента, м	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
Ширина спирали нагревательного элемента, м	0,08	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Количество витков спирали нагревательного элемента, шт.	22	22	22	22	22	22
Количество проводов в спирали, шт.	2	2	3	3	3	3
Диаметр провода спирали нагревательного элемента, мм	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Площадь нагрева, см <sup>2</sup>	580	720	720	720	720	720
Толщина стенки трубы, мм	18	16	16	16	16	16
Изоляция:						
картон + маты + маты	+	–	–	–	–	–
картон	–	+	+	+	+	+
картон + вата + картон	–	–	–	+	+	+
Напряжение на дуге, В	44,3	38	36	36	43	46
Ток, А	149	134	190	190	225	240
Мощность, В·А	6200	5090	6840	6840	9670	11000
Удельная мощность, В·А/см <sup>2</sup>	10,7	7,07	9,5	9,5	13,4	15,3
Объемная мощность, В·А/см <sup>3</sup>	5,94	4,42	5,94	5,94	8,39	9,58
Скорость нагрева в интервале 100...400 °С, °С/ч	780	690	740	800	1200	1370

Примечание. Здесь «+» обозначает наличие изоляции, «–» — ее отсутствие.

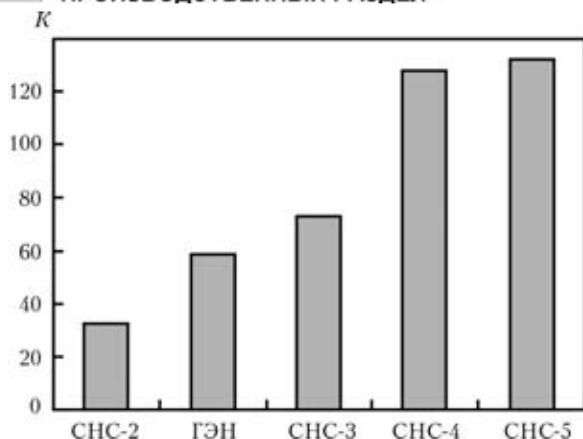


Рис. 4. Показатель эффективности различных нагревателей

тавлял не более 70 А на провод. Для СНС-4 характерна некоторая перегрузка по току (75 А на провод). При увеличении объемной мощности СНС-4 на  $3,97 \text{ В}\cdot\text{А}/\text{см}^3$  приращение скорости нагрева равнялось  $510 \text{ }^\circ\text{С}/\text{ч}$ ; для СНС-5 при  $5,16 \text{ В}\cdot\text{А}/\text{см}^3$  оно составляло  $680 \text{ }^\circ\text{С}/\text{ч}$ . Однако высокая нагрузка СНС-5 по току (80 А на провод) может сократить продолжительность эксплуатации нагревательного элемента. Оптимальные характеристики имеются у СНС-3, в конструкции которого использованы спираль нагревательного элемента из трех проводов и комбинированная теплоизоляция из картона и ваты каолинового состава. Нагреватель обеспечивает высокую скорость нагрева и возможность ее приращения при незначительной перегрузке по току.

Количество витков спирали нагревательного элемента, размеры и количество секций СНС зависят от диаметра труб. Для местного нагрева труб диаметром 1420 мм с применением комплекса МКТ 1420 следует использовать 12 секций СНС-3, состыкованных в два пояса по шесть секций. К каждому каналу нагрева комплекса необходимо подключить по четыре секции в парал-

лель. Напряжение СНС-3 меньше номинального рабочего напряжения трансформаторов ТДФЖ, а суммарная мощность четырех СНС-3 не превышает 30 кВ·А, при этом суммарная потребляемая мощность комплекса составит менее 130 кВ·А. Такое подключение нагревательных устройств позволяет плавно корректировать температуру нагрева по периметру трубы и обеспечивает равномерную загрузку по току всех трех фаз питающей сети комплекса МКТ 1420.

## Выводы

1. Показано, что мобильный комплекс оборудования МКТ 1420 в комплекте с ГЭН обеспечивает выполнение ТО сварных соединений трубопроводов диаметром до 1420 мм в соответствии с требованиями нормативных технических материалов и высокую точность отработки заданных режимов местного нагрева труб диаметром  $325\times 9$  и  $1420\times 18$  мм при работе комплекса в режиме автоматического управления.

2. Разработаны СНС для местного нагрева трубопроводов, которые отличаются более высокой эффективностью нагрева по сравнению с ГЭН сопротивлению и упрощают процесс подготовки нагревательного оборудования к эксплуатации.

1. *Ройтенберг С. Ш.* Термическая обработка сварных соединений трубопроводов. — М.: Энергоиздат, 1982. — 112 с.
2. *Письменный А. С., Пантелеймонов Е. А.* Комплекс оборудования для термообработки стыков труб в полевых условиях // Современные проблемы сварки и ресурса конструкций: Тез. стенод. докл. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2003. — С. 54–56.
3. *Хромченко Ф. А., Корольков П. М.* Технология и оборудование для термической обработки сварных соединений. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 200 с.
4. *ОСТ 36-50-86.* Трубопроводы стальные технологические. Термическая обработка сварных соединений. Типовой технологический процесс. — Введ. 01.01.87.

Mobile system MKT 1420 of the equipment for heat treatment of welded joints on pipelines is described. Its capabilities are shown for optimisation of the preset parameters of heating using flexible electrical resistance heaters. Peculiarities of design are considered, and comparative characteristics of sectional resistance heaters intended for heat treatment of welded joints and local heating of pipelines are presented.

Поступила в редакцию 19.12.2011

## ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ

*65 лет назад в ИЭС им. Е. О. Патона была проведена Всесоюзная научно-практическая конференция по автоматической сварке под флюсом. В докладе «Перспективы дальнейшего развития автоматической сварки в СССР» Е. О. Патон раскрыл широкие производственные возможности сварки, основанные на результатах первых комплексных научных исследований, выполненных в институте.*

Широкое применение сварки во многих странах во время Второй мировой войны выявило наряду с преимуществами процесса и недостатки, в том числе неожиданное, непрогнозируемое разрушение или образование трещин в сварных конструкциях (например, в цельносварных судах типа «Либерти» в США). Е. О. Патон уже в 1943 г. начал задумываться над конверсией технологии автоматической сварки, стремясь применить новые технологии для быстрого восстановления разрушенных конструкций, ускорения строительства судов, зданий, мостов. Решать новые задачи необходимо было на прочной научной основе. Вскоре после окончания Второй мировой войны Е. О. Патон использовал системный подход к проблеме создания цельносварных конструкций. Научный поиск, исследование, разработку сварочных материалов, источников питания, автоматов и даже создание специальных сталей он объединил в единый комплекс из 25 тем.

Заведующий электротехническим отделом ИЭС Б. Е. Патон продолжил начатые в 1943 г. исследования процессов горения дуги и плавления в зоне сварки, особенностей работы аппаратов и источников питания при сварке под флюсом (в том числе и с применением киносъемки с экрана рентгеновского аппарата). К концу 1947 г. им были установлены условия стабильного горения ду-

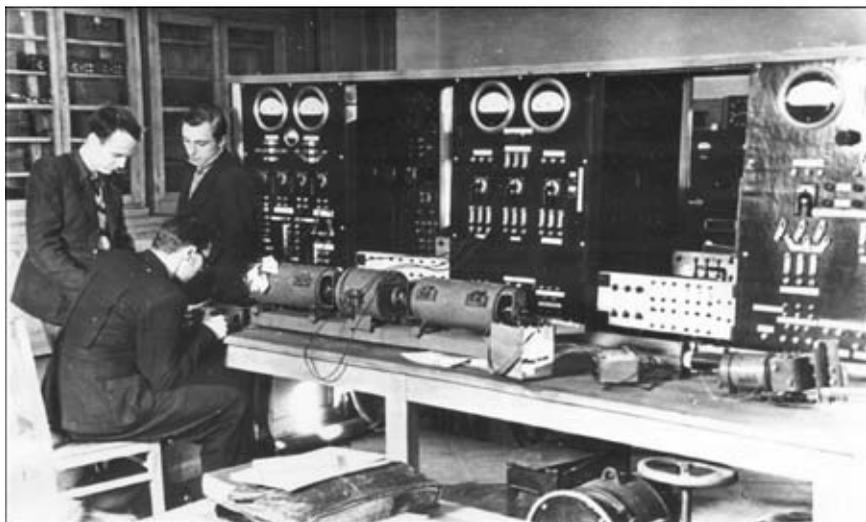
ги, определены расчетные формулы температурных полей плавящегося электрода, скорректированы теоретические предпосылки создания сварочных источников питания. Обобщение этих результатов послужило основой для разработки сварочных установок нового поколения.

Е. О. Патон понимал, что научно-технический прогресс будет выдвигать все более высокие требования к эксплуатационным качествам материалов, поэтому недостаточное внимание к оценке их свариваемости может привести к тому, что изготовить надежную сварную конструкцию не удастся.

В середине 1940-х годов в ИЭС им. Е. О. Патона, МВТУ им. Н. Э. Баумана и некоторых других организациях СССР развернулись фундаментальные исследования причин разрушения сварных конструкций (Е. О. Патон, Г. А. Николаев, Н. О. Окерблом, В. В. Шеверницкий, Б. С. Касаткин), установления зависимости прочности соединений от процессов плавления и кристаллизации металла сварочной ванны и распределения температур (Н. Н. Рыкалин, К. В. Любавский, В. И. Дятлов, И. И. Фруммин, Д. М. Рабкин, А. М. Макара, Б. И. Медовар, В. В. Подгаецкий, И. В. Кирдо, Н. В. Шаманин, Н. Н. Прохоров, А. А. Алов, Г. Л. Петров и др.), оценки влияния способов производства сталей и их химического состава на свариваемость (А. М. Макара, А. Е. Аснис,



Академик Е. О. Патон с участниками конференции



В электротехнической лаборатории ИЭС им. Е. О. Патона

Б. С. Касаткин, С. А. Островская, К. В. Любавский, М. Х. Шоршоров и др.). Следует заметить, что в этот период в перечисленных направлениях проводили исследования также в США, Великобритании, Франции.

На достаточно высоком уровне были проведены исследования составов, структур и свойств сталей (механические испытания, химические анализы, определение коррозионной стойкости и др.). Подтвердилось предположение Е. О. Патона об отрицательном влиянии сульфидных включений на качество сварного соединения. Установлена природа образования горячих трещин и причины хрупкого разрушения сварных конструкций, разработаны методы сравнительной оценки свариваемости сталей. Результатом этого комплекса металлургических и физико-химических исследований было также создание металла повышенной хладостойкости, стойкого против старения — стали М16Ст3 (М. М. Доброхотов, Б. С. Касаткин, А. Е. Аснис и др.). Впервые металлурги согласились с таким требованием сварщиков, как снижение максимального содержания в стальном прокате углерода, серы и фосфора. Кроме того, были созданы предпосылки для выбора рациональной технологии сварки, дальнейшего совершенствования сварных соединений и техники сварки под флюсом, разработки новых способов дуговой сварки. В этот же период была создана серия флюсов для автоматической сварки сталей (В. В. Подгаецкий, К. В. Любавский, Е. И. Лейначук, И. И. Фрумин и др.). Разработанный в 1947–1948 гг. коллективом сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона и ЦНИИТМаше высокомарганцевистый флюс марки АН-348 используется до сих пор и послужил прототипом при создании ряда новых сварочных материалов.

Одновременно с научными исследованиями, направленными на улучшение качества металла шва, совершенствовалась техника сварки. Е. О.

Патон поставил задачи расширения диапазона свариваемых конструкций и многократного повышения скорости сварки при их изготовлении. Немедленного решения этих задач требовало промышленное производство. Значительное количество вертикальных швов при восстановлении и строительстве доменных печей, мостов, резервуаров и других больших конструкций выполнялось вручную. Производительность трубосварочных станков сдерживалась только возможностью технологии сварки, главным образом, скоростью сварки. Результаты изучения магнитогидродинамических явлений при сильноточных дуговых процессах были использованы при создании двухдуговой сварки под флюсом со скоростью 160...200 м/ч (Б. Е. Патон, В. К. Лебедев, С. Л. Мандельберг).

В октябре 1947 г. в Киеве была проведена Всесоюзная конференция по автоматической сварке, на которой выступил Е. О. Патон с докладом «Перспективы дальнейшего развития автоматической сварки в СССР». К этому времени начали успешно формироваться основные разделы науки о сварке, определились требования к новому сварочному оборудованию. Сварочное производство получило возможность на научной основе решать проблемы обеспечения высокого качества сварных изделий с минимальными затратами. В соответствии с Постановлением Совета Министров СССР было запланировано открытие новых сварочных кафедр в вузах, курсов подготовки рабочих. ИЭС им. Е. О. Патона поручалось научное и организационное сопровождение всех сварочных работ в стране. В 1948 г. вышла в свет коллективная монография сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона «Автоматическая сварка под флюсом», которая подвела итог завершения первого этапа создания отечественной теории сварки под флюсом.

А. Н. Корниенко, д-р ист. наук



## СЕМИНАР ТЕХНОЛОГОВ-МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

20–24 февраля 2012 г. в Сваляве в санатории «Солнечное Закарпатье» Ассоциация технологов-машиностроителей Украины (АТМ) провела 12-й Международный научно-технический семинар «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте».

В работе семинара приняли участие ученые и специалисты из Азербайджана, Беларуси, России, Словакии, Узбекистана, Украины. До начала работы семинара АТМ Украины издала сборник материалов, в который вошли тезисы 118 докладов.

На открытии семинара со вступительным словом выступил генеральный директор АТМ Украины, заместитель директора по научной работе Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины (ИСМ), д-р техн. наук, проф. С. А. Клименко. Он рассказал о ведущей роли ассоциации в распространении новых знаний, достижениях материаловедческой и технологической науки на промышленных предприятиях Украины, подвел итоги работы АТМ Украины за 2011 г.

В пленарной части семинара были представлены доклады, посвященные ретроспективе совершенствования процессов обработки резанием и металлорежущих станков (канд. техн. наук Н. И. Посвятенко, проф. Э. К. Посвятенко, Национальный транспортный университет, г. Киев), новым разработкам ИСМ им. В. Н. Бакуля в части режущих инструментов и технологий механической обработки (академик НАН Украины Н. В. Новиков, проф. С. А. Клименко), созданию высокоэффективного инструмента для новой технологии сварки — трением с перемешиванием (чл.-кор. НАН Украины А. Л. Майстренко с коллегами, ИСМ им. В. Н. Бакуля, В. И. Зеленин, ИЭС им. Е. О. Патона), новым подходам, связанным с необходимостью перепрофилирования производства и мониторинга его эффективности (профессоры М. Гайдук, М. Вархола с коллегами, Технический университет, г. Кошице, Экономический университет, г. Братислава).

В докладах освещались такие направления, как: подготовка производства — основа создания конкурентоспособной продукции;

совершенствование технологий механической и физико-технической обработки деталей машин; упрочняющие технологии и покрытия;

ремонт и восстановление деталей машин в промышленности и на транспорте, оборудование для изготовления, ремонта и восстановления;

современные технологии и оборудование в сборочном и сварочном производствах;

технологическое управление качеством и эксплуатационными свойствами изделий;

технический контроль и диагностика в машино- и приборостроении.

Вопросы повышения конкурентоспособности продукции рассматривались на примерах японских подходов к системам менеджмента качества. Концепция «total productive maintenance», основанная на эксплуатации имеющегося оборудования с наивысшей эффективностью на протяжении всего жизненного цикла, рассмотрена в докладе В. Е. Кривошекова (Одесский УИЦ «Надежность в судостроении»), модель менеджмента качества продукции, включающая всеобщий контроль качества, который представляет собой единый процесс, выполняемый всем персоналом, начиная от президента фирмы до работников первой линии производства, рассмотрена в докладе канд. техн. наук С. В. Похвалова (Могилевский машиностроительный профессионально-технический колледж).

Азербайджанские специалисты представили оригинальные технологические подходы к развитию одного из основных заготовительных производств — литейного производства. В докладе проф. И. Ш. Исмаилова с сотрудниками (Азербайджанский технический университет, Азербайджанский государственный экономический университет) рассмотрены перспективы применения природного сырья для повышения качества литейных форм.

Совершенствованию технологий механической и физико-технической обработки деталей машин посвящены доклады большой группы ученых и специалистов. Рассмотрены высокоэффективные технологии лезвийной (проф. Л. Н. Девин с сотрудниками, канд. техн. наук А. С. Мановицкий, проф. С. А. Клименко с коллегами, ИСМ им. В. Н. Бакуля; проф. Г. П. Клименко, Донбасская государственная машиностроительная академия; проф. Б. В. Лупкин, НАКУ «ХАИ») и алмазно-абразивной (проф. В. Б. Струтинский с сотрудниками, НТУУ «Киевский политехнический институт», д-р техн. наук В. И. Лавриненко с коллегами, проф. Ю. Д. Филатов с сотрудниками, ИСМ им. В. Н. Бакуля) обработки изделий из сталей и сплавов высокой твердости, полимерных композиционных материалов, природного и искусственного камня. Показаны перспективы повышения производительности обработки путем использования ультразвуковых колебаний в процессе механической обработки (А. В. Братко, Черкасский государственный технологический университет), системах очистки (канд. техн. наук Д. С. Фатюхин, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет).

Магнитно-абразивная обработка как перспективная технология финишной обработки элементов

подшипников рассмотрена в докладах проф. А. П. Гавриша с коллегами (НТУУ «Киевский политехнический институт»). Белорусские ученые представили серию сообщений по проектированию механотронных технологических комплексов (проф. М. Л. Хейфец, НПО «Центр» НАН Беларуси), применению комбинированных физико-технических технологий (проф. Л. М. Акулович с сотрудниками, Белорусский государственный аграрный технический университет).

Упрочняющим технологиям традиционно уделяется большое внимание в программе семинара. Рассмотрены вопросы электрохимического нанесения покрытий (В. В. Артемчик, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта), электроконтактной приварки (канд. техн. наук П. И. Буряк, Московский государственный агроинженерный университет), электроконтактного припекания (Л. А. Лопата, Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины), микродугового оксидирования (канд. техн. наук В. В. Тихоненко, Украинская инженерно-педагогическая академия), упрочнения воздействием тлеющего разряда в вакууме (проф. Ж. А. Мрочек, Белорусский национальный технический университет). Перспективы и тенденции развития технологии электроискрового упрочнения, ионно-плазменного термоциклического азотирования рассмотрены в докладах проф. Б. А. Ляшенко с сотрудниками (ИПП НАН Украины). Альтернативные технологии дискретных покрытий — вакуум-плазменная, ионное азотирование, лазерная термообработка, электроискровое легирование — представлены в докладе канд. техн. наук Е. К. Соловых (Кировоградский национальный технический университет).

Ученые Беларуси (проф. С. П. Кундас, Белорусский государственный университет) совместно с коллегами из Института металлургии УрО РАН (проф. Б. Р. Гельчинский с сотрудниками) представили результаты исследований микротвердости покрытий системы Zn–Me (Ni–Al–Ti), полученные с использованием искусственной нейронной сети.

Ряд докладов был посвящен вопросам упрочнения и ремонта деталей металлургической техники. Технологический комплекс по упрочнению прокатных валков закалкой, реализованный в условиях ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» (г. Новокузнецк), а также результаты исследований повышения эксплуатационных свойств валков горячей прокатки поверхностной плазменной закалкой представлены в докладах А. А. Бердникова с коллегами (ООО «Урал-Техно-Плазма»). Проф. Ю. А. Харламов (Донбасский государственный технический университет) представил защитные покрытия для кристаллизаторов МНЛЗ. Особенности формирования структуры наплавленного металла за счет электромагнитного воздействия рассмотрели специалисты Приазовского

государственного технического университета (проф. В. В. Чигарев с коллегами).

Анализ различных технологий восстановления деталей автотракторной техники представлен в докладе проф. В. С. Ивашко (Белорусский национальный технический университет), модель процессного управления на ремонтных предприятиях железнодорожного транспорта рассмотрена в сообщении проф. Л. А. Тимофеевой (Украинская государственная академия железнодорожного транспорта).

Сборочные технологии с применением нагрева и охлаждения представлены в докладах канд. техн. наук И. Л. Оборского с коллегами (Киевский национальный университет технологий и дизайна), вопросы тепловой сборки толстостенных труб с бандажами рассмотрены в докладе А. Д. Пирогова (ПАО «Сумское НПО им. М. В. Фрунзе»). Проф. В. А. Шабайкович (Луцкий национальный технический университет) представил новый метод разработки механосборочных машиностроительных технологий, в соответствии с которым одновременно учитывается влияние внешних и внутренних причин, обеспечивающих как полное использование технологических средств, так и конкурентоспособность изделий, выпускаемых по этой технологии.

Проф. М. Вархола с коллегами (Технический университет г. Кошице) презентовал разработки кафедры производственной техники и робототехники, среди которых сварочные и сборочные роботы.

Важнейшими составляющими заготовительного, сборочного и ремонтного производства являются сварочные работы. Доклады по технологии дуговой точечной сварки листовых конструкций в вертикальном положении, оценке влияния источника питания на стабильность и устойчивость процесса сварки, восстановлению матриц штампов холодной вырубкой наплавкой самозащитной порошковой проволокой, новым возможностям манипуляторов для сварочного производства посвящены доклады ученых и специалистов ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины канд. техн. наук П. В. Гончарова, д-ра техн. наук С. Ю. Максимова с сотрудниками, д-ра техн. наук В. А. Лебедева с коллегами.

На возможность возникновения в электрической сети дозы фликера от использования сварочных аппаратов в быту обратил внимание в своем докладе М. А. Шелоп (ООО «МРСК Центра»-«Брянскэнерго»).

В докладе проф. Ю. А. Харламова (Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля) рассмотрены состояние и перспективы развития технологии сварки с перемешиванием. По мнению автора, расширение практического применения технологии связано с созданием эффективных инструментов, что было рассмотрено в одном из пленарных докладов.

Технический контроль и диагностика — неотъемлемые составляющие современного производства. Этим технологиям, реализуемым в процессе



производства и в качестве операции оценки конечного продукта, посвящены доклады ученых и специалистов НТУУ «Киевский политехнический институт» (проф. В. Б. Струтинский, О. Я. Юрчишин, И. М. Диордица, И. В. Омельченко, В. А. Держук), ИСМ им. В. Н. Бакуля (проф. Л. Н. Девин), Национального авиационного университета (проф. С. Ф. Филоненко, Т. В. Тимченко, А. П. Космач, Л. М. Покидько), Института металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН (проф. В. В. Рошупкин с сотрудниками), Института физики прочности и материаловедения СО РАН (Д. Н. Хатьков, З. А. Шелковников).

Эволюционное описание комплексного структурного анализа строения материалов представил проф. М. Л. Хейфец. В своем докладе он рассмотрел главные этапы развития физико-химических основ материаловедения, показал особенности их представления на современном уровне.

В завершении работы семинара были представлены четыре обзорных сообщения о разработках в части исследования поверхностей трения на наноуровне, которые проводятся в Национальном авиационном университете, исследовательских возможностях Технического центра НАН Украины, разработке комплекса ультразвуковых технологий в Московском автомобильно-дорожном государственном техническом университете и продуктах на основе суспензий с наночастицами, в частности, наночастицами серебра для различных областей применения, выпускаемых в ИСМ им. В. Н. Бакуля.

В своем докладе канд. техн. наук А. У. Стельмах (Национальный авиационный университет) презентовал комплекс исследовательского оборудования, включающего машины трения оригинальной конструкции, оптический профилометр с разрешением до 1 нм и растровый электронный микроскоп. На основе результатов исследований, выполненных с использованием разработанного комплекса оборудования, автором предложена новая вакуумно-компрессионная теория трения, которая доказала свою эффективность в производстве деталей авиационной техники.

Доцент Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета канд. техн. наук Д. С. Фатюшин представил сообщение о комплексных разработках университета в направлении ультразвуковых технологий, которые проводятся под руководством чл.-кора РАН В. М. Приходько. Были показаны возможности повышения надежности и долговечности транспортных средств, узлов и деталей машин за счет широкого использования высокоэффективных, экологически безопасных ультразвуковых технологий при получении материалов и их обработке. Рассмотрены варианты технологического оборудования и представлены примеры практической реализации технологий.

Канд. техн. наук А. С. Мановицкий (ИСМ им. В. Н. Бакуля) представил совместную разработку ИСМ им. В. Н. Бакуля и ИЭС им. Е. О. Патона — технологию получения суспензий с наночастицами, в частности, наночастицами серебра, а также продукты «Серебряный щит-1000» и «Наноагент+».

С учетом того, что наносеребро является сильным дезинфектантом разработка особенно перспективна в области медицины. Суспензии с наночастицами других металлов (меди, платины, железа и др.) находят применение в научных исследованиях и в различных областях промышленности.

Подводя итоги работы семинара, его участники отметили, что ученые институтов НАН Украины и вузов Азербайджана, Беларуси, России, Словакии, Узбекистана, Украины получили возможность оценить и обсудить достижения коллег, показать научной общественности свои разработки, найти единомышленников и будущих соавторов.

АТМ Украины приглашает ученых и специалистов в разных областях машиностроительного производства и ремонта техники принять участие в работе 13-го Международного научно-технического семинара «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте», который состоится в феврале 2013 г. в санатории «Солнечное Закарпатье» (г. Свалява).

С. А. Клименко, д-р техн. наук,  
М. Ю. Копейкина, канд. техн. наук



## 17-я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЛЕОТЕСТ-2012»

Традиционно ежегодно в феврале в заснеженных Карпатах в пгт Славское Львовской области собираются специалисты по неразрушающему контролю. Очередная международная научно-техническая конференция «ЛЕОТЕСТ-2012». Электромагнитные и акустические методы неразрушающего контроля материалов и изделий» проходила с 20 по 24 февраля 2012 г.

Организаторами этой конференции выступили Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики (УО НКТД), г. Киев, Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины (ФМИ им. Г. В. Карпенко), г. Львов, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа (ИФНТУНГ), научно-производственная фирма «Ультракон-Сервис», г. Киев и Центр «Леотест-Медиум», г. Львов.

В работе конференции приняли участие около 40 специалистов из Украины, Российской Федерации, Польши и Чехии. Были представлены 47 докладов, из которых 34 заслушаны в зале и обсуждены специалистами. Конференцию открыл вступительным словом председатель оргкомитета, член правления и председатель Западного отделения УО НКТД, директор центра «Леотест-Медиум», канд. техн. наук В. Н. Учанин.

Член бюро правления УО НКТД Ю. Н. Посыпайко от имени председателя УО НКТД проф. В. А. Троицкого зачитал поздравление участникам конференции, а также сделал сообщение об итогах работы УО НКТД и его ближайших планах.

Как и каждый год, наибольшее количество докладов представили научные работники ФМИ им. Г. В. Карпенко. Доклады были посвящены вопросам вихретокового и ультразвукового контроля, коэрцитиметрии, решению дифракционных и спектральных задач в области неразрушающего контроля, созданию мультидифференциальных преобразователей, анализу электрических и магнитных полей подземных трубопроводов и пр.

Большой интерес и живую дискуссию вызвали доклады гостей из-за рубежа. Проф. Н. Н. Егоров (ассоциация «Тестрон», г. Санкт-Петербург, РФ) сообщил о последних исследованиях и разработках оборудования для автоматического контроля сварных соединений, полученных в том числе электронно-лучевой сваркой, и проката. П. Сташек

(«Everest Polska», г. Варшава, Польша) представил доклад о 3D-измерениях фазы прибором «Эверест XL». Б. Чесла («Applus RTD», г. Хожув, Польша) рассказал о решении нетрадиционной задачи с помощью ультразвукового контроля. Д. Сольнарж («PTS Josef Solnar, s.r.o.», г. Острава, Чехия) продемонстрировал новую серию дефектоскопов DVP и DRT для автоматизированного неразрушающего контроля качества сварочной продукции.

С докладами выступили также представители ряда вузов Украины: ИФНТУНГ, Национального университета «Львівська політехніка», Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», Севастопольского национального университета ядерной энергии и промышленности, Национального технического университета, г. Кировоград, Херсонской государственной морской академии.

О практическом применении методов неразрушающего контроля рассказали представители следующих промышленных предприятий: АНТК «Антонов», АО Международные авиалинии Украины, ПАО «Укрхимтрансаммиак», ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат», ЗАО «ДДАП-РАКС», ЦТА Укрзалізниці, ПАО «Західенерго» и др.

Тезисы докладов конференции изданы отдельным сборником. В холле конференц-зала проходила выставка средств неразрушающего контроля и технической диагностики. В ней принимали участие НПФ «Интрон-СЭТ», г. Донецк, НПФ «Ультракон-Сервис», г. Киев, ЗАО «Тестрон», г. Санкт-Петербург, Центр «Леотест-Медиум», г. Львов, Объединенная инжиниринговая компания, г. Днепрпетровск, PTS Ukraina, г. Никополь.

Конференция прошла в деловой и доброжелательной обстановке. Свободное от заседаний время участники конференции смогли посвятить катанию на горных лыжах по склонам гор Тростянь, Кремень, Погар и Высокий Верх.

*Организаторы приглашают к участию в конференции и в следующем году.*

*Адрес оргкомитета: 79017, г. Львов-17, ул. Генерала Грицяя, 11/5. Тел./факс (0322) 75-08-69.*

*E-mail: uchanin@ipm.lviv.ua, leotest@org.lviv.net.*

Ю. Н. Посыпайко, инж.

## ПОДПИСКА — 2012 на журнал «Автоматическая сварка»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
480 грн.	960 грн.	2700 руб.	5400 руб.	78 дол. США	156 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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



Подписка на электронную версию журнала «Автоматическая сварка» на сайте:  
<http://www.rucont.ru>.

По подписке доступны выпуски журнала, начиная с 2009 г. в формате \*.pdf.  
Подписка возможна на отдельные выпуски и на весь архив, включающий все выпуски за 2009–2011 гг. Подписка доступна физическим и юридическим лицам.

## РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

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

- Первая страница обложки (190×290 мм)
- Вторая, третья и четвертая страницы обложки (200×290 мм)
- Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм)
- Вклейка А4 (200×290 мм)
- Разворот А3 (400×290 мм)
- 0,5 А4 (185×130 мм)
- 0,25 А4 (90×130 мм)

**Технические требования к рекламным материалам**

- Размер журнала после обрезки 200×290 мм

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

**Все файлы в формате IBM PC**

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

**Стоимость рекламы и оплата**

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

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
- Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок
- Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади
- Публикуется только профильная реклама (сварка и родственные технологии)
- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

### Контакты:

тел./факс: (38044) 200-82-77; 200-54-84  
E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)

Подписано к печати 20.03.2012. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,84. Уч.-изд. л. 10,24 + 6 цв. вклеек.

Печать ООО «Фирма «Эссе».

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

## НОВЫЕ КНИГИ



**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И РЕНОВАЦИИ:**  
Тематическая подборка статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» в 2009-2011 гг. - Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2012. - 172 с. Мягкий переплет, 200x290 мм.

Сборник включает 38 статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» за период 2009-2011 гг., по проблемам ремонта, восстановления и реновации изделий ответственного назначения. Авторами статей являются известные в Украине ученые и специалисты в области сварки, наплавки, упрочнения, металлизации и других технологий ревитализации. Сборник предназначен для научных сотрудников, инженеров, технологов, конструкторов и аспирантов, занимающихся проблемами сварки и других родственных технологий обработки материалов. Стоимость сборника\* 160 грн./800 руб.



**ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО:**

Тематическая подборка статей, опубликованных в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» в 2005-2010 гг. - Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2011. - 324 с. Мягкий переплет, 200x290 мм.

Сборник включает 70 статей, опубликованных в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за период 2005-2010 гг. по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. Авторами статей являются известные в Украине и за рубежом ученые и специалисты. Тематика статей посвящена созданию новых технологических процессов и оборудования для производства и сварки титана. Сборник предназначен для широкого круга инженеров, технологов, конструкторов, занятых в машиностроении, энергетике, строительстве,

судостроении, металлургии и других отраслях промышленного производства, связанных с обработкой и потреблением титана; полезен также преподавателям и студентам высших учебных заведений.

Стоимость сборника\* 200 грн./1000 руб.



**СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ:**

Тематическая подборка статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» в 2006-2010 гг. - Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2011. - 216 с. Мягкий переплет, 200x290 мм.

Сборник включает 42 статьи, опубликованные в журнале «Автоматическая сварка» за период 2006-2010 гг., по проблемам разработки, изготовления и применения сварочных материалов, включая покрытые электроды, порошковые проволоки и ленты, сварочные флюсы, а также материалы для наплавки. Представлены обзоры состояния рынка сварочных материалов в Украине, России и Китае. Сборник предназначен для научных сотрудников, инженеров, технологов и аспирантов, занимающихся сварочными технологиями и их применением.

Стоимость сборника\* 140 грн./700 руб.



**СТЫКОВАЯ СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ:**

Тематическая подборка статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» в 2005-2010 гг. - Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2011. - 132 с. Мягкий переплет, 200x290 мм.

Сборник включает 24 статьи, опубликованные в журнале «Автоматическая сварка» за период 2005-2010 гг., по проблемам контактной стыковой сварки оплавлением и другим способам сварки давлением. Разделы сборника посвящены разработке технологии и оборудования для контактной сварки рельсов, стальных труб, арматуры и проката из высокопрочного алюминия. Рассматриваются также технологии прессовой сварки магнитоуправляемой дугой и сварки трением. Авторами статей являются известные в Украине и за рубежом ученые и специалисты в

области сварки давлением. Сборник предназначен для научных сотрудников, инженеров, технологов, конструкторов и аспирантов, занимающихся проблемами сварки давлением сталей, алюминиевых и титановых сплавов, интерметаллидов и других материалов.

Стоимость сборника\* 100 грн./500 руб.

\*Стоимость указана с учетом стоимости доставки заказной бандеролью соответственно для Украины и России.

Заказы на сборники просьба направлять:

Международная ассоциация «Сварка»

03680, г. Киев, ул. Боженко, 11, Украина

тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-54-84, 200-81-45

E-mail: journal@paton.kiev.ua

## Судно или морская платформа — сварочные системы «Fronius» везде находят применение

*С 1950 года компания «Fronius» разрабатывает комплексные решения для электродуговой и контактной точечной сварки. Инновационные сварочные системы характеризуются совершенным взаимодействием всех своих структурных компонентов и гарантируют высочайшее качество продукции, рентабельность и энергоэффективность. Среди широкого ряда высокотехнологичного оборудования «Fronius» особое место занимают сварочные системы, созданные для применения на судостроительных верфях и морских платформах.*

Имея за плечами более 60 лет производственного опыта компания «Fronius» создает профессиональное сварочное оборудование, идеально соответствующее требованиям заказчиков. Высококачественные комплектующие и тщательно продуманная технология изготовления позволяют выпускать новаторские системы для ручной, механизированной и автоматизированной сварки для различных сфер применения, и, в частности, для работы в области судостроения.

Оборудование «Fronius» удовлетворяет актуальным потребностям специалистов, работающих на судостроительных и судоремонтных заводах, а также на добывающих платформах. Пыль, дождь, мороз, влажность — сварочные системы устойчивы к воздействию внешних факторов и отличаются чрезвычайной надежностью.

Независимо от того, где и что Вы свариваете, цифровой принцип управления источника питания обеспечивает высокую стабильность дугового процесса и 100%-ю воспроизводимость результатов, кроме того, практически исключается необходимость проведения механической обработки изделий после сварки. Модульная конструкция и небольшой вес оборудования от «Fronius» облегчают процесс транспортировки и обеспечивают значительную гибкость применения в различных, даже самых труднодоступных местах. Благодаря дополнительной защите механизма подачи проволоки гарантируется высокая ударная прочность и температуростойкость, что является огромным преимуществом при работе в экстремально тяжелых условиях.

Кроме стандартных программных настроек и режимов, сварочные системы, разработанные для применения в судостроении, имеют расширенные возможности относительно использования дополнительных типов свариваемых материалов, а также различных присадочных материалов, в частности порошковых проволок. Оптимизированные характеристики источников питания позволяют достигать глубокого и равномерного проплавления, экономить сварочные материалы за счет сокращения разбрызгивания и, как результат, получать устойчивые к образованию трещин и коррозии швы, выдерживающие интенсивные динамические нагрузки, в том числе в открытом море.

Широкий ассортимент продукции компании «Fronius» открывает новые возможности применения. Остановимся вкратце на основных типах сварочного оборудования «Fronius» и на некоторых производственных задачах, которые уже сейчас успешно решаются с его помощью на ведущих судостроительных и судоремонтных предприятиях по всему миру.

Относительно новые инверторные источники питания серии TransSteel, в частности их специальное исполнение TransSteel Yard, уже широко используются для выполнения сварки разнообразных стальных конструкций на верфях. Инновационная технология Steel Transfer Technology для каждой конкретной задачи позволяет легко и быстро выбрать наиболее подходящие настройки, например, специально разработанный режим для корневого прохода и заполнения больших зазоров (Steel root) или же режим с максимальным проплавлением (Steel dynamic). Одними из многочисленных примеров использования систем TransSteel является сварка корня шва трубных соединений и соединение элементов перекрытий с заполнением зазора до 6 мм (режим Steel root), а также многопроходная свар-



Рис. 1. Выполнение сварки корпуса судна с помощью оборудования TransPuls Synergic на предприятии J&K Anlagenbau, Германия

\* Статья на правах рекламы.



Рис. 2. Автоматизированная система для тандем сварки TimeTwin на предприятии Pus-Werften, Германия

Fronius TimeTwin — это высокопроизводительный способ тандем сварки двумя плавящимися параллельно расположенными электродами в защитном газе. Две сварочные дуги позволяют значительно увеличить, по сравнению со стандартным процессом MIG/MAG, скорость сварки (до 6 м/мин) при максимально возможном качестве сварного шва и производительности. Автоматизированные системы для сварки TimeTwin применяются для выполнения одно- и многопроходных (толщина до 70 мм) швов при изготовлении корпусов алюминиевых танкеров, панельных линий, а также для ряда специальных задач, где предъявляются высочайшие требования относительно контроля тепловложения и механико-технологических характеристик соединения.

Революционная технология «холодного» переноса металла (CMT) от «Fronius» характеризуется наилучшими результатами при работе с материалами малой толщины и разнородными материалами (сталь и алюминий), обеспечивает выполнение качественных соединений при наличии зазоров, величина которых может превышать толщину основного металла, а также исключает появление брызг и деформаций после сварки. Интеллектуальная система управления распознает короткие замыкания и способствует стабильному капельному переносу посредством отвода проволоки — до 90 раз в секунду. Среди множества успешных примеров внедрения данного типа оборудования следует отметить системы для сварки труб (толщина стенки — 1,6 мм), панельных линий, алюминиевых лестниц, заграждений и других дополнительных компонентов, а также наплавки скользящей опоры гребного винта с минимальным перемешиванием основного материала.

Кроме всех перечисленных выше способов сварки и соответствующего оборудования, нельзя также не упомянуть о широком распространении на предприятиях отрасли оборудования для ручной дуговой сварки покрытыми электродами серии TransPocket, которое позволяет использовать сетевые и рабочие кабели длиной до 100 м, что является огромным преимуществом при работе на монтаже и в открытом море.

Все большее распространение на крупных судостроительных предприятиях получают новые, так называемые гибридные технологии. Ярким представителем практических нововведений является технология LaserHybrid от «Fronius», в основе которой лежит комбинация двух известных способов — лазерной и сварки MIG. Высокая скорость лазерной сварки и характерная для способа MIG способность работы при наличии зазоров позволяют достичь необходимого уровня проплавления, отличного формирования шва и увеличения производительности почти в 4 раза.

Постоянно ориентируясь на разработку высокоэффективных сварочных систем для применения в области судостроения, компания «Fronius» представляет на рынке действительно уникальный ассортимент продукции, который несет в себе массу преимуществ для клиентов. Очевидным доказательством этого является широкое признание и постоянно растущий интерес к инновационным сварочным технологиям «Fronius» во всем мире.



ООО «ФРОНИУС УКРАИНА»

07455, Киевская обл.,

Броварской р-н, с. Княжичи, ул. Славы, 24

Тел.: +38 044 277 21 41; факс: +38 044 277 21 44

E-mail: sales.ukraine@fronius.com

www.fronius.ua



XV МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

15-18.05.2012



организатор



ПРИ СОДЕЙСТВИИ НАЦИОНАЛЬНОГО КОМИТЕТА ПО СВАРКЕ РАН,  
НАЦИОНАЛЬНОГО АГЕНТСТВА КОНТРОЛЯ СВАРКИ,  
АЛЬЯНСА СВАРЩИКОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ,  
МЕССЕ ЭССЕН ГМБХ, СОЮЗА СВАРЩИКОВ ГЕРМАНИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, ЛЕНЭКСПО, +7 812 240 4040, доб. 152, 153, WWW.WELDING.LENEXPO.RU

## «Триада-сварка» демонстрирует робот MOTOMAN

Сегодня сварка является одним из ведущих технологических процессов промышленного производства в мире, так как создание неразъемных соединений лежит в основе многих производственных задач. В этой связи запуск промышленного сварочного робота японской фирмы «MOTOMAN», произведенный на базе технологического центра Запорожского предприятия «Триада-сварка», является очень важным и знаковым событием для всего промышленного региона.

В период бурного развития научно-технического прогресса и интенсификации производства интерес к промышленным сварочным роботам неуклонно растет, что в свою очередь ставит перед предприятиями-изготовителями робототехники новые задачи. Их решение обеспечивает повышение эффективности труда, выведение производственного процесса на современный уровень и высокое качество продукции.

«Триада-сварка» продемонстрировала возможности робота MOTOMAN серии SSA 2000, укомплектованного сварочным источником TransPuls Synergic 3200 фирмы «FRONIUS» (Австрия), сварочной горелкой ABIROB W500 с системой iCAT фирмы «BINZEL» (Германия). Робот осуществляет перемещение сварочной горелки во всех пространственных положениях и по различным криволинейным линиям (от простых кольцевых швов до зигзагообразных). В зависимости от сложности свариваемой детали варьировали скорость перемещения и угол наклона горелки. Все программы сварки были самостоятельно написаны специалистами предприятия «Триада-сварка», прошедшими специальное обучение по эксплуатации и программированию роботов MOTOMAN.



Предприятие «Триада-сварка» является системным интегратором в области сварки, представляет в Украине компанию YASKAWA NORDIK AB с торговым брендом MOTOMAN — одним из ведущих в мире производителей роботов с более чем 30-летним опытом производства и запуском в эксплуатацию 230 тыс. роботов по всему миру. Следует отметить тот факт, что сегодня каждый третий сварочный робот в мире — робот MOTOMAN.



На демонстрацию робота были приглашены участники традиционной Всеукраинской олимпиады сварщиков, проводимой Запорожским национальным техническим университетом. Будущие специалисты сварочного производства смогли увидеть в работе робот MOTOMAN, принять участие в практических упражнениях и оживленной дискуссии по проблеме роботизации производства в Украине.

Предприятие «Триада-сварка» постоянно уделяет внимание подготовке будущих специалистов в области сварки, вместе с кафедрой сварки университета проводит обучающие семинары, лекции для студентов 4-5 курсов.

В ходе демонстрации инженер-специалист по роботизации и сервисному обслуживанию М. А. Кинебас наглядно продемонстрировал все преимущества применения робота в производственном цикле. Так, для примера была дана сравнительная оценка продолжительности сварки электрических водонагревателей полуавтоматической сваркой в среде защитных газов (21 мин) и роботом MOTOMAN (8 мин 37 с) с полным проплавлением стыков без дефектов. Вывод: применение роботов обеспечивает такие преимущества, как надежность, экономическая эффективность, высокая производительность.

Е. Г. Красносельская,  
зам. директора «Триада-сварка»