

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. Пилярчик (Польша)
Г. А. Туричин (Россия)
Чжан Янмин (Китай)
Д. фон Хофе (Германия)

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

ИЗДАТЕЛЬ:

Международная ассоциация
«Сварка»

Адрес редакции:

03680, Украина, Киев-150,
ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАНУ
Тел.: (38044) 287 6302, 529 2623
Факс: (38044) 528 3484, 529 2623
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Редакторы:

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

НОВОСТИ 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Ющенко К. А., Устинов А. И., Задерий Б. А., Савченко В. С., Мельниченко Т. В., Куренкова В. В., Звягинцева А. В., Гах И. С. Влияние нанофольги системы Ni-NbC на структуру швов жаропрочных сплавов, выполненных электронно-лучевой сваркой 5

Жданов С. Л., Позняков В. Д., Максименко А. А., Довженко В. А., Васильев В. Г., Высоколян Н. В., Коробка В. А. Структура и свойства сварных соединений стали 10Г2ФБ, выполненных дуговой сваркой 12

Хорунов В. Ф., Максимова С. В., Бутенко Ю. В., Малый А. Б. Прочность паяных соединений жаропрочного никелевого сплава Инконель 718, полученных с помощью палладиевых припоев 17

Бондарев А. А., Терновой Е. Г. Особенности формирования швов и свойства соединений алюминиевых и магниевых сплавов в условиях имитирующих космические 22

Махненко О. В., Тимошенко А. Н., Мужиченко А. Ф., Гончаров П. В. Совершенствование технологии дуговой точечной сварки нахлесточных соединений по результатам математического моделирования 28

Степанов Г. В., Бабуцкий А. И., Мамеев И. А., Чижик А. В., Савицкий В. В., Ткачук Г. И., Пащин Н. А. Повышение циклической долговечности металлических материалов и сварных соединений обработкой импульсным электрическим током 35

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Лебедев В. А., Лендел И. В., Лендел В. И., Пичак В. Г. Направления совершенствования вспомогательного оборудования для сварочного производства 40

Зайффарт П., Гедде Р. Обработка трехмерных изображений для систем программирования роботизированной сварки 44

Коледа В. Н., Илюшенко В. М. Оптимизация параметров дополнительной газовой защиты при сварке и наплавке меди и ее сплавов под флюсом 47

Корниенко А. Н. Полувековой юбилей первой выставки достижений сварочного производства 51

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Назаренко О. К., Шевчук С. А. Выбор расположения датчика тока в высоковольтных источниках питания сварочных пушек 55

Диссертации на соискание ученой степени 56

По страницам журнала «Welding and Cutting», 2010, № 2 58

ХРОНИКА

Дружественные контакты 62

Международная конференция «МЕЕ-2010» 63

Технический семинар «Авиастроение — технологии и оборудование для сварки» 64

Памяти А. А. Россошинского 65

ИНФОРМАЦИЯ 66

Разработано в ИЭС 11, 39, 54

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. Khitrovskaya (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) 287 63 02, 529 26 23
Fax: (38044) 528 04 86
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Editors:

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

I. V. Petushkov, 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

NEWS	3
SCIENTIFIC AND TECHNICAL	
<i>Yushchenko K. A., Ustinov A. I., Zaderiy B. A., Savchenko V. S., Melnichenko T. V., Kurenkova V. V., Zvyagintseva A. V., Gakh I. S.</i> Effect of nanofoil of Ni–NbC system on structure of heat-resistant alloy welds made by EBW	5
<i>Zhdanov S. L., Poznyakov V. D., Maksimenko A. A., Dovzhenko V. A., Vasiljev V. G., Vysokolyan N. V., Korobka V. A.</i> Structure and properties of steel 10G2FB welded joints made by arc welding	12
<i>Khorunov V. F., Maksimova S. V., Butenko Yu. V., Malyi A. B.</i> Strength of heat-resistant nickel alloy Inconel 718 brazed joints, produced using palladium brazing alloys	17
<i>Bondarev A. A., Ternovoy E. G.</i> Peculiarities of weld formation and properties of welds of aluminium and magnesium alloys under conditions, simulating space conditions	22
<i>Makhnenko O. V., Timoshenko A. N., Muzhichenko A. F., Goncharov P. V.</i> Improvement of technology of arc spot welding of overlap joints using results of mathematic modeling	28
<i>Stepanov G. V., Babutskiy A. I., Mameev I. A., Chizhik A. V., Savitsky V. V., Tkachuk G. I., Pashchin N. A.</i> Improvement of cyclic life of metallic materials and welded joints by a pulsed current treatment	35
INDUSTRIAL	
<i>Lebedev V. A., Lendel I. V., Lendel V. I., Pichak V. G.</i> Trends in improvement of auxiliary equipment for welding manufacturing	40
<i>Seyffarth P., Gaede R.</i> Processing of three-dimensional images for systems of the robotic welding programming	44
<i>Koleda V. N., Ilyushenko V. M.</i> Optimizing of parameters of additional gas protection in submerged arc welding and hard-facing of copper and its alloys	47
<i>Kornienko A. N.</i> Half-century jubilee of the first exhibition of welding industry achievements	51
BRIEF INFORMATION	
<i>Nazarenko O. K., Shevchuk S. A.</i> Selection of current sensor arrangement in high-voltage power sources of welding guns	55
Theses for scientific degree	56
Review of journal «Welding and Cutting», 2010, No.2	58
NEWS	
Friendly relations	62
International Conference «MEE–2010»	63
Technical seminar «Aircraft manufacturing — technologies and equipment for welding»	64
In memory of A. A. Rossoshinsky	65
INFORMATION	66
Developed at the PWJ	11, 39, 54

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.

ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ СВАРКА РЕЛЬСОВ ВАННЫМ СПОСОБОМ ПЛАВЯЩИМСЯ МУНДШТУКОМ

В течение 2009-2010 гг. специалистами ИЭС им. Е.О. Патона создана специальная технология, оборудование и сварочные материалы, позволяющие выполнять качественную высокопроизводительную сварку рельсов различных типоразмеров в полевых условиях. Новая технология, разработанная на основе ранее предложенного в ИЭС способа электродуговой сварки закладным электродом, получила название «электродуговая

ФОРСАЖ-500 Рязанского государственного приборного завода. Питание осуществляется как от двухфазной сети напряжением 380 В, так и от автономного дизельного электрогенератора мощностью 25 кВт, при этом потребляемая при сварке мощность составляла до 10 кВт. Среднее машинное время сварки стыка рельсов типа Р65 составляет около 20 мин, что позволяет достигнуть производительности до 15 стыков в смену. Данная технология широко использовалась при реконструкции линии скоростного трамвая в Киеве. Было сварено около 900 стыков рельсов типа Р65, Т-62 и бесшечных трамвайных рельсов.



сварка рельсов ванным способом плавящимся мундштуком». Ее отличительной особенностью является использование самозащитной порошковой проволоки, подаваемой через продольный канал в специальном плоском плавящемся мундштуке, что позволяет выполнять сварку при зазоре в стыке 15...18 мм, а в отдельных случаях до 22 мм. Разработанный специализированный сварочный аппарат АРС-4 отличается портативностью (масса 36 кг) и легко переносится на сварку различных рельсов. В качестве источника сварочного тока использован инвертор

Выполненная работа показала, что электродуговая сварка рельсов ванным способом плавящимся мундштуком является высокоэффективным процессом по сравнению с ручной дуговой сваркой ванным способом и алюмотермитной сваркой, и может применяться для сварки железнодорожных, трамвайных и крановых рельсов различного назначения.

НОВЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

Новая система Hylntensity волоконного лазера HFL015 от «Hypertherm» уникальна тем, что все ее компоненты разработаны и

созданы для совместной работы как одна целостная система резки. В отличие от изделий других производителей волоконных лазеров система от «Hypertherm» включает источник питания, режущую головку, подачу газа, консоли соединения оператора, регулировки движения и программное обеспечение. В компании «Hypertherm» считают, что подход, основанный на комплектности поставки, облегчит заказчикам использование лазерной резки, в том числе при резке тонкого металла. К тому же, система функционирует на традиционных регулирующих платформах «Hypertherm» с предварительно разработанными процессами резки для значительно упрощенного объединения стола и функционирующего узла для достижения более высокого уровня эффективности по сравнению с другими решениями лазерной резки.

Две другие новые системы Powermax65® и Powermax85® «Hypertherm» были выпущены с более широким набором выбора горелок, имеют более широкие технологические возможности и более строгую конструкцию горелки для увеличения долговечности при сложной среде резки. Достоинствами горелок являются эргономическая ручная горелка под углом 75°, ручная горелка под углом 15° для строжки и резки в стесненных условиях, 38-сантиметровая машинная горелка на полную длину и 15-сантиметровая машинная горелка с коротким стволом для роботизированных применений и резки труб, позволяющая сварщикам расширить сферу объектов применения плазменной технологии. К тому же, горелки, которые являются частью нового Duramax от серии «Hypertherm», примерно в пять раз проще и долговечнее, чем раньше.

Система HyPerformance HP800XD, представленная на выставке BuroBLECH2010 (26-30 ок-

тября, Розендаль, Нидерланды) на токи до 800 А, имеет самый широкий спектр производственного применения вплоть до способности резки самой толстой нержавеющей стали и алюминия, которые доступны на рынке. Она имеет Ну-Definition® режущие характеристики мягкой стали до 80 мм и может прорезать 75 мм и резать 160 мм нержавеющую сталь и алюминий. Способность прорезки толщины относится к PowerPierce, патентуемой технологии, которая уменьшает повреждения горелки с помощью охлаждающего щита для сопротивления расплавленному металлу во время прорезки и резки.



При испытании установлено, что даже после прореза 75 мм нержавеющей стали в течение 400 раз достигается высокое качество резки. В то же время HP800XD может легко резать тонкий металл, включая строжку, не нуждаясь в дополнительных горелках.

В отличие от этих качеств изготовители, которые нуждались в резке широкого ряда металлов и толщин, традиционно должны были использовать две или более систем для завершения работы.

В дополнение к этим новым системам и технологиям компании «Hypertherm» и «Centricut» показали свою завершенную ручную продукцию Powermaxa.

На выставке также продемонст-

рирована выпущенная в 2010 г. версия компоновочного режущего программного обеспечения и автоматическое оборудование «Hypertherm», включая ЧПУ и регуляторы высоты горелки.

УДВОЕННАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРИ СВАРКЕ ДВОЙНОЙ ПРОВОЛОКОЙ

Представители машиностроительной отрасли вынуждены удовлетворять постоянно растущие требования к производительности труда и эффективности производства при неизменно высоком качестве продукции. Зачастую приходится стыковать кованные или литые стальные детали. Эксперты «Stadler Rail Group» используют сварочных роботов для сварки опор ходовых тележек с применением стандартного материала S355C толщиной листа более 80 мм. Если прежде для сварки продольной опоры требовалось восемь часов сварки, то сейчас компания использует систему двойной проволоки TimeTwin Digital, получая в результате две продольных опоры вместо одной — и это всего лишь за семь с половиной часов.

В 2006 г. эксперты Stadler Winterthur (г. Винтертур, Швейцария) решили инвестировать в повышение производительности сварочных систем. Это, прежде всего, затронуло процесс сварки стыков ходовых тележек, являющихся несущей основой рельсовых транспортных средств. В качестве альтернативы специалисты опробовали лазерную и гибридную лазерную сварку, а также сварку двойной проволокой MAG.

В результате выбор пал на метод сварки двойной проволокой. Систему TransPuls Synergic 5000 от компании «Fronius» специалисты «Winterthur» выбрали на основании имеющегося по-

ложительного опыта работы с системами данного производителя.

За прошедшее время это решение окупилось на практике при работе в две с половиной смены. Сварочный робот дает увеличение выработки более, чем в два раза. Столь впечатляющее повышение производительности обусловлено увеличением мощности сварки и более высокой скоростью работы робота.

Система двойной проволоки TimeTwin Digital с двумя источниками тока TransPuls Synergic 5000 Comfort в первую очередь сваривает более длинные швы опоры ходовой тележки. Разные швы регистрируются в виде заданий. Робот вызывает соответствующее задание. Для сварки



корня шва управление системы TimeTwin Digital переключается на однопроволочный режим. На следующем этапе обе проволоки, в основном, по очереди осуществляют сварку по всей ширине шва.

Преимущества эффективности этой системы огромны: отпадает необходимость контроля во время сварки и подварки вручную после окончания процесса. Оператор оборудования может сконцентрироваться на подготовке следующей опоры к сварке. Повторная обработка больше не является необходимостью, так как система TimeTwin Digital работает практически без сварочных брызг. Результаты контрольных проверок сварных швов наглядно подтверждают высокое качество соединений.



ВЛИЯНИЕ НАНОФОЛЬГИ СИСТЕМЫ Ni–NbC НА СТРУКТУРУ ШВОВ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

Академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО**, **А. И. УСТИНОВ**, д-р физ.-мат. наук,
Б. А. ЗАДЕРИЙ, канд. техн. наук, **В. С. САВЧЕНКО**, д-р техн. наук,
Т. В. МЕЛЬНИЧЕНКО, **В. В. КУРЕНКОВА**, **А. В. ЗВЯГИНЦЕВА**, кандидаты техн. наук, **И. С. ГАХ**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучено влияние наночастиц карбида ниобия на структуру и свойства сварных швов никелевых сплавов, выполненных электронно-лучевой сваркой. Легирование металла шва наночастицами карбида ниобия осуществляли путем введения в сварочную ванну композитной наноструктурированной фольги системы Ni–NbC, полученной методом электронно-лучевого испарения в вакууме компонентов с последующим совместным осаждением их паровых потоков на подложку. Показано, что введение наночастиц карбида ниобия в сварочную ванну приводит к формированию в зоне шва кристаллитов с ячеистой субструктурой, вдоль границ которых располагаются наночастицы NbC. Анализируется влияние такой структуры сварных швов на их механические свойства.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, электронно-лучевое испарение, никелевый сплав, сварной шов, фольга, легирование, модифицирование, монокарбид ниобия, наночастицы, внутризеренная субструктура

При сварке жаропрочных дисперсионно-твердеющих сплавов на никелевой основе главные трудности связаны с необходимостью предотвращения образования горячих трещин в швах и обеспечения соответствия сварными соединениями комплексу механических, технологических и служебных характеристик. Одним из путей решения этих задач является оптимизация легирования металла шва. При этом предпочтение отдается легирующим элементам, улучшающим пластичность сварного шва при высокой температуре (даже за счет снижения его прочности по сравнению с основным металлом). Благодаря введению в металл шва молибдена, ванадия, кобальта, марганца, титана, бора, рения, гафния, иттрия, их боридов, оксидов и карбидов и управлению технологическим процессом сварки удастся избежать образования трещин как в металле шва, так и в зоне термического влияния (ЗТВ) [1–5].

Однако традиционные способы легирования сварного шва имеют ряд недостатков. Так, легирование металла шва молибденом и вольфрамом уменьшает стойкость против высокотемпературной коррозии, наличие бора снижает жаропрочность, а введение рения, гафния и иттрия осуществить технологически весьма сложно. В связи с этим оптимизация способа легирования металла шва при сварке жаропрочных дисперсионно-твердеющих никелевых сплавов является актуальной задачей.

Одним из наиболее применяемых металлургических способов борьбы с горячими трещинами является измельчение структуры металла шва и ЗТВ путем легирования сварочной ванны модификаторами [6–8]. Введение небольших добавок нитридов, карбидов, оксидов и других элементов способствует получению мелкозернистой структуры металла шва благодаря гетерогенной кристаллизации [9]. Модифицирование также влияет на интенсивность протекания процессов диффузии в расплаве и способствует снижению уровня ликвации в металле шва [7].

Использование тонких композиционных фольг, состоящих из компонентов наноразмерного масштаба, в качестве присадочного сварочного материала при сварке плавлением либо переходного элемента при сварке давлением дало положительные результаты [10, 11]. Такие фольги, полученные совместной конденсацией из паровой фазы различных компонентов и содержащие наночастицы, обеспечивают активизацию диффузионных процессов при сварке [12–15]. Можно предположить, что введение тугоплавких наночастиц в сварочную ванну будет также способствовать увеличению количества центров кристаллизации, а в итоге — измельчению зерна, формированию равноосной структуры и равномерному распределению легирующих элементов в металле шва.

В настоящей работе на примере модельных материалов (никеля) рассмотрена возможность модифицирования структуры сварных швов с помощью присадок в виде фольг, содержащих наноразмерные карбидные фазы, и дана оценка прочностным свойствам полученных сварных соединений.

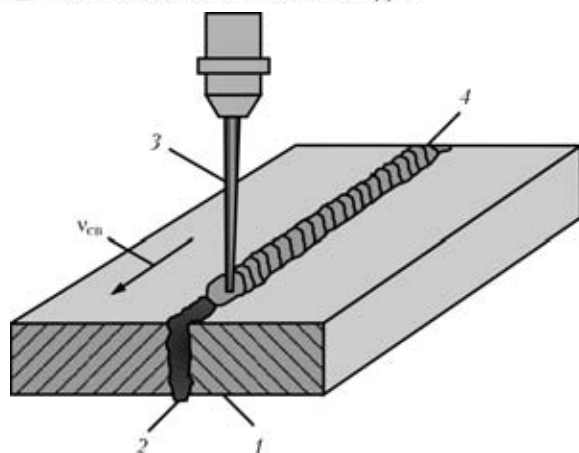


Рис. 1. Схема процесса ЭЛС с применением наноструктурированной фольги в качестве присадки: 1 — свариваемый металл; 2 — присадочная фольга; 3 — электронный луч; 4 — шов

Для оценки влияния вводимых в сварочную ванну наночастиц на структуру металла сварных швов в качестве модельного материала взяли чистый никель как основу жаропрочных сплавов. При выборе химического состава легирующих присадок учитывали необходимость обеспечения соответствия присадочного и свариваемого материалов. С этой позиции предпочтение было отдано монокарбиду ниобия, который отличается высокой термодинамической стабильностью и в качестве структурной составляющей входит во многие жаропрочные сплавы.

Присадочный материал на основе композита системы Ni-NbC в виде фольги толщиной 50...150 мкм получали способом электронно-лучевого испарения компонентов в вакууме из двух слитков с последующим совместным осаждением их паровых потоков на подложку при заданной температуре. Принципиальная схема процесса осаждения приведена в работах [10, 11]. Предварительно на подложку осаждали слой CaF₂, что обеспечивало легкое отделение от нее фольги. Давление в камере при осаждении поддерживали на уровне примерно 5·10⁻³ Па. Температура подложки в процессе осаждения составляла 550...600 °С.

Образцы из никеля для эксперимента вырезали из заготовок электроискровым способом, перед сваркой их шлифовали, затем обезжировали. Присадку вводили встык двух свариваемых половинок заготовки в виде фольг различной толщины и химического состава (рис. 1, таблица).

Выбор электронно-лучевой сварки (ЭЛС) в вакууме обусловлен возможностью регулирования температурно-временных условий ведения процесса, объема и формы шва, а также ограничением негативного влияния остаточной атмосферы на металл шва. Сварку выполняли электронным лучом на установке У-212м мощностью 30 и 14 кВт. Для интенсивного перемешивания материала присадки с основным металлом сварку

Микротвердость образцов сварных швов, выполненных на никеле с использованием присадочной фольги различного химического состава

NbC в фольге	NbC в металле шва	HV, МПа
Без фольги	0	1200
6,7	0,68	1310
8,8	0,73	1385
20,0	0,87	1475
26,0	0,96	1495
28,0	1,07	1515
35,5	1,37	1735
60,0	2,70	1865

выполняли на небольшой (около 8...12 м/ч) скорости с поперечным сканированием электронного пучка.

Образцы присадочной фольги и сварных соединений для проведения металлографического анализа готовили по стандартной методике на шлифовально-полировальном станке «Abramin» фирмы «Struers». Структуру и химический состав фольги и зоны сварного шва анализировали с помощью сканирующего микроскопа «SamScan», оснащенного энергодисперсионной системой локального анализа «Energy 200». Микротвердость сварного шва измеряли с помощью микротвердомерной приставки к оптическому микроскопу «Polyvar-Met» при нагрузке 0,49 Н по методу Виккерса. Структуру присадочной фольги и сварного шва в планарном и поперечном сечениях анализировали с использованием просвечивающего электронного микроскопа «Hitachi H-800» при ускоряющем напряжении 200 кВ. Фольги для такого исследования подвергали механическому утонению и полированию на установке «GATAN 656» с последующим утонением с помощью бомбардировки поверхности под углом 3° ионами аргона с энергией 5 кэВ при токе ионной пушки 20 мА на установке «PIPS 691».

Рентгенодифракционный анализ присадочной композитной фольги проводили в стандартной геометрии $\theta-2\theta$ на дифрактометре «ДРОН-4» в излучении $Cu_{K\alpha}$.

Присадочная композитная фольга Ni-6,7...35,5 мас. % NbC, полученная методом электронно-лучевого испарения, имела равномерное распределение компонентов по толщине δ (рис. 2). Поперечное сечение присадочной фольги в исходном состоянии имеет столбчатую структуру, ширина столбчатых кристаллитов приблизительно составляет 300 нм (рис. 3). Низкая температура конденсации обеспечивает формирование в конденсате карбидных частиц наномасштабного размера, что подтверждается наличием широких дифракционных пиков (указаны стрелками на рис. 4, а) от

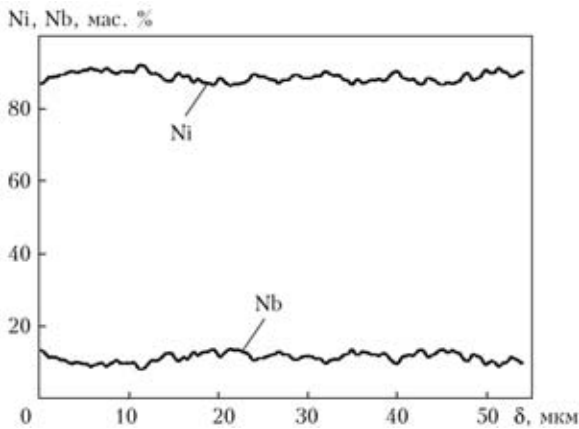


Рис. 2. Распределение элементов по толщине δ композитной фольги системы Ni–NbC

NbC на дифрактограмме образца фольги Ni–6,7 мас. % NbC после осаждения. Узкие пики NbC появляются на дифрактограмме только после отжига фольги при температуре 1100 °C в течение 2 ч, что свидетельствует об укрупнении карбидных частиц (рис. 4, б).

С возрастанием массовой доли NbC до 35,5 % на дифрактограмме исходного образца появляются выразительные пики от никеля и карбида ниобия (рис. 4, в), т. е. увеличение содержания карбида ниобия в составе композита сопровождается укрупнением карбидных частиц.

Согласно результатам рентгеноспектрального микроанализа при использовании такой фольги в качестве присадочного материала формируются плотные бездефектные сварные швы с равномерным и регулярным распределением карбидных частиц по всему объему шва (рис. 5). Следует отметить, что такую равномерность распределе-

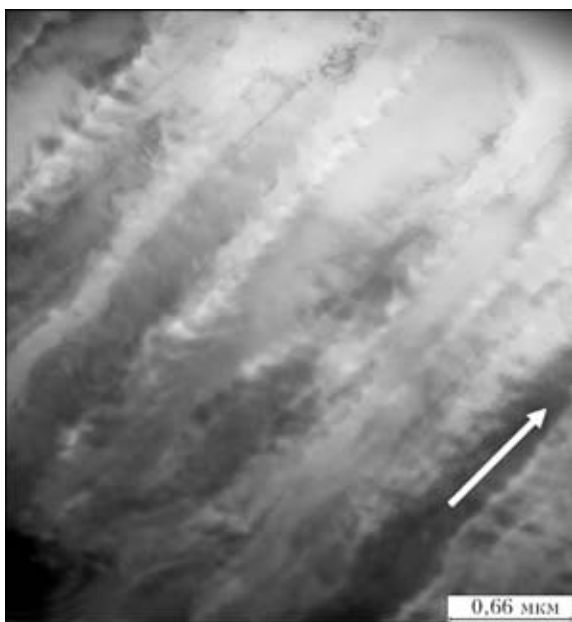


Рис. 3. Микроструктура образца композитной фольги Ni–6,7 мас. % NbC (стрелкой показано направление роста кристаллитов)

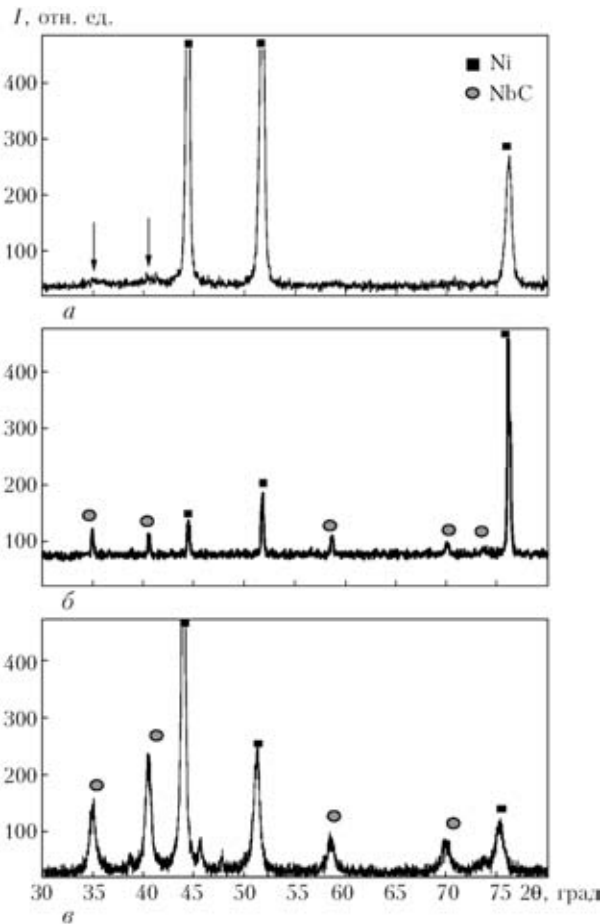


Рис. 4. Дифрактограммы образцов композитной фольги Ni–6,7 мас. % NbC после осаждения (а), последующего отжига при 1100 °C в течение 2 ч (б) и Ni–35,5 мас. % NbC (в), полученных в излучении CuK_α

ния вводимых частиц по всей сварочной ванне трудно обеспечить при ее модифицировании с помощью порошковых модификаторов. Видно, что при использовании присадочной фольги частицы NbC наноразмерного масштаба в процессе ЭЛС и конвективного перемешивания сварочной ванны равномерно распределяются в объеме металла формирующегося шва. При содержании в фольге примерно 28 мас. % NbC его среднее содержание в металле шва составляло около 1,07 мас. %. Увеличение содержания NbC в присадочной фольге от 6,7 до 35,5 мас. % приводит к возрастанию массовой доли карбидных частиц в металле шва (см. таблицу). Так, при содержании в фольге до 10 мас. % NbC массовая доля карбидной фазы в шве составляла 0,68...0,73 %, а от 20 до 60 мас. % NbC массовая доля этой фазы возрастала от 0,87 до 2,70 %.

При сварке чистого никеля без применения присадочной фольги в зоне соединения формировалась структура со слабо выраженной направленностью первичных кристаллитов к поверхности сварного шва (рис. 6, а). Размер поперечного сечения кристаллитов составлял 80...200 мкм, а их длина — 150...500 мкм. Микроструктура зерен

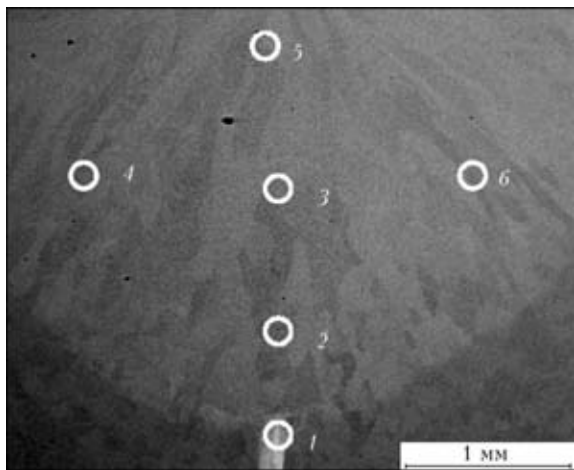


Рис. 5. Микроструктура металла сварного шва, полученного с использованием композитной фольги Ni–28 мас. % NbC (снимок выполнен в режиме фазового контраста; цифрами обозначены точки определения локального химического состава): 1 — 19,90; 2 — 1,11; 3 — 1,15; 4 — 1,00; 5 — 1,47; 6 — 1,05 NbC мас. %

сварного шва однородная, без явных выделений вторичных фаз (рис. 6, а, в).

При использовании присадочного материала в виде фольги Ni–NbC с содержанием NbC около 6,7 мас. % наблюдается незначительное (до 50...120 мкм) уменьшение поперечного размера зерен. При этом первичные зерна имели более равноосную полиэдрическую форму (рис. 6, б, г). Присутствие наноразмерных карбидных частиц в сварочной ванне способствует измельчению первичных кристаллитов, формирующихся на линии сплавления с основой (рис. 6, д, е). Поперечный размер полиэдрических зерен на фронте кристаллизации в металле уменьшался от 150...300 (для шва, полученного без присадки) до 50...70 мкм, что является положительным моментом для предотвращения формирования столбчатой ориентированной структуры первичных кристаллитов.

Металлографическим травлением выявлена внутренняя субструктура зерен в виде субграниц,

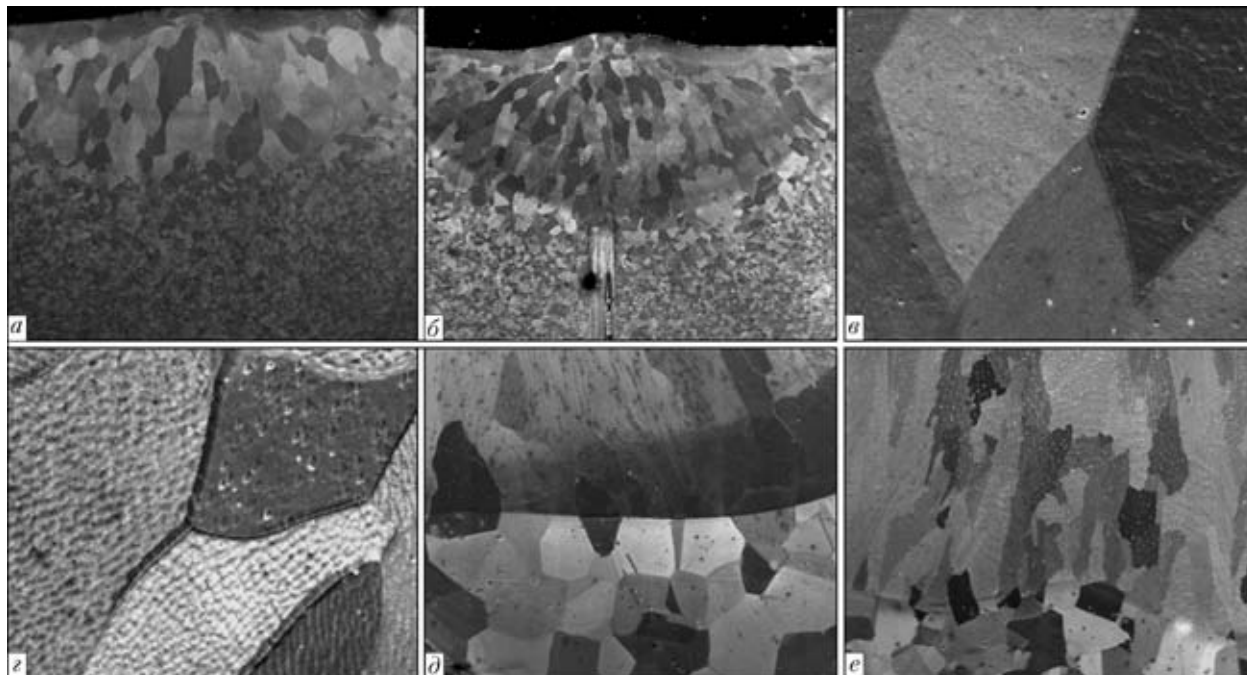


Рис. 6. Микроструктуры металла сварных швов, выполненных на никеле без наноструктурированной присадки (а, в, д) и с использованием присадочной фольги Ni–6,7 мас. % NbC (б, г) и Ni–20 мас. % NbC (е)

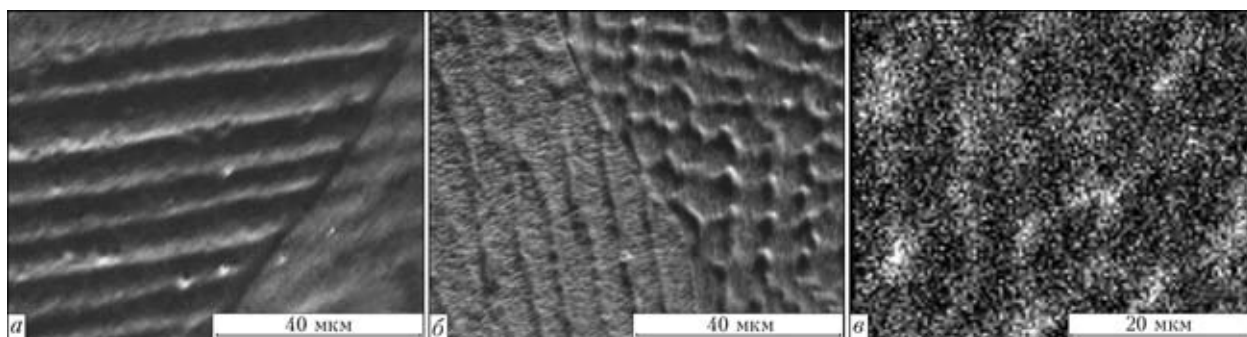


Рис. 7. Субструктуры первичных зерен металла сварных швов, выполненных на никеле при содержании в металле шва 8,86 (а) и 35,5 (б) мас. % NbC, и электронно-микроскопическое изображение распределения ниобия в единичном кристаллите (в) (участки со светлым контрастом на субграницах соответствуют 3,04 мас. % NbC)

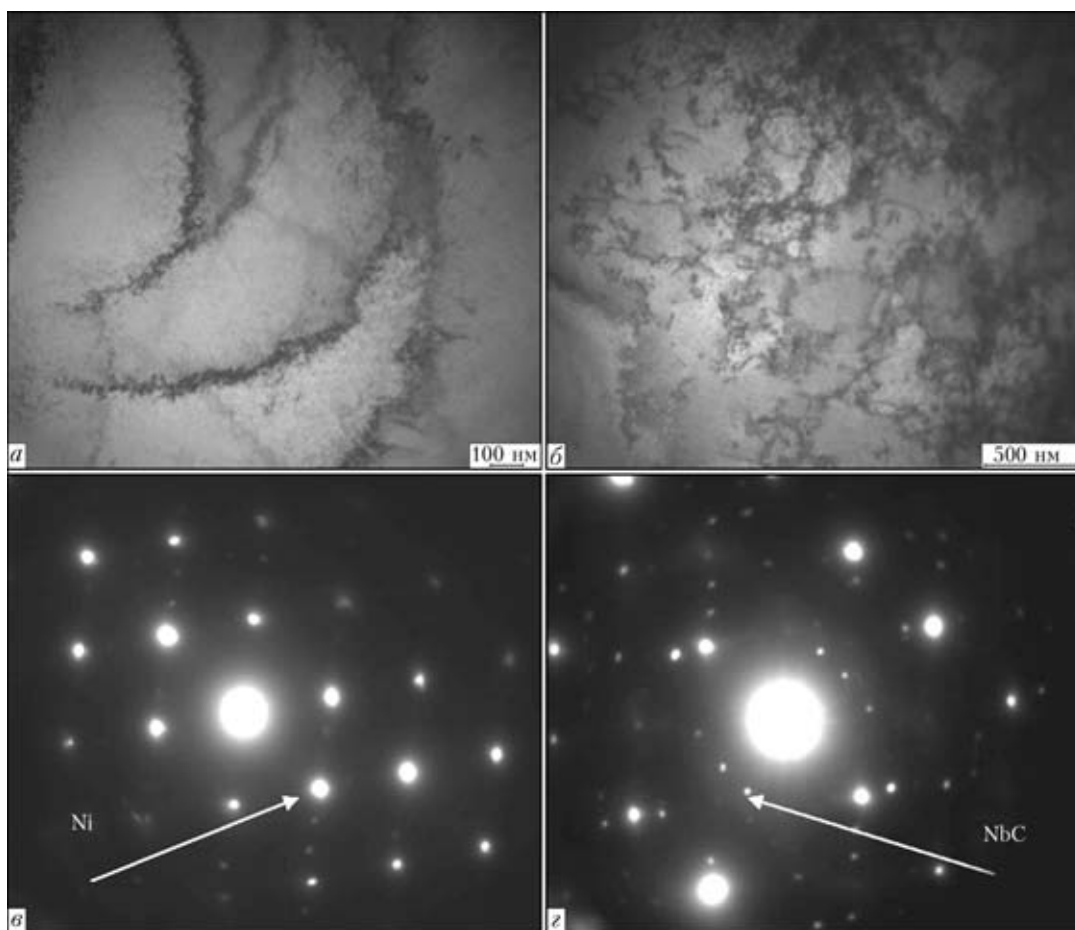


Рис. 8. Микроструктуры (*a, б*) и соответствующие электронограммы (*в, г*) участков металла сварного шва, выполненного с использованием присадки Ni–NbC, по центру субкристаллов (*a, в*) и их границам (*б, г*)

имеющих определенную ориентацию в объеме отдельно взятого кристаллита. Субструктура проявляется в большей степени при повышении массовой доли частиц NbC в сварочной ванне, т. е. с повышением содержания NbC в присадочном материале (см. таблицу). При увеличении содержания второй фазы границы субзерен выражены и развиты в большей степени (рис. 7, *a, б*). При рентгеноспектральном анализе путем сканирования площади единичного кристаллита в металле сварного шва определено, что фаза, обогащенная ниобием, распределяется по субграницам ячеек первичных кристаллитов (рис. 7, *в*).

Электронно-микроскопическое исследование центральных участков субзерен показало, что они не содержат частицы NbC и характеризуются низкой плотностью дислокаций (рис. 8, *a, в*). Участки, расположенные вблизи субзерен, содержат частицы NbC (рис. 8, *г*) и отличаются высокой плотностью дислокаций (рис. 8, *в*).

При увеличении содержания NbC в фольге до 60 мас. % на субграницах первичных кристаллитов сварного шва наблюдалось не только повышение массовой доли ниобия, но и выделение дискретных частиц NbC размером 0,5...1,0 мкм (светлые частицы), структура которых согласно

электронограмме (рис. 9) соответствует стехиометрическому карбиду NbC.

Сварка чистого никеля не представляет трудностей, поскольку при его нагреве или охлаждении фазовые превращения не происходят. Можно предположить, что при переохлаждении расплава чистого никеля в его объеме формируются устойчивые группировки атомов, некоторые из них становятся центрами кристаллизации. Особенностью формирования сварных швов никеля является то, что расплавленный металл сварочной ванны характеризуется большой чувствительностью к примесям, расположенным по границам первичных зерен и субзерен металла шва. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при введении в ванну присадочных материалов, содержащих тугоплавкие частицы карбида, последние оказывают двойное влияние на структуру металла шва. Во-первых, они могут являться центрами зарождения первичных кристаллитов, что обеспечивает уменьшение их размера и изменение формы в сторону более равноосной; во-вторых, попадая в тело зерна, могут способствовать формированию ячеистой субструктуры первичных зерен благодаря преимущественному выделению на границах субзерен. Совокупность субзерен, гра-

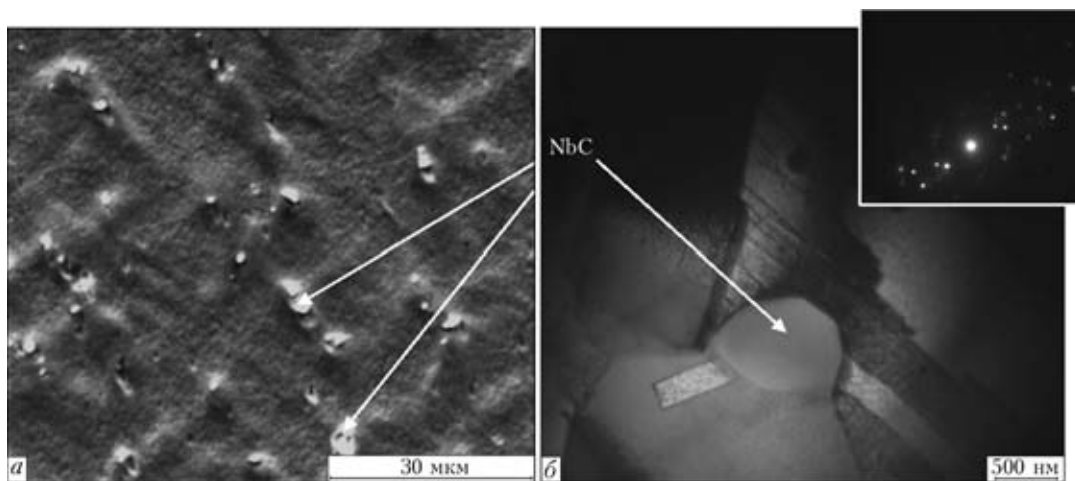


Рис. 9. Картина распределения карбидной фазы NbC в объеме первичного кристаллита в металле сварного шва, выполненного с применением присадочной композитной фольги Ni–60 мас. % NbC (а) и электронно-микроскопическое темнопольное изображение карбидной частицы, полученное в рефлексе NbC (б)

ницы которых обогащены карбидной фазой и ориентированы определенным образом в пределах первичного зерна, по сути является армированной субструктурой зерен. Границы таких субзерен по своим характеристикам (дефектности, уровню напряжений) сравнимы с границами первичных зерен и при деформации материала будут препятствовать эволюции дислокационной структуры, что может оказать влияние на механические свойства сварного соединения.

Проведенные исследования влияния содержания наночастиц NbC на прочностные свойства сварных швов показали, что по мере увеличения их массовой доли в сварочной ванне микротвердость материала в зоне шва возрастает от 1200 (для чистого никеля) до 1865 МПа (при использовании присадки фольги Ni–35,5 мас. % NbC). При этом средняя кратковременная прочность сварных соединений, полученных с использованием присадочной фольги Ni–NbC, увеличивается до 343 МПа по сравнению с прочностью швов (325 МПа), выполненных без применения присадки, тогда как предел текучести $\sigma_{0,2}$ увеличивается в 2 раза (до 248 МПа) по сравнению с чистым никелем ($\sigma_{0,2} = 126$ МПа). Таким образом, модифицирующее воздействие наночастиц карбида ниобия на структуру сварных швов в целом обеспечивает повышение кратковременной прочности сварных соединений в состоянии после сварки при небольшом снижении вязкости соединений.

Проведенный структурный анализ показал, что наибольший модифицирующий эффект наночастиц карбида ниобия имеет место при их содержании в присадочной фольге до 15...20 мас. %. Повышение содержания NbC в присадочной фольге более 35,5 мас. % приводит к выделению по границам первичных зерен в металле сварного шва крупных частиц карбида ниобия, которые после отжига материала образуют карбидные це-

почки, что может отрицательно влиять на механические свойства сварных соединений при высоких температурах и приложенных напряжениях.

Механические испытания сварных соединений никелевого сплава ЭИ698, полученных с применением композиционной присадки Ni–NbC, проведенные при температуре 600 °С, показали, что $\sigma_b = 805$ МПа и $\sigma_{0,2} = 440$ МПа соответствуют уровню свойств основного металла.

Таким образом, преимущественное распределение наночастиц карбида ниобия по границам субзерен способствует упрочнению шва, повышению его микротвердости, а также может повлиять на повышение жаропрочности и трещиностойкости сварных соединений [16].

1. Багрянский К. В., Кузьмин Г. С. Сварка никеля и его сплавов. — М.: Машгиз, 1963. — 163 с.
2. Ющенко К. А., Квасницкий В. Ф. Современные проблемы сварки и пайки жаропрочных сплавов // Проблемы технологии сварки теплоустойчивых, жаростойких и жаропрочных высоколегированных сталей и сплавов: Тез. докл. II Всесоюз. конф., г. Николаев, 24–26 сент. 1985. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1985. — С. 3–5.
3. Морочко В. П., Якушин Б. Ф., Федоров В. Г. Влияние легирования на свойства сварного соединения жаропрочного сплава ХН73МБТЮ // Свароч. пр-во. — 1976. — № 8. — С. 24–27.
4. Ющенко К. А., Савченко В. С., Звягинцева А. В. Влияние термообработки и степени легирования на структурные изменения никелевых сплавов // Автомат. сварка. — 2004. — № 7. — С. 14–16.
5. Закс И. А. Электроды для дуговой сварки сталей и никелевых сплавов: Справоч. пособие. — СПб: Welcome, 1996. — 384 с.
6. Фурман Е. Л., Жеребцов С. Н., Гурдин В. И. Модифицирование жаропрочных никелевых сплавов ультрадисперсными порошками тугоплавких частиц // Технология машиностроения. — 2007. — № 1. — С. 7–9.
7. Еремин Е. Н. Модифицирование металла шва при электрошлаковой сварке жаропрочного сплава ХН77ТЮР // Автомат. сварка. — 2007. — № 9. — С. 45–49.
8. Ющенко К. А., Яровицин А. В., Звягинцева А. В. Свойства соединений жаропрочных никелевых сплавов, выполненных микроплазменной порошковой сваркой // Там же. — 2008. — № 9. — С. 5–9.



9. *Ефименко Н. Г.* Модифицирование, рафинирование и легирование иттрием применительно к сварке сталей // Там же. — 2002. — № 6. — С. 9–14.
10. *Патон Б. Е., Иценко А. Я., Устинов А. И.* Применение нанотехнологии неразъемного соединения перспективных легких металлических материалов для аэрокосмической техники // Там же. — 2008. — № 12. — С. 5–12.
11. *Диффузионная сварка микродисперсного композита АМг 5 + 27 % Al₂O₃ с применением нанослойной фольги Ni/Al / А. Я. Иценко, Ю. В. Фальченко, А. И. Устинов и др.* // Там же. — 2007. — № 7. — С. 5–9.
12. *Влияние ультрадисперсных карбидов в порошковых проволочках на свойства теплоустойчивого наплавленного металла / И. Я. Рябцев, И. А. Кондратьев, Н. Ф. Гадзыра и др.* // Там же. — 2009. — № 6. — С. 13–16.
13. *Gleiter H.* Nanostructured materials. Basic concepts and microstructure // Acta Mater. — 2000. — **48**, № 1. — P. 1–29.
14. *Андреевский Р. А., Глезер А. М.* Размерные эффекты в нанокристаллических материалах. Особенности структуры // Физ. мет. и металловедение. — 1999. — **88**, № 1. — С. 50–73.
15. *Гусев А. И.* Эффекты наноструктурного состояния в компактных металлах и соединениях // Усп. физ. наук. — 1998. — **168**. — С. 29–58.
16. *Валиев Р. З., Кайбышев О. А.* Границы зерен и свойства металлов. — М.: Металлургия, 1987. — 176 с.

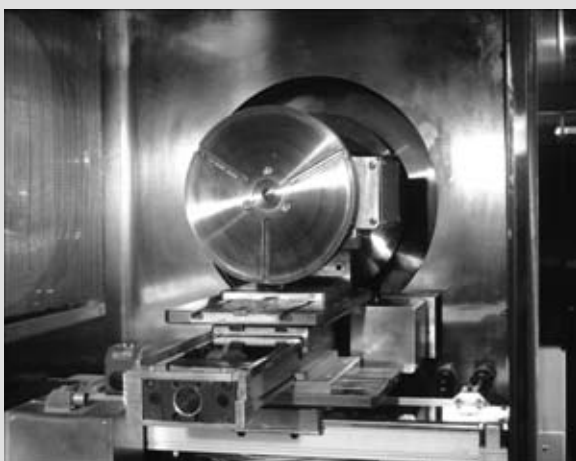
The effect of niobium carbide nanoparticles on structure and properties of electron beam welds in nickel alloys was studied. Alloying of the weld metal with niobium carbide nanoparticles was performed by adding composite nanostructured foil of the Ni–NbC system into the weld pool. The foil was produced by electron beam evaporation of the components in vacuum, followed by their combined vapour-flow deposition on the substrate. Adding the niobium carbide nanoparticles into the weld pool was shown to lead to formation of crystalline grains with a cellular structure within the weld zone, with the NbC nanoparticles located along the boundaries of the above grains. The effect of this structure of the welds on their mechanical properties was analysed.

Поступила в редакцию 23.04.2010

РАЗРАБОТАНО В ИЭС

Малогабаритные установки для ЭЛС в приборостроении

Десять установок СВ-112/103 с внутренними размерами вакуумной камеры 640×640×640 мм введены в промышленную эксплуатацию. Время вакуумирования до 5·10⁻⁴ мм рт. ст. составляет меньше 5 мин



Установка СВ-112 комплектуется стационарной пушкой мощностью до 15 кВт, двухкоординатным столом (X–X' и Y–Y', перемещение 200 мм), универсальным вращателем и задней бабкой



СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ 10Г2ФБ, ВЫПОЛНЕННЫХ ДУГОВОЙ СВАРКОЙ

С. Л. ЖДАНОВ, канд. техн. наук, В. Д. ПОЗНЯКОВ, д-р техн. наук, А. А. МАКСИМЕНКО, инж.,
В. А. ДОВЖЕНКО, В. Г. ВАСИЛЬЕВ, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Н. В. ВЫСОКОЛЯН, В. А. КОРОБКА, инженеры (ОАО «Крюковский вагоностроительный завод»)

Изучены структурные превращения в металле ЗТВ стали 10Г2ФБ под воздействием термических циклов дуговой сварки и их влияние на механические свойства данного участка сварного соединения. Установлен диапазон допустимых скоростей охлаждения металла ЗТВ в температурном интервале 600...500 °С, обеспечивающий свойства сварных соединений на уровне требований к основному металлу и их высокую сопротивляемость замедленному, хрупкому и слоистому разрушениям.

Ключевые слова: дуговая сварка, высокопрочные стали, сварные соединения, термокинетическая диаграмма, мартенситное и бейнитное превращения, скорость охлаждения, твердость, диффузионный водород, холодные трещины

Интенсивное развитие контейнерных перевозок, обусловленное созданием международных транспортных коридоров, вызвало необходимость разработки и освоения производства специализированных платформ-контейнеровозов, которые должны в полной мере удовлетворять требованиям перевозчика по грузоподъемности и типу транспортируемых контейнеров. Кроме того, такой подвижной состав должен иметь повышенную надежность и быть экономичным в эксплуатации. С учетом допустимой нагрузки на ось 23,5 т оптимальными параметрами такого вагона являются грузоподъемность 72 т, масса тары 22 т.

До настоящего времени при изготовлении несущих сварных конструкций грузового подвижного состава в Украине и других странах СНГ широко используется фасонный и листовой прокат сталей 09Г2, 09Г2Д, 16Д, Ст3 и других с пределом текучести до 350 МПа. Однако для изготовления грузовых вагонов нового поколения требуется применение более прочных сталей. По мнению специалистов ВНИИЖТ [1], перспективными для изготовления несущих сварных конструкций подвижного состава могут быть стали с пределом текучести более 390 МПа, которые характеризуются высокой пластичностью ($\delta_5 > 19\%$) и ударной вязкостью ($KCU^{-60} > 29,4$ Дж/см², $KCV^{-60} > 19,6$ Дж/см²). Такие стали должны иметь хорошую свариваемость и массово изготавливаться на отечественных металлургических комбинатах.

Как показал анализ металлопроката, выпускаемого металлургическими предприятиями Украины, в наибольшей степени указанным критериям соответствует сталь марки 10Г2ФБ, которая ши-

роко используется при изготовлении труб большого диаметра для магистральных трубопроводов [2, 3] и производится в соответствии с техническими требованиями ТТ 227-21-2008. Требования к химическому составу листового проката стали 10Г2ФБ следующие, мас. %, не более: 0,15 С; 0,35 Si; 1,70 Mn; 0,020 P; 0,010 S; 0,020...0,030 Al общий; 0,010...0,030 Ti; 0,080 Nb; 0,100 W; 0,30 Mo. Механические свойства листового проката стали 10Г2ФБ, не менее: $\sigma_T = 490$ МПа; $\sigma_B = 565$ МПа; $\delta_5 = 28,5\%$; $KCV^{-60} = 69$ Дж/см²; $KCU^{-60} = 59$ Дж/см².

Цель настоящей работы заключалась в исследовании свариваемости высокопрочной стали марки 10Г2ФБ с учетом специальных требований, которые предъявляются к стальному прокату, предназначенному для грузового вагоностроения [1]. В соответствии с этими требованиями изучены структурные превращения в металле ЗТВ стали 10Г2ФБ под воздействием термических циклов сварки и их влияние на механические свойства данного участка сварного соединения; склонность стали к образованию холодных и слоистых трещин; реакция стали на ожог; сопротивляемость сварных соединений хрупкому разрушению.

При исследованиях использовали образцы, вырезанные из листов толщиной 18,7 мм следующего химического состава, мас. %: 0,08 С; 0,249 Si; 1,57 Mn; 0,05 V; 0,05 Nb; 0,006 [N]; 0,007 S; 0,013 P. Механические свойства стали в состоянии поставки после термомеханической обработки характеризуются такими показателями:

$$\begin{aligned}\sigma_T &= 531...581 \text{ МПа}; \sigma_B = 610...660 \text{ МПа}; \\ \delta_5 &= 24,8...26,3\%; \psi = 62,0...64,8\%, \\ KCU^{-60} &= 220...324 \text{ Дж/см}^2; KCV^{-60} = 204...300 \text{ Дж/см}^2.\end{aligned}$$

Крайние значения показателей механических свойств соответствуют испытаниям образцов, вы-

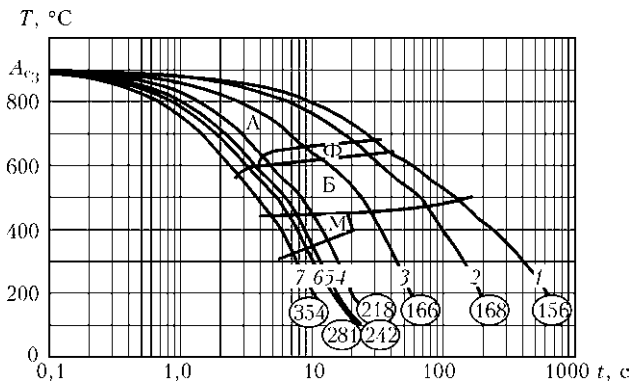


Рис. 1. Термокинетическая диаграмма превращения аустенита стали 10Г2ФБ: 1 — $w_{6/5} = 1,5$; 2 — 3; 3 — 10; 4 — 30; 5 — 38; 6 — 45; 7 — 55 °C/c; А — аустенит; Б — бейнит; Ф — феррит; М — мартенсит; цифры в кружках — твердость по Виккерсу

резанных соответственно поперек проката и вдоль. Следует отметить, что и в направлении оси z сталь имеет достаточно высокие показатели пластичности ($\psi_z = 65,0 \dots 69,7 \%$), свидетельствующие о ее высокой сопротивляемости слоистому разрушению.

Сталь 10Г2ФБ отличается высокими вязкими свойствами. Об этом свидетельствуют результаты традиционных испытаний на ударную вязкость, а также оценка реакции стали на ожог сварочной дугой в соответствии с ГОСТ 23240–78. Сущность последнего метода испытаний, регламентированного нормативной документацией для выбора металлопроката в вагоностроении, заключалась в получении на поверхности образца, форма и раз-

меры которого соответствовали образцу с надрезом для испытаний на ударный изгиб, малоэластичной линзы под действием дугового ожога и определении ее влияния на склонность стали к переходу в хрупкое состояние при ударном приложении нагрузки.

Результаты данных испытаний сопоставимы с аналогичными показателями, полученными для образцов основного металла с круглым надрезом на ударный изгиб, и составляют $KCU^{-60} = 346 \text{ Дж/см}^2$, т. е. критическая температура перехода стали 10Г2ФБ в хрупкое состояние находится ниже $-60 \text{ }^\circ\text{C}$.

О кинетике структурных превращений в участках перегрева металла ЗТВ сварных соединений достаточно полное представление дает анализ термокинетической диаграммы распада аустенита (рис. 1) и микроструктуры (рис. 2) соответствующих образцов. Исследования проводили на быстродействующем дилатометре комплекса «Gleeble-3800» [4], в котором цилиндрические образцы диаметром 6 мм и длиной 86 мм нагревали до температуры 1200 °C со скоростью 150 °C/c, а затем охлаждали с различными скоростями охлаждения (от 1,5 до 55 °C/c) в температурном интервале 600...500 °C в соответствии с заданными термическими циклами сварки, характерными для базовых режимов дуговой сварки низкоуглеродистых сталей.

При скоростях охлаждения до $w_{6/5} = 20 \text{ }^\circ\text{C/c}$ (рис. 1, кривые 1–3) превращение аустенита происходит в ферритно-бейнитной области. Так, в

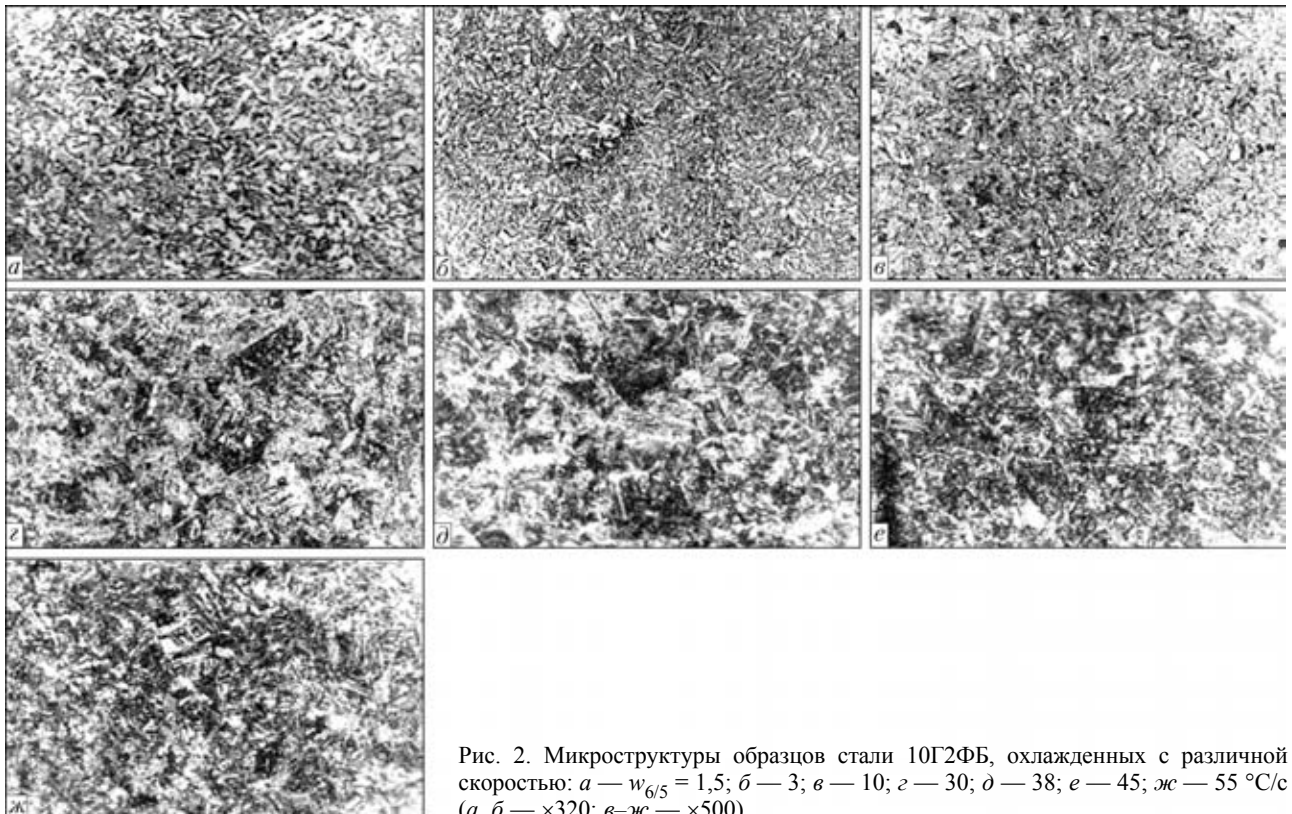


Рис. 2. Микроструктуры образцов стали 10Г2ФБ, охлажденных с различной скоростью: а — $w_{6/5} = 1,5$; б — 3; в — 10; г — 30; д — 38; е — 45; ж — 55 °C/c (а, б — $\times 320$; в-ж — $\times 500$)



участке перегрева металла ЗТВ при охлаждении со скоростями $w_{6/5} = 1,5$ и 3 °C/c формируется наиболее крупнозернистая структура. По границам зерен выделяется доэвтектоидный полигональный феррит и перлит, а внутри зерен формируется глобулярный бейнит двух морфологических разновидностей: низкоуглеродистый (высокотемпературный) с микротвердостью 1850...2030 МПа и низкотемпературный бейнит, имеющий микротвердость 2140...2430 МПа (см. рис. 2, а, б). Изредка внутри зерен наблюдается игольчатый феррит с ориентацией по Видманштетту.

При охлаждении со скоростью 10 °C/c (см. рис. 1, кривая 3) несколько уменьшается ширина участка перегрева и размер зерна. Структурные изменения по сравнению со скоростью 3 °C/c состоят в уменьшении количества доэвтектоидного полигонального феррита и низкоуглеродистого бейнита (HV 1920...1970 МПа), а также в увеличении количества более высокоуглеродистого бейнита (HV 2360 МПа) (см. рис. 2, в). Перлитное превращение почти полностью подавляется и в структуре наблюдаются только единичные случаи его присутствия.

Дальнейшее уменьшение ширины участка перегрева и размера зерна наблюдается при охлаждении со скоростью 20 °C/c. В структуре участка перегрева металла ЗТВ доэвтектоидный полигональный феррит по границам зерен встречается изредка. Основной составляющей структуры такого металла является низкотемпературный бейнит (глобулярный с HV 2100...2360 МПа) и в меньшей мере высокотемпературный низкоуглеродистый (HV 1850...2030 МПа).

При охлаждении со скоростью 30 °C/c (см. рис. 1, кривая 4) ширина участка перегрева и размер зерна такие же, как и при $w_{6/5} = 20$ °C/c. В структуре участка перегрева отсутствует доэвтектоидный полигональный феррит, а высокотемпературный бейнит (HV 1750...2000 МПа) встречается очень редко. Структура почти полностью состоит из глобулярного бейнита (HV 2140...2280 МПа) (см. рис. 2, г).

Повышение скорости охлаждения от $w_{6/5} = 30$ до 55 °C/c (см. рис. 1, кривые 4–7) создает условия для увеличения степени переохлаждения аустенита и соответственно понижения температуры его превращения. При этом диффузионные процессы тормозятся, а превращение аустенита происходит по сдвиговому механизму с образованием бейнитно-мартенситной структуры. Температура начала мартенситного превращения практически не изменяется и составляет 440 °C, в то же время температура конца превращения уменьшается с 370 до 310 °C с возрастанием скоростей охлаждения, в результате чего можно утверждать о высокой стойкости переохлажденного аустенита в металле ЗТВ стали 10Г2ФБ.

В процентном соотношении изменяются и структурные составляющие. Так, если при скорости охлаждения $w_{6/5} = 30$ °C/c (см. рис. 2, г) структура металла включает 83% бейнита, 12% мартенсита, остаток — неравноосный феррит с твердостью HV 218, то при максимальной скорости охлаждения $w_{6/5} = 55$ °C/c (см. рис. 2, ж) структура состоит из 35% мартенсита и 65% бейнита с твердостью HV 354.

Установленные различия структурных превращений в стали 10Г2ФБ в зависимости от термических циклов оказывают значительное влияние на механические свойства сварных соединений, а также сопротивляемость их хрупкому и замедленному разрушению.

Оценку механических свойств и сопротивляемости сварных соединений хрупкому разрушению проводили в соответствии с методикой, описанной в работе [5]. На растяжение и ударный изгиб испытывали образцы, вырезанные из заготовок исследуемого металла размерами $150 \times 12 \times 12$ мм, которые подвергали воздействию термических циклов сварки (нагрев до 1250 °C со скоростью 200 °C/c и охлаждение с различными скоростями в диапазоне $24...2,5$ °C/c). Полученные результаты свидетельствуют о том, что в исследованном диапазоне скоростей охлаждения механические свойства (рис. 3) и показатели KCV ударной вязкости металла ЗТВ (рис. 4, а) незначительно из-

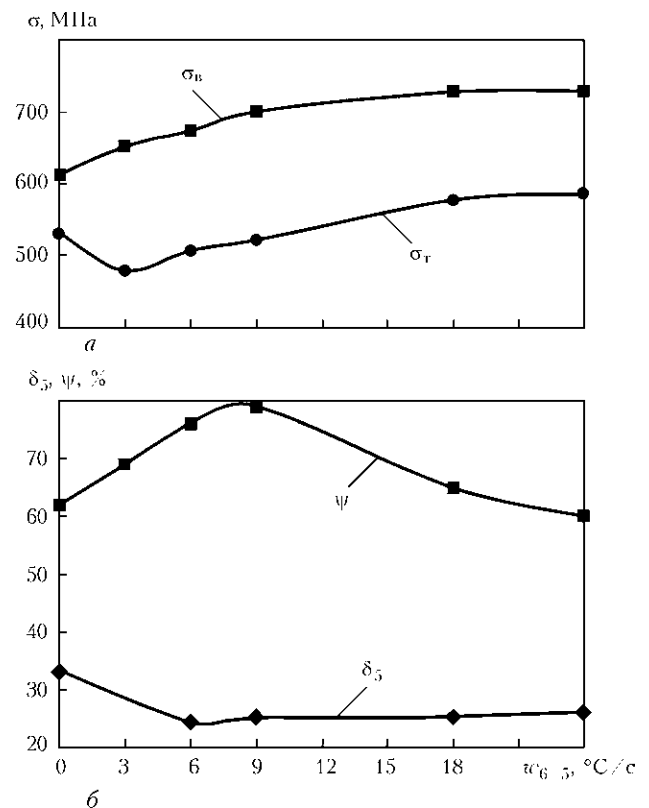


Рис. 3. Влияние скорости охлаждения на показатели прочности (а) и пластичности (б) имитированного металла ЗТВ

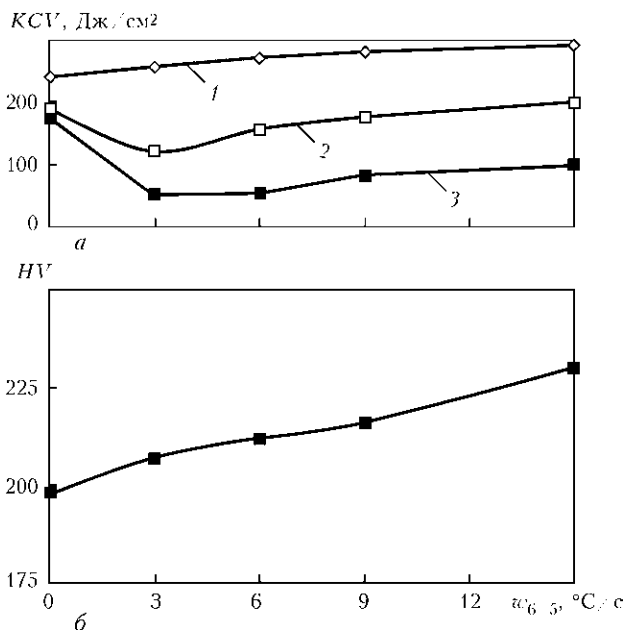


Рис. 4. Влияние скорости охлаждения на ударную вязкость (1 — +20; 2 — -20; 3 — -40 °С) (а) и твердость (б) участка перегрева металла ЗТВ

меняются при $w_{6/5} \geq 6$ °С/с. Исходя из этого и с учетом возрастающих требований, предъявляемых к низколегированным сталям на уровне международных стандартов ($KCV^{40} > 47$ Дж/см²), минимально допустимую скорость охлаждения металла ЗТВ при сварке стали 10Г2ФБ целесообразно ограничивать значением 6 °С/с.

Твердость металла на участке перегрева ЗТВ в указанном интервале скоростей охлаждения изменяется незначительно и сохраняется в пределах HV 198...230 (рис. 4, б).

Оценку стойкости сварных соединений против образования холодных трещин проводили на образцах «Имплант» [6] и с использованием проб «жесткий тавр» [7].

В первом случае испытывали образцы-вставки диаметром 6 мм, имеющие концентратор напряжений в виде винтовой канавки с шагом 0,8 мм и радиусом скругления 0,1 мм. Сварку образцов, установленных в отверстиях жесткозакрепленной в испытательной установке базовой пластины толщиной 18,7 мм, выполняли электродами АНП-10, диаметром 4 мм на режиме: $I_{св} = 160$ А, $U_{д} = 25$ В, $v_{св} = 9$ м/ч. Скорость охлаждения сварного соединения варьировали, изменяя температуру предварительного подогрева базовой пластины. Ее значения устанавливали по осциллограммам термических циклов сварки для высокотемпературных участков металла ЗТВ образцов-вставок. Количество диффузионного водорода в наплавленном металле определяли методом карандашных проб с использованием в качестве запирающей жидкости водного раствора глицерина. Нагружение образца начинали в ходе его охлаждения после сварки до температуры 100...50 °С.

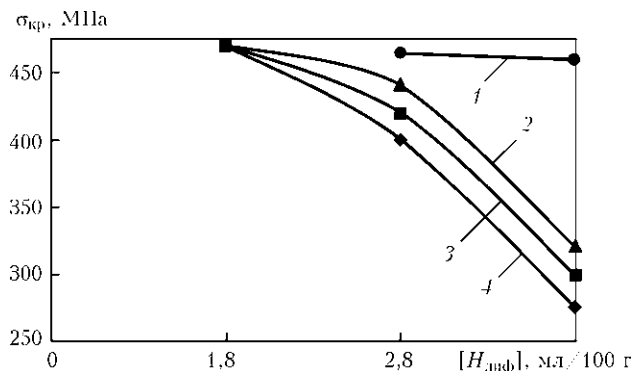


Рис. 5. Зависимость критических напряжений от концентрации диффузионного водорода и условий охлаждения металла ЗТВ при испытаниях по методу «Имплант» с предварительным подогревом 90 (1), 60 (2), 40 (3) °С и без подогрева (4)

Сварку проб «жесткий тавр» из стали толщиной 18,7 мм проводили электродами АНП-10 диаметром 4,0 мм, а также в CO₂ порошковой проволокой Megafil 821R диаметром 1,2 мм на режимах, обеспечивающих близкие значения погонной энергии для указанных способов сварки. Температуру проб перед сваркой изменяли в диапазоне 20...90 °С.

Результаты испытаний образцов «Имплант» свидетельствуют о том, что при ограниченном до 1,8 мл/100 г содержании диффузионного водорода в наплавленном металле сварные соединения стали 10Г2ФБ имеют высокую сопротивляемость образованию холодных трещин при сварке без предварительного подогрева. Разрушение образцов в данном случае не происходило при напряжениях $\sigma_{кр} = 475$ МПа (рис. 5), близких к пределу текучести стали. При данных условиях сварки повышение концентрации диффузионного водорода до 4,2 мл/100 г приводит к снижению критических напряжений до 275 МПа (рис. 5), и, как следствие, к снижению стойкости сварных соединений против образования холодных трещин. Используя предварительный подогрев до 90 °С (рис. 5, кривая 1), можно повысить стойкость

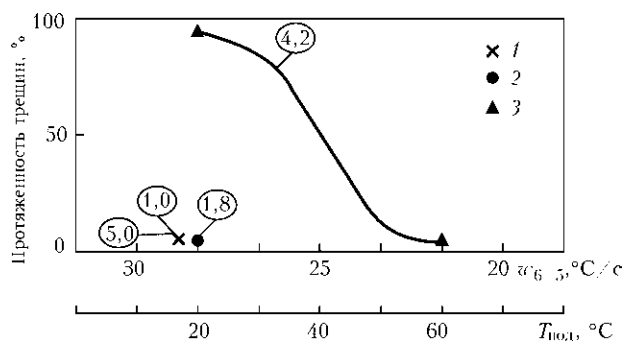


Рис. 6. Влияние скорости охлаждения $w_{6/5}$, температуры подогрева $T_{под}$ и содержания диффузионного водорода (цифры в кружках) на протяженность трещин в соединениях стали 10Г2ФБ (проба «жесткий тавр»): 1 — порошковая проволока Megafil 821R при сварке в CO₂; 2, 3 — электроды АНП-10



Механические свойства

Сварочный материал	Металл шва							Сварное соединение			
	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCV^{+20}	Дж/см ²	KCV^{-20}	Дж/см ²	KCV^{40}	Дж/см ²	σ_B , МПа
Электроды АНП-10	485,4	645,4	27,65	69,7	159,0	84,0	56,0	630,5 (разрушение по ОМ)	238,5	150,2	92,8
Порошковая проволока Megafil 821R (CO ₂)	533,3	573,2	25,80	78,1	256,0	79,5	23,4	573,3 (разрушение по ОМ)	213,6	170,0	143,3

Примечание. Приведены средние значения результатов испытаний не менее трех образцов.

сварных соединений против образования холодных трещин.

С полученными результатами хорошо согласуются данные испытаний проб «жесткий тавр» (рис. 6). Использование электродов АНП-10 с низким содержанием диффузионного водорода до 1,8 мл/100 г, а также порошковой проволоки Megafil 821R при сварке в CO₂ позволяет расширить диапазон скоростей охлаждения до $w_{6/5} = 20$ °C/с с обеспечением достаточной стойкости против образования холодных трещин.

Использование указанных выше сварочных материалов позволяет получить металл швов с механическими свойствами, близкими к свойствам стали 10Г2ФБ. Об этом свидетельствуют результаты механических испытаний сварных соединений, приведенные в таблице.

На основании выполненного комплекса исследований листовой прокат стали марки 10Г2ФБ был рекомендован для изготовления нагруженных сварных металлоконструкций грузовых вагонов нового поколения. Указанная сталь и разработанные совместно со специалистами ОАО «Крюковский вагоностроительный завод» технологические процессы ее сварки были внедрены при изготовлении вагона-платформы модели 13-7024. В ходе полномасштабных предварительных, приемочных и сертификационных испытаний, выполненных ГП «Украинский научно-исследовательский ин-

ститут вагоностроения», были подтверждены высокие ходовые и прочностные характеристики платформы данной модели, изготовленной из стали 10Г2ФБ, на основании чего она была принята межведомственной комиссией в серийное производство и сертифицирована в РС ФЖТ РФ. В настоящее время более 1500 вагонов-платформ, изготовленных на ОАО «Крюковский вагоностроительный завод», успешно эксплуатируются на железных дорогах стран СНГ и Балтии.

1. *ОСТ 32.153-2000*. Металлопрокат для кузовов грузовых вагонов нового поколения. — Введ. 18.09.2000.
2. Деформационное старение металла труб из стали контролируемой прокатки / С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков, Л. В. Гончаренко и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2005. — № 4. — С. 39–43.
3. Эфрон Л. И., Настич С. Ю. Состояние производства листового и рулонного проката для спиральношовных труб категории прочности до X1000 // Черн. металлургия. — 2006. — № 11. — С. 68–81.
4. Григоренко Г. М., Костин В. А., Орловский В. Ю. Современные возможности моделирования превращений аустенита в сварных швах низколегированных сталей // Автомат. сварка. — 2008. — № 10. — С. 31–34.
5. Саржевский В. А., Сазонов В. Я. Установка для имитации термических циклов сварки на базе машины МСР-75 // Там же. — 1981. — № 5. — С. 69–70.
6. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 247 с.
7. Гривняк И. Свариваемость сталей / Пер. со словац.; под ред. Э. Л. Макарова. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.

Structural transformations in the HAZ metal of steel 10G2FB under the impact of the arc welding thermal cycles and their effect on mechanical properties of this region of a welded joint were investigated. The range of permissible cooling rates of the HAZ metal at temperatures of 600...500 °C, providing properties of the welded joints at a level of requirements to the base metal and their high resistance to delayed, brittle and laminated fracture, was identified.

Поступила в редакцию 23.04.2010



ПРОЧНОСТЬ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ИНКОНЕЛЬ 718, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ПАЛЛАДИЕВЫХ ПРИПОЕВ

Чл.-кор. НАН Украины **В. Ф. ХОРУНОВ**, **С. В. МАКСИМОВА**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Ю. В. БУТЕНКО, **А. Б. МАЛЫЙ**, инженеры (ГП НПКГ «Заря-Машпроект», г. Николаев)

Проведены сравнительные исследования прочности паяных соединений жаропрочного никелевого сплава Инконель 718, полученных с помощью высокотемпературной вакуумной пайки и припоев на базе систем Pd-Ni-Cr-Si, Pd-Ni-Co-Cr-Si, Pd-Ni-Cr-W и опытного припоя на базе системы Pd-Ni-Cr-Ge. Показана перспективность применения опытного припоя, который обеспечивает паяным соединениям заданную кратковременную и длительную прочность.

Ключевые слова: пайка, жаропрочный никелевый дисперсионно-твердеющий сплав Инконель 718, припой, никель, палладий, кратковременная и длительная прочность

К материалам для высокотемпературного применения относятся высоколегированные жаропрочные сплавы на основе никеля (суперсплавы), высокие механические свойства которых в основном достигаются в результате твердорастворного, интерметаллидного и карбидного упрочнений. Основной вклад вносится за счет дисперсных включений фазы на основе интерметаллида Ni₃Al, так называемой γ'-фазы, количество которой зависит от содержания в сплаве алюминия и титана. Сплавы с небольшим содержанием γ'-фазы свариваются хорошо, а с высоким содержанием (например, более 60 %) считаются несвариваемыми [1]. Это и определяет обычно выбор способа соединения для той или иной конструкции.

Однако на практике могут возникать ситуации, когда выбор способа соединения определяет не материал, а конструктивные особенности изделия. Подобный случай рассматривается в настоящей статье.

Изделие (центробежное колесо) представляет собой конструкцию цилиндрической формы с выфрезованными на наружной поверхности лопатками сложной геометрической формы, к верхней поверхности которых необходимо присоединить методами неразъемного соединения покрывной диск толщиной 3 мм. Материал изделия — Инконель 718 — хорошо свариваемый сплав, однако изготовить изделие дуговой или электронно-лучевой сваркой оказалось невозможным в связи с отсутствием внутри изделия доступа для сварки. Вариант сварки с лопаткой через покрывной диск путем его сквозного проплавления дугой или электронным лучом, ширина которой в райо-

не примыкания к покрывному диску составляет 2 мм, не реален. Не был одобрен также вариант нагрева электронным лучом поверхности покрывного листа для того, чтобы расплавить припой, заложенный в зазор между листом и лопаткой. В результате наиболее перспективным способом соединения была выбрана пайка.

Разработке припоев для пайки высоколегированных сплавов посвящено много работ в различных странах мира и предложены припои различных систем. Общее для них то, что это сплавы, содержащие эвтектики, поэтому для достижения высоких механических свойств необходима диффузионная выдержка при высоких температурах. Более того, большинство из этих припоев предназначены для ремонтной пайки, а не создания сложных конструкций. Желательно было иметь припой со структурой твердого раствора, который имел бы высокие прочностные характеристики при любом цикле пайки.

Известны такие припои на базе систем Mn-Ni и Ni-Pd. При пайке в вакууме, когда необходимо обеспечить высокую коррозионную стойкость соединений, более перспективна вторая система. Известен припой ПЖК-1000, который используют в промышленности для пайки узлов высокотемпературного применения. С использованием этого припоя были изготовлены образцы для испытаний на кратковременную прочность при растяжении при 20 и 550 °С и на длительную прочность. Пайка образцов проходила при температуре 1230 °С, что несколько ниже рекомендуемой (1250 °С) для этого припоя [2]. Тем не менее результаты испытаний на кратковременную прочность были достаточно высокими (таблица), а показатели длительной прочности не всегда отвечали заданному пределу. Была поставлена задача за счет корректировки



состава снизить температуру пайки, стабилизировать показатели прочности и, что тоже очень важно, повысить пластичность сплава, прокатка которого протекает с большими трудностями. Опробовано два пути: изменение легирования твердого раствора и замена элемента, образующего с палладием эвтектику. В припое ПЖК-1000 таким элементом является кремний, который не растворяется в палладию, но образует эвтектику с ним при 4 мас. % (примерно 810 °С). При этом по перитектическим реакциям образуется три интерметаллида Pd₅Si, Pd₉Si₂, Pd₃Si при температурах 810, 823 и 1045°С соответственно [3].

Легирование палладия германием вместо кремния выглядит гораздо предпочтительнее. При 775 °С растворимость германия в палладию составляет примерно 2 % и практически отсутствует при 200 °С. Таким образом, нет оснований опасаться охрупчивания при легировании германием в этих пределах, и в то же время можно ожидать упрочнения твердого раствора на основе палладия при охлаждении.

С никелем кремний образует твердый раствор (примерно до 5 %) при 700 °С, так что можно ожидать некоторое увеличение растворимости кремния при легировании палладия никелем. В то же время растворимость германия в никеле составляет примерно 12 % при 200 °С, что свидетельствует о его предпочтительности. Растворимость германия в хrome также несколько выше, чем кремния.

Следовательно, германий как легирующий элемент можно применять в сплавах системы Pd–Ni–Cr–Si в значительно больших количествах, не вызывая охрупчивания, а, значит, эти сплавы должны лучше поддаваться обработке давлением с целью получения фольг малой толщины.

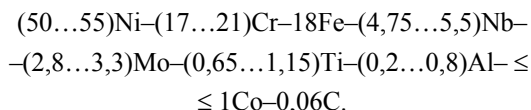
Для создания припоя со структурой твердого раствора может быть использована система Co–

Pd. На диаграмме этой системы присутствует минимум при более низкой температуре, чем в системе Ni–Pd, причем диапазон концентраций, в котором интервал плавления отсутствует, шире. При этом в интересующем нас интервале плавления какие-либо превращения не отмечены, т. е. на первый взгляд это более благоприятная диаграмма. Более того, учитывая неограниченную растворимость никеля и кобальта, можно ожидать, что может быть благоприятной и частичная замена никеля кобальтом.

Из этого следует, что интерес представляет исследование влияния возможной замены никеля кобальтом на структуру и способность к прокатке и влияние концентрации германия на те же параметры.

В настоящей работе на примере никелевого дисперсионно-твердеющего сплава Инконель 718 и припоев на базе системы Ni–Pd показана возможность получения паяных жаропрочных соединений с высоким уровнем статической кратковременной (при комнатной и повышенной температуре), а также длительной прочности (при повышенной температуре и разном значении нагрузки).

Для проведения исследований использовали сложнoleгированный жаропрочный сплав Инконель 718 (IN 718) в состоянии поставки следующего номинального состава, мас. %:



В качестве припоев для пайки сплава Инконель 718 использовали следующие материалы: промышленный припой ПЖК-1000 (система Pd–Ni–Cr–Si) (припой № 1), а также экспериментальные припои на базе систем Pd–Ni–Co–Cr–Si (№ 2), Pd–Ni–Cr–Ge (№ 3) и системы Pd–Ni–Cr–B (№ 4).

Экспериментальные припои применяли в виде прокатанных фольг толщиной около 50 мкм, стандартный припой толщиной около 100 мкм, № 4 — в виде ленты (30...50 мкм), полученной методом сверхбыстрой закалки.

Для проведения металлографических исследований и изучения механических характеристик паяных соединений изготавливали стыковые паяные соединения. Припой в виде фольги укладывали в зазор. Сборку образцов проводили с помощью контактной сварки на машине ТКМ-7 с применением стержней из никеля, которые крепили на торец образца. Пайку образцов экспериментальными припоями проводили при температурах 1220...1250 °С в течение 5...10 мин в вакуумной печи при разрежении рабочего пространства 1·10⁻² Па с применением радиационного нагрева. Режимы пайки отработывали на стыковых (рис. 1, а, б) и тав-

Кратковременная прочность на растяжение паяных соединений сплава Инконель 718 при комнатной и повышенной температуре

№ припоя	Температура пайки, °С	Время пайки, мин	Прочность на растяжение (МПа) при температуре испытаний, °С	
			20	550
1	1230	5	1275	980
1	1230	10	1310	1060
2	1230	5	1210	950
2	1230	10	1210	970
3	1230	5	1190	Не исп.
3	1230	10	1260	1030
3	1220	10	1290	1000
4	1080	90	1230	685
4	1085	120	1080	880

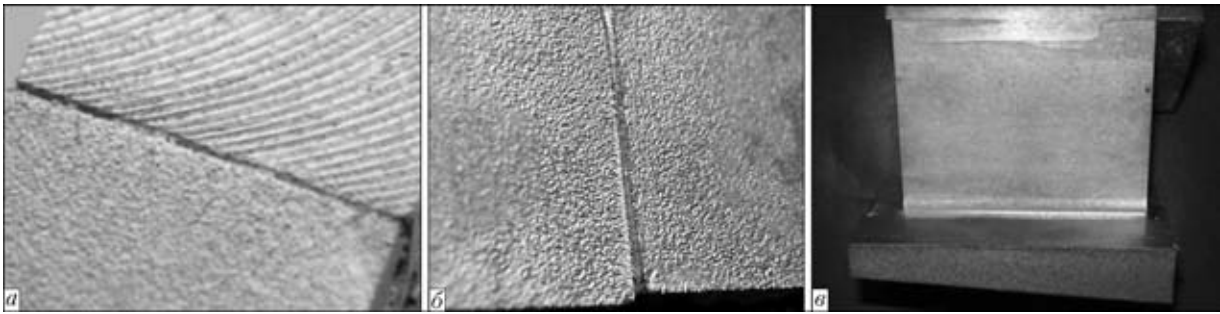


Рис. 1. Внешний вид стыковых паяных соединений, полученных соответственно при $T_{п} = 1250, 1230 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (а, б), и таврового соединения, полученного при $T_{п} = 1230 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (в)

ровых образцах (рис. 1, в). Из стыковых паяных соединений вытачивали стандартные образцы (по ГОСТ 1497, ГОСТ 9651, ГОСТ 10145) для механических испытаний. Время пайки при использовании припоя № 4 увеличивали до 90 и 120 мин для обеспечения диффузии бора из шва в основной металл и уменьшения количества боридов в паяном шве.

После пайки перед механическими испытаниями образцы подвергали термической обработке, которая приводит к упрочнению сплава Инконель 718 в результате выделения упрочняющих фаз. Режим термообработки следующий: закалка при $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка 1,5 ч, охлаждение на воздухе, старение при $760 \text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка 10,5 ч, охлаждение с печью до $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью $55 \text{ }^{\circ}\text{C/ч}$, выдержка при этой температуре 8,5 ч, охлаждение на воздухе. В упрочненном состоянии временное

сопротивление разрыву при комнатной температуре сплава Инконель 718 составляет 1338 МПа , при $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$ — 965 МПа . Для проведения кратковременных испытаний на растяжение при комнатной температуре использовали разрывную машину ИМЧ-30, для кратковременных испытаний при температуре $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ — ИМ 12А. Длительные испытания проводили с помощью машины МП-3. При длительных испытаниях образцы нагревали до $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$, выдерживали 2 ч, затем прилагали требуемую нагрузку.

Проведенные исследования паяных стыковых и тавровых образцов показали, что при температуре $1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ припой № 1–3 имеют высокую жидкотекучесть и хорошо растекаются по подложке из сплава Инконель 718. Отмечено вытекание припоя из паяного зазора и растекание его по поверхности паяемого материала. При данной тем-

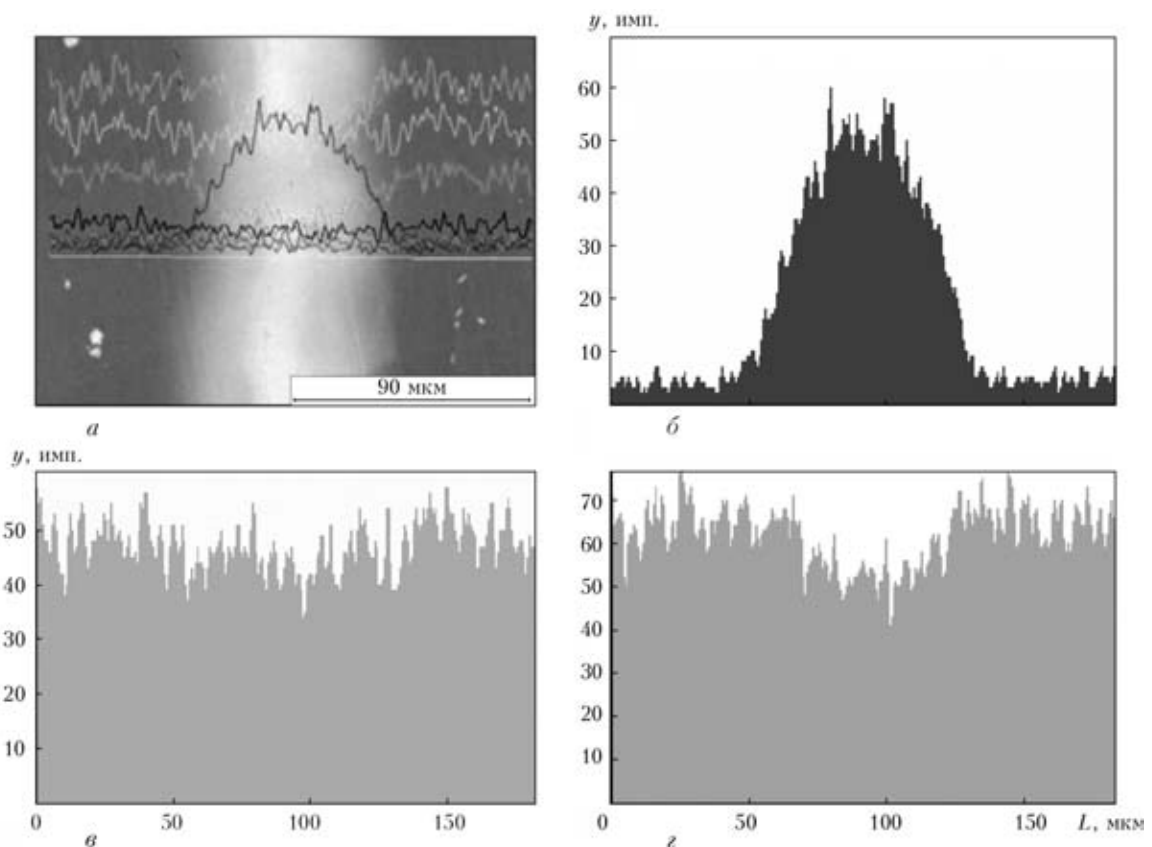


Рис. 2. Микроструктура паяного шва (а) и распределение палладия (б), никеля (в), хрома (г) в нем

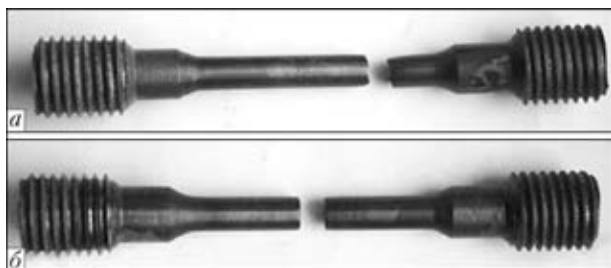


Рис. 3. Разрушение паяных образцов после испытаний на длительную прочность: *a* — основной металл; *б* — металл паяного шва

пературе галтели не образовывались, визуально наблюдалась рыхлость паяных швов (см. рис. 1, *a*).

Режимы пайки отрабатывали на стыковых и тавровых образцах. Снижение температуры пайки при изготовлении стыковых соединений с помощью припоев № 1, 2 до 1230 °С, припоя № 3 до 1210...1230 °С способствовало формированию галтелей минимальных размеров, эрозия основного металла отсутствовала (см. рис. 1, *б*). При пайке тавровых соединений наблюдалось хорошее формирование тонких плотных галтельных участков (см. рис. 1, *в*).

Структура паяных швов однородная (рис. 2, *a*), никель равномерно распределяется в основном металле и в паяном шве (рис. 2, *в*), количество палладия плавно увеличивается по ширине паяного шва от основного металла к центральной части шва (рис. 2, *б*), количество хрома несколько больше в основном металле (рис. 2, *з*).

Результаты кратковременных испытаний паяных соединений на растяжение при комнатной температуре показали, что все исследуемые припои обеспечили высокую прочность паяным соединениям (от 1080 до 1310 МПа, таблица). Разрушение паяных соединений происходило по основному металлу. Максимальные средние значения прочности на растяжение (1292,5 МПа) получены при использовании припоя № 1. При увеличении времени пайки на 5 мин происходит повышение средней прочности на растяжение при использовании припоев № 1 и 3 соответственно на 2,7 и 4,7 % и для припоя № 3 составляет 1290 МПа. Припой № 2 обеспечил довольно стабильные результаты прочности, но на более низком уровне (1210 МПа), независимо от времени пайки.

Легирование припоя системы Pd-Ni-Cr-Si кобальтом улучшает пластичность паяных соединений примерно в два раза, о чем свидетельствуют значения относительных удлинений (15,2...16 %) и сужений (18...19,7 %). Высокие значения пластичности, соответственно относительного сужения (22,5 %) и удлинения (10 %) получены при использовании опытного припоя № 3.

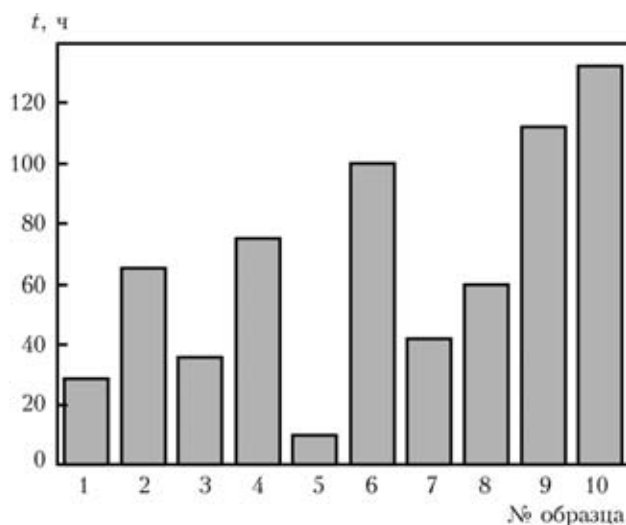


Рис. 4. Длительная прочность паяных соединений, полученных с использованием промышленного припоя Pd-Ni-Cr-Si (образцы 1, 2) и опытных припоев Pd-Ni-Co-Cr-Si (3, 4), Pd-Ni-Cr-B (5, 6), Pd-Ni-Cr-Ge (7-10)

Тенденция распределения прочностных свойств между применяемыми припоями практически сохранилась при высокотемпературных испытаниях, которые проводили при температуре 550 °С (таблица). Средняя прочность на разрыв при пайке припоями № 1 и 3 примерно одинаковая, соответственно 1020 и 1015 МПа. Более низкие средние значения получены при использовании припоев № 2 (960 МПа) и № 4 (783 МПа). Минимальные значения прочности соединений, полученных с помощью припоя системы Pd-Ni-Cr-B, обусловлены наличием бора, который характеризуется малой растворимостью в никеле. Во время изотермической пайки он диффундирует из шва в паяемый металл и выделяется по границам зерен основного металла в виде боридов, что отрицательно влияет на прочностные свойства.

Максимальную пластичность при температуре 550 °С обеспечивает припой, легированный кобальтом, относительное удлинение паяных образцов, полученных при его использовании, находится в пределах 10...80 %. Пластичность паяных соединений, полученных с помощью опытного припоя, несколько ниже и составляет 4...12 %.

При испытаниях на длительную прочность при температуре 550 °С и напряжении 785 МПа образцы разрушались по основному металлу при пайке припоями № 1 после 29 ч и № 2 после 75 ч (рис. 3, *a*), а также по металлу шва, паяного припоями № 2-4 (рис. 3, *б*).

Лучшие результаты показали паяные соединения, полученные с помощью опытного припоя № 3 (рис. 4). Из четырех образцов два разрушились после 42, 60 ч испытаний. Образцы № 9 и 10 не разрушились соответственно после 112 и 130 ч (рис. 4), что превысило требуемый рабочий ресурс более чем в два раза.



С использованием припоя № 3 были изготовлены тавровые образцы, которые успешно прошли испытания при нагрузке 220 и 300 МПа, условный предел выносливости соответственно составлял $6,2 \cdot 10^6$ и $8,7 \cdot 10^6$ циклов.

Выводы

1. Проведенные исследования паяных соединений жаропрочного никелевого сплава Инконель 718 показали, что применение борсодержащего припоя Pd–Ni–Cr–B не позволяет получить требуемую прочность и пластичность паяных соединений как при комнатной, так и при повышенной температуре.

2. Установлено, что при определении кратковременной прочности на растяжение при комнатной температуре увеличение времени пайки (с 5 до 10 мин) приводит к повышению средней прочности на растяжение при использовании промышленного (№ 1) и опытного (№ 3) припоев соответственно на 2,7 и 4,7 %.

3. Определено, что максимальную кратковременную прочность на растяжение 1310 МПа (при

$T_{исп} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) получили при пайке жаропрочного сплава Инконель 718 промышленным припоем на базе системы Pd–Ni–Cr–Si. Однако при испытаниях на длительную прочность паяные соединения имели недостаточный рабочий ресурс в интервале 29...60 ч.

4. Опытный припой Pd–Ni–Cr–Ge обеспечивает кратковременную прочность на разрыв на уровне основного металла 1230...1290 МПа и показывает стабильные результаты при испытаниях на длительную прочность при температуре 550 °С и нагрузке 785 МПа. Паяные образцы не разрушались даже после 112 и 132 ч испытаний, что превысило требуемый ресурс более, чем вдвое.

1. Симс Ч., Хагел В. Жаропрочные сплавы / Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1976. — 568 с.
2. Справочник по пайке / Под ред. И. Е. Петрунина. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 2003. — 480 с.
3. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник. В 3 т.: Т.3 / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. — М.: Машиностроение, 1999. — 880 с.

Comparative strength studies were performed on high-strength Inconel 718 nickel alloy brazed joints, made using vacuum brazing and brazing filler metals based on Pd–Ni–Cr–Si, Pd–Ni–Co–Cr–Si, Pd–Ni–Co–Cr–Si, Pd–Ni–Cr–B systems and test filler metal based on Pd–Ni–Cr–Ge system. Good prospects for application of the test filler metal, which ensures the specified short- and long-term strength of brazed joints, are shown.

Поступила в редакцию 29.04.2010

ПЕТЕРБУРГСКАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ЯРМАРКА

15–17 марта 2011, Санкт-Петербург

- ▲ ВЫСТАВОЧНЫЕ ЭКСПОЗИЦИИ
- ▲ ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОНГРЕСС
- ▲ БИРЖА ДЕЛОВЫХ КОНТАКТОВ
- ▲ КОНКУРСНАЯ ПРОГРАММА

Специализированные выставки:

- Металлургия. Литейное дело • Машиностроение
- Обработка металлов • Современное промышленное предприятие • Автопром / ИСТА • Высокие технологии. Инновации. Инвестиции (Hi-Tech)

Специальные экспозиции:

- Коллективная экспозиция «Санкт-Петербург – регионы России» • Экспозиция субъектов малого предпринимательства Санкт-Петербурга

Совместно с Петербургской технической ярмаркой пройдут:

- II Международная специализированная выставка BLECH Russia
- V Петербургский Партнериат

20 лет
РЕСТЭК®

Тел./факс: (812) 320-9676, 320-8092

E-mail: autopr@restec.ru

www.ptfair.ru



ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШВОВ И СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ И МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ, ИМИТИРУЮЩИХ КОСМИЧЕСКИЕ

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

Приведены особенности формирования швов сварных соединений алюминиевых и магниевых сплавов, полученных электронно-лучевой сваркой, под влиянием изменяющихся сил гравитации и низких температур. Показано влияние перечисленных факторов и содержание растворенного водорода в основном металле на прочность соединений, образование дефектов и потерю легирующих элементов из металла шва.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, летающая лаборатория, алюминиевые сплавы, магниевые сплавы, условия гравитации, низкая температура, жидкий азот, растворенный водород, пористость, прочность, испарение легирующих элементов, микрорентгеноспектральный анализ

Алюминиевые и магниевые сплавы являются основными конструкционными материалами для аэрокосмического аппаратостроения [1–4]. Вероятно, что уже в недалеком будущем может возникнуть реальная потребность в применении сварки в условиях околоземного космоса или на поверхности Луны [5, 6]. Это могут быть монтажно-сборочные операции при создании космических комплексов или ремонтно-профилактические работы, связанные с обеспечением длительной эксплуатации действующих систем [7]. Анализ номенклатуры сварочных работ, выполняемых в космосе, показывает, что чаще всего придется соединять материалы толщиной от 0,5 до 4,0 мм. В связи с этим важным фактором при получении объективной оценки сварных соединений алюминиевых сплавов указанной толщины в этих условиях является выбор способа сварки. При этом необходимо руководствоваться таким основным критерием, как получение сварных соединений высокого качества, равнопрочных с основным металлом, без пор и трещин, без снижения пластичности шва и околошовной зоны при минимальных потерях легирующих элементов в сварном соединении [8]. С учетом отмеченного при создании космических конструкций, требующих высокую надежность соединения, минимальные массу и объем используемой аппаратуры, полную автоматизацию процесса сварки и его малую энергоемкость, наиболее эффективным является применение электронно-лучевой сварки [5].

При сварке плавлением алюминиевых сплавов в наземных условиях в шве и зоне термического влияния (ЗТВ) возникают различного рода макро-

и микродефекты [9], которые приводят к снижению прочности и пластичности соединений, а иногда и потере их герметичности [10, 11]. Не исключено появление подобных дефектов и при сварке этих материалов в условиях космического полета (наличие микрогравитации, низкой температуры, глубокого вакуума). Кроме того, оказывает влияние исходный состав используемого материала [12]. При этом существенно изменяется характер протекания ряда физических процессов: полностью или частично отсутствуют гравитационные силы, резко возрастает роль термокапиллярной и химической конвекции, из-за разницы плотности практически полностью отсутствует разделение фаз, намного увеличивается влияние сил поверхностного натяжения и адгезии [13–15].

Цель проведенных исследований заключалась в изучении влияния перечисленных факторов на качество формирования швов и свойства сварных соединений алюминиевых сплавов АД0, АМг3, АМг6, 1201 и магниевого сплава ИМВ-2. Исследования выполняли при изменении гравитации в интервале g/g_0 от $1 \cdot 10^{-2}$ до 2 (где g_0 — ускорение свободного падения; g — действующее ускорение) и фиксируемой температуре образцов +20, –100, –120 и –196 °С.

В процессе исследований выполняли сквозные проплавления пластин и сварку стыковых соединений указанных сплавов толщиной 2,0 и 2,5 мм.

Химический состав и временное сопротивление разрыву исследуемых сплавов приведены в табл. 1.

Сплав АМг6 был различных плавок с концентрацией растворенного водорода 0,2, 0,3, 0,5 и 0,6 см³/100 г. Перед загрузкой в камеру свариваемые образцы подвергали шабрению на глубину 0,05 мм. Время выдержки на воздухе образцов не превышало 10 мин. Затем их плотно закрепляли к неподвижному столу, который после вакуумирования камеры охлаждали жидким азотом.



Абсолютное давление в камере, которое не превышало $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па, поддерживали с помощью криогенного сорбционного насоса. В процессе сварки регистрировали следующие параметры: ток пучка, ток фокусировки, напряжение питания энергетического комплекса от бортовой сети постоянного тока, скорость сварки, действующее на сварочную ванну ускорение, температуру образца и абсолютное давление в камере. Сварку выполняли на режимах, приведенных в табл. 2 с ускоряющим напряжением 15 кВ и диаметром пучка не более 1,5 мм, расстояние от торца пушки до поверхности образца составляло 120 мм.

Условия кратковременной микрогравитации обеспечивала летающая лаборатория (ЛЛ) Ту-104А, на борту которой размещалась установка А-1084М с высокочастотным электронно-лучевым источником питания и малогабаритной, перемещаемой по двум координатам пушкой ОБ 717 (рис. 1).

При проведении экспериментов на расплавленную сварочную ванну действовали следующие ускорения: $-g/g_0 \leq \leq 1 \cdot 10^{-2}$ (микрогравитация), $1/6$ (ускорение свободного падения на поверхности Луны), 1 (ускорение свободного падения на поверхности Земли), не менее 2 (более чем двухкратная перегрузка).

Качество соединений оценивали по результатам анализа рентгенограмм и макрошлифов швов, распределению легирующих элементов и особен-



Рис. 1. Установка для электронно-лучевой сварки образцов при комнатной и низкой температурах в условиях кратковременной невесомости на борту ЛЛ Ту-104А

Таблица 1. Химический состав (мас. %) и временное сопротивление разрыву исследуемых сплавов

Марка сплава	Mg	Cu	Al	Mn	Zn	Cd	Fe	$\sigma_{в}$, МПа
АМг6	6,2	0,1	Осн.	0,60	0,2	—	0,40	320
АМг3	3,5	0,1	»	0,50	0,2	—	0,50	230
ФД0	0,3	0,1	»	0,15	0,2	—	0,30	80
1201	—	6,2	»	0,30	—	—	0,10	370
ИМВ-2*	Осн.	—	5,0	0,30	1,4	4,2	0,01	250

* В данном сплаве 2 мас. % Li.

Таблица 2. Режимы электронно-лучевой сварки при получении соединений исследуемых сплавов

№ образца	Марка сплава	Толщина, мм	Вид образца	Ток пучка, мА	Скорость сварки, м/ч
1	АМг6	2,0	Стык с проплавлением	90	36
2	1201	2,0	» »	100	26
3	АМг3	2,5	Наплавленный валик с проплавлением	100	36
4	АД0	2,0	То же	100	30
5	ИМВ-2	2,5	» »	70	36

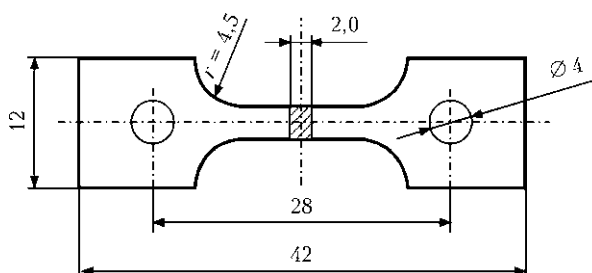


Рис. 2. Схема образца для испытаний на временное сопротивление разрыву



Рис. 3. Внешний вид сварных соединений сплавов АМг6 (а), 1201 (б), АМг3 (в), АД0 (г) и ИМВ-2 (д), полученных электронно-лучевой сваркой в условиях кратковременной невесомости на ЛЛ Ту-104А

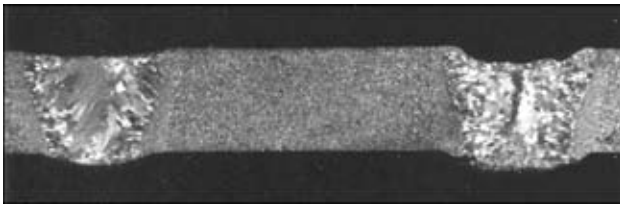


Рис. 4. Макрошлифы сварных соединений сплава АМг6, полученных электронно-лучевой сваркой на одинаковом режиме при $g/g_0 \leq 1 \cdot 10^{-2}$ (слева) и ≥ 2 (справа)

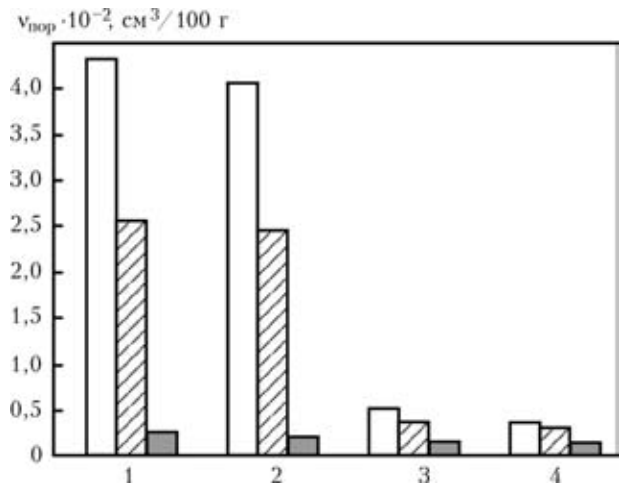


Рис. 5. Диаграмма склонности к пористости $v_{пор}$ сварных соединений сплава АМг6 с концентрацией водорода 0,6 (белый столбик), 0,4 (заштрихованный) и 0,2 см³/100 г (серый), полученных при различном ускорении: 1 — $g/g_0 \leq 1 \cdot 10^{-2}$; 2 — 1/6; 3 — 1; 4 — ≥ 2

ностям структуры металла шва и ЗТВ, а также по значениям временного сопротивления разрыву соединений. С этой целью изготавливали малогабаритные образцы (рис. 2). Поперечные и продольные макрошлифы выявляли травлением в растворе кислот 72 % HCl, 24 % HNO₃, 4 % HF.

При визуальном наблюдении процесса электронно-лучевой сварки во всем диапазоне действующих ускорений не было зафиксировано случаев выброса жидкого металла из ванны или отличий в формировании сварных соединений по сравнению с земными условиями. Внешний вид сварных соединений, полученных в условиях кратковременной невесомости (рис. 3), свидетельствует о том, что характер их формирования ничем не отличается от наземных. Необходимо отметить, что при сварке в условиях перегрузки ($g/g_0 \geq 2$) швы на образцах из исследуемых сплавов получены с заниженной технологической вы-

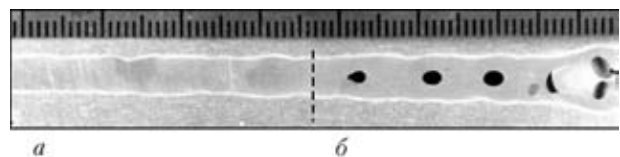


Рис. 6. Поверхностный продольный срез на соединении сплава АМг6 с концентрацией водорода 0,4 см³/100 г, полученном электронно-лучевой сваркой при $g/g_0 \geq 2$ и $\leq 1 \cdot 10^{-2}$, в условиях перегрузки (а) и невесомости (б)

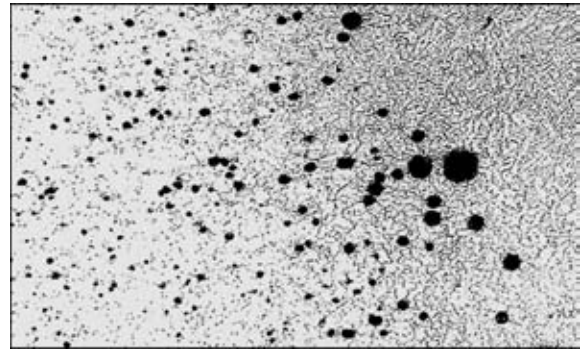


Рис. 7. Микроструктура ($\times 150$) с характерной пористостью в зоне частичного оплавления сварного соединения сплава АМг6, полученного электронно-лучевой сваркой при $g/g_0 \leq 1 \cdot 10^{-2}$

пуклостью верхней части и провисающем корне (рис. 4). Это свидетельствует о том, что значительные силы гравитации оказывают существенное влияние на расплавленную сварочную ванну и, как следствие, на геометрию шва.

Анализ рентгенограмм и послойных поверхностных срезов макрошлифов сварных соединений показал, что при всех вариантах сварки сплавов АМг3, АД0, ИМВ-2 и АМг6 с концентрацией растворенного водорода 0,2 см³/100 г пористость в металле швов составляет менее 0,1 · 10⁻² см³/100 г или полностью отсутствует. При сварке сплава АМг6 с кон-

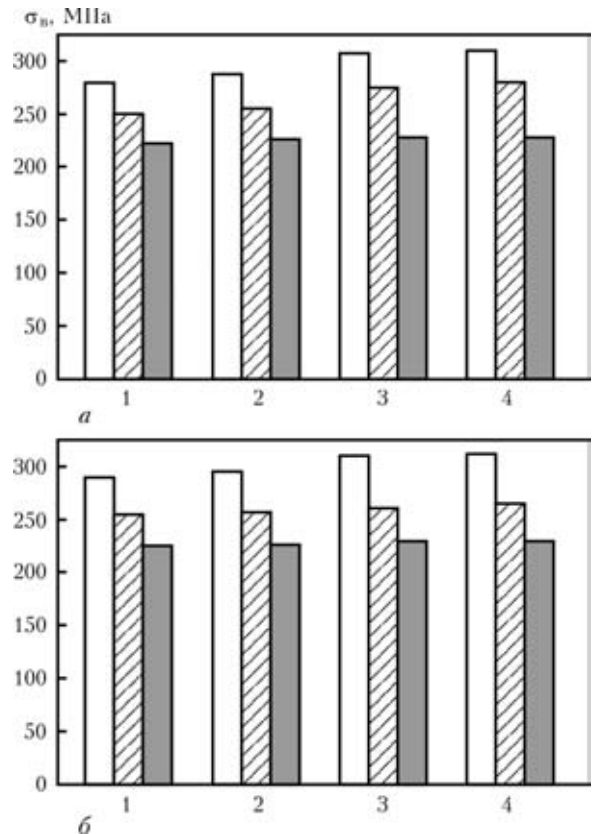


Рис. 8. Диаграмма временного сопротивления σ_b сварных соединений сплавов АМг6 (с концентрацией водорода 0,3 см³/100 г) (белый столбик), ИМВ-2 (заштрихованный) и АМг3 (серый), полученных при $T = 20$ (а) и -196 °С (б) в зависимости от уровня гравитации: 1 — $g/g_0 \leq 1 \cdot 10^{-2}$; 2 — 1/6; 3 — 1,0; 4 — ≥ 2

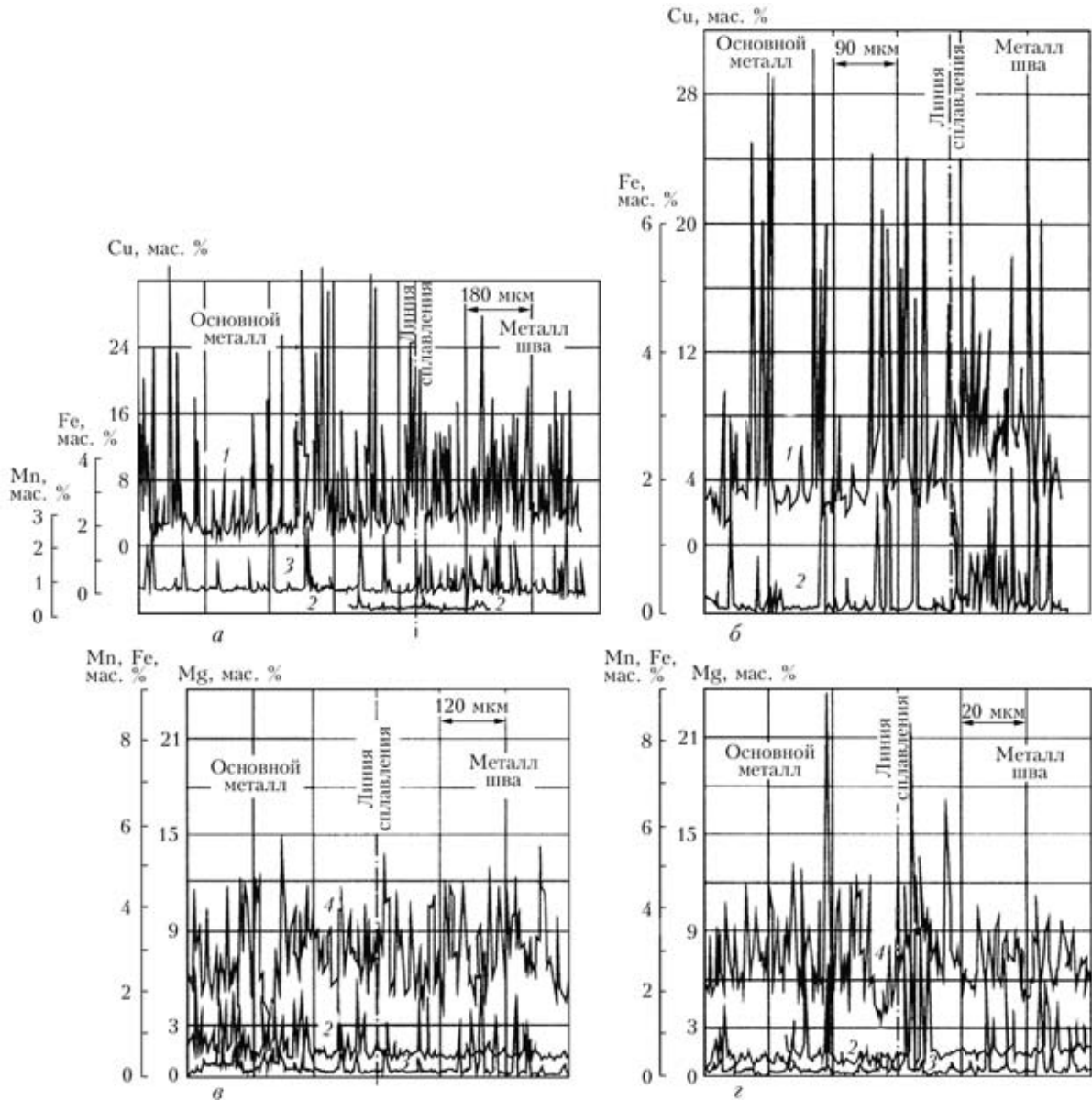


Рис. 9. Распределение легирующих и примесных элементов в сварных соединениях сплавов 1201 (а, б) и АМг6 (в, з), полученных электронно-лучевой сваркой в наземных условиях (а, в) и в невесомости (б, з): 1 — медь; 2 — марганец; 3 — железо; 4 — магний

центрацией растворенного водорода $0,3 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ и более в металле швов имеет место увеличение пористости, что особенно проявляется при снижении уровня гравитационных сил ($g/g_0 = 1/6$ и $\leq 1 \cdot 10^{-2}$) (рис. 5). В этих условиях суммарный объем пор иногда достигает $4,42 \text{ см}^3/100 \text{ г}$. Кроме того, значительно возрастает размер отдельных пор, которые могут достигать $2,0 \dots 2,5 \text{ мм}$ в диаметре (рис. 6, б).

Сварные соединения термоупрочняемого сплава 1201, полученные в условиях, близких к невесомости ($g/g_0 \leq 1 \cdot 10^{-2}$), отличаются повышенным количеством микропор по сравнению со сварными соединениями, полученными в наземных условиях. Эти микропоры расположены пре-

имущественно на участке частичного оплавления (рис. 7).

Определено, что плотность металла сварных швов, выполненных на исследуемых материалах, не зависит от температурных условий сварки. Сопоставив значения прочности сварных соединений сплавов АМг6 (с концентрацией водорода $0,3 \text{ см}^3/100 \text{ г}$) и ИМВ-2, полученных при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и различных значениях g/g_0 (рис. 8, а), можно отметить тенденцию к снижению прочности при $g/g_0 = 1/6$ и $\leq 1 \cdot 10^{-2}$, для сплава АМг3 эти значения остались неизменными. При сварке в условиях низкой температуры и различных значениях g/g_0 (рис. 8, б) также наблюдается закономерность повышения прочности с ростом уров-



Таблица 3. Временное сопротивление разрыву (МПа) при 20 °С соединений сплава 1201, полученных в различных технологических условиях

Температура обработки $T, ^\circ\text{C}$	Ускорение g/g_0 , действующее на сварочную ванну			
	$\leq 1 \cdot 10^{-2}$	1/6	1	≥ 2
+20	$\frac{237}{243}$	$\frac{228}{261}$	$\frac{245}{292}$	$\frac{248}{301}$
-100	$\frac{259}{264}$	$\frac{254}{281}$	$\frac{269}{297}$	$\frac{303}{308}$
-120	$\frac{271}{273}$	$\frac{279}{289}$	$\frac{282}{291}$	$\frac{307}{312}$
-196	$\frac{266}{275}$	$\frac{291}{296}$	$\frac{310}{328}$	$\frac{314}{329}$

Примечания. 1. В числителе приведены данные для сварного соединения без термообработки, в знаменателе — с искусственным старением. 2. Временное сопротивление разрыву основного металла, испытанного в исходном состоянии (закалка + искусственное старение), составляет $\sigma_b = 454$ МПа. 3. Для механических испытаний выбирали участки, не содержащие видимых дефектов при рентгеновском контроле. 4. Представленные данные получены путем усреднения пяти испытаний.

ня гравитации. При этом сохраняются аналогичные значения прочности.

Испытания на временное сопротивление разрыву основного металла термоупрочняемого сплава 1201 выполняли в состоянии поставки (без термообработки). Сварные соединения испытывали с термообработкой ($T = 180$ °С в течение 12 ч) и без нее. Значения временного сопротивления разрыву соединений сплава 1201 приведены в табл. 3.

Анализ результатов механических испытаний сплава 1201 показывает, что сварные соединения, полученные в условиях, близких к невесомости ($g/g_0 \leq 1 \cdot 10^{-2}$), характеризуются наименьшими значениями прочности (табл. 3). С увеличением ускорений прочность сварных соединений, полученных при температуре 20 °С, повышается с 230 до 250 МПа, а после искусственного старения — с 240 до 300 МПа. При сварке с охлаждением образцов до температуры -196 °С прочность соединений, полученных при $g/g_0 \leq 1 \cdot 10^{-2}$, также увеличивается до 270 МПа, а при $g/g_0 \geq 2$ значительно возрастает (до 320 МПа). Таким образом, повышение гравитации и наличие низких температур способствуют увеличению уровня временного сопротивления соединений из сплава 1201 после сварки до 315 МПа, а вследствие искусственного старения — до 330 МПа.

При исследовании свариваемости указанных сплавов с помощью микрорентгеноструктурного анализа структуры (микроанализатор SX-50 фирмы «Самеса») изучали влияние перечисленных факторов на испарение легирующих элементов (рис. 9). Химический состав металла исследуемых

швов, выполненных при различных технологических вариантах сварки, практически не зависит от температуры образца и давления в камере и близок к основному металлу. Проанализировав характер распределения легирующих элементов в соединениях сплава АМг6, полученных в наземных условиях, можно отметить, что максимальное содержание магния в основном металле и металле шва составляет около 15 мас. %, а при $g/g_0 \leq 1 \cdot 10^{-2}$ — свыше 21 мас. % в основном металле и более 15 мас. % в металле шва. В соединениях сплава 1201, полученных в наземных условиях, имеет место резкое повышение содержания меди (свыше 28 мас. %) как в основном металле, так и в металле шва. Аналогичное повышение содержания меди происходит и в сварном соединении сплава 1201, полученном при $g/g_0 \leq 1 \cdot 10^{-2}$. В нем наблюдается тенденция к увеличению содержания меди в металле шва на 1,5...2,0 мас. % по сравнению с основным металлом.

Выводы

1. Установлено, что отрицательное влияние невесомости и перегрузок на формирование сварных соединений алюминиевых и магниевых сплавов не проявляется. Не зафиксированы также выбросы жидкого металла из сварочной ванны.

2. Алюминиевые сплавы АД0, АМг6 и магниевый сплав ИМВ-2 хорошо свариваются электронно-лучевой сваркой в условиях низких гравитационных сил и низкой температуры (до -196 °С), когда концентрация растворенного в основном металле водорода не превышает 0,2 см³/100 г. Условия, близкие к невесомости, способствуют повышению пористости в металле швов, выполненных на алюминиевых сплавах с концентрацией водорода 0,3 см³/100 г и выше.

3. Увеличению значений временного сопротивления сварных соединений сплавов АМг6, АМг3, АД0 и 1201 на 10...15 % способствуют условия повышенной гравитации и низкая температура (-100...-196 °С).

4. Искусственное старение сварных соединений сплава 1201, полученных при 20 °С и низкой температуре при всех действующих на сварочную ванну ускорениях, дополнительно повышает значение временного сопротивления соединений на 10...15 %.

1. Николаев Г. А., Фридляндер И. Н., Арбузов Ю. П. Свариваемые алюминиевые сплавы. — М.: Металлургия, 1990. — 296 с.
2. Рабкин Д. М. Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов. — Киев: Наук. думка, 1986. — 256 с.
3. Дриц М. Е., Свидерская З. А., Елкин Ф. М. Сверхлегкие конструкционные сплавы. — М.: Наука, 1972. — 142 с.
4. Осокина Т. Н., Каран А. Б., Якушин Б. Ф. Сварка магниевых сплавов с литием // Автомат. сварка. — 1978. — № 1. — С. 48–50.



5. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф. Сварка и родственные технологии в космосе. — Киев: Наук. думка, 1998. — 184 с.
6. Патон Б. Е., Дудко Д. А., Лапчинский В. Ф. Перспективы прикладных проблем космической технологии металлов. — Киев: Наук. думка, 1985. — С. 3–6.
7. Суэдзава Э. Космические станции и колонии. Сварка в космосе // Техника сборки и соединения. — 1989. — № 9. — С. 66–75.
8. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
9. Никифоров Г. Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. — М.: Машиностроение, 1972. — 264 с.
10. Soete W. De problematiek van de lasfouten en de moeilijkheden van de breukmechanica // Rev. Soudure. — 1971. — 27, № 3. — S. 198–203.
11. Ishii Yugoro, Iida Kunihire. Low and intermediate cycle fatigue strength of butt welds containing weld defects // J. NDI. — 1969. — 18, № 10. — P. 443–476.
12. Космос: технологии, материаловедение, конструкции: Сб. науч. тр. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, 2000. — 528 с.
13. Беляков И. Т., Борисов Ю. Д. Технология в космосе. — М.: Машиностроение, 1974. — 292 с.
14. Ганиев Р. Ф., Лапчинский В. Ф. Проблемы механики в космической технологии. — М.: Машиностроение, 1978. — 116 с.
15. Космическое материаловедение / Пер. с англ.; под ред. В. С. Авдеевского. — М.: Мир, 1989. — 262 с.

Features of weld formation in welded joints of aluminium and magnesium alloys made by electron beam welding under the influence of varying gravity forces and low temperatures are given. Influence of the above factors and content of dissolved hydrogen in the base metal on joint strength, defect formation and loss of alloying elements from the weld metal is shown.

Поступила в редакцию 01.03.2010

21-24
ИЮНЯ 2011
Нижний Новгород

X Международная специализированная выставка
МАШИНОСТРОЕНИЕ
СТАНКИ
ИНСТРУМЕНТ

MaDIn

XV Международная специализированная выставка
СВАРКА-2011

Всероссийское ЗАО "Нижегородская ярмарка"
603086, г. Нижний Новгород, ул. Совнаркомовская, 13
тел. (831) 277-54-96, 277-55-89 факс: 277-55-86
E-mail: kaa@yarmarka.ru, levin@yarmarka.ru
<http://www.yarmarka.ru>



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДУГОВОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ НАХЛЕСТОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О. В. МАХНЕНКО, д-р техн. наук, **А. Н. ТИМОШЕНКО**, канд. техн. наук,
А. Ф. МУЖИЧЕНКО, **П. В. ГОНЧАРОВ**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Для оценки возможности совершенствования технологии дуговой точечной сварки плавящимся электродом проведено математическое моделирование процесса сварки с применением метода термопластичности в сочетании с методом конечных элементов. На основе данных о размерах зоны сплавления и уровне остаточных напряжений в зоне сварной точки выполнена оценка работоспособности точечного сварного соединения при статических и переменных нагрузках.

Ключевые слова: дуговая точечная сварка, нахлесточные соединения, сварные корпусные конструкции, прочность, математическое моделирование

Технология дуговой точечной сварки (ДТС) нахлесточных соединений известна достаточно хорошо и давно применяется для получения угловых и стыковых соединений [1–3]. Одним из недостатков этой технологии при соединении элементов толщиной более 1,5 мм является невозможность обеспечения качества формирования сварного соединения в вертикальном положении и соответственно его работоспособности под действием эксплуатационных нагрузок. В этом случае получение соединений удовлетворительного качества достигается лишь при ДТС по отверстиям, предварительно пробитым в наружных элементах, что значительно увеличивает трудоемкость работ. При отсутствии отверстий для проплавления нижнего элемента нахлесточного соединения необходимо существенно повышать сварочный ток, что приводит к увеличению объема расплавленного металла и стеканию его по вертикальной плоскости, при этом нарушается качественное формирование сварной точки (рис. 1).

В работе [4] предложена усовершенствованная технология ДТС плавящимся электродом в защитных газах нахлесточных соединений в вертикальном положении без предварительной пробивки отверстий в наружном привариваемом листе, которая обеспечивает получение сварных точечных соединений заданных размеров и высокого качества за счет программирования многоциклового сварочного нагрева. Сварочные циклы обеспечивают подогрев, проплавление (прожог) наружного листа и последующее формирование сварной точки. Современный уровень автоматики позволяет запрограммировать режимы последовательности сварочных циклов и осуществлять сварку в ав-

томатическом или полуавтоматическом режиме. Однако выбор режимов многоциклового сварочного нагрева для каждого сочетания материала и толщины соединяемых элементов экспериментальным путем — достаточно трудоемкий процесс.

В настоящей работе рассмотрены возможности применения математического моделирования с целью совершенствования технологии ДТС. Моделирование процесса сварки выполнено с применением методов термопластичности в сочетании с методом конечных элементов. На основании данных о размерах зоны сплавления и уровне остаточных напряжений в области сварной точки оценена работоспособность точечного сварного соединения при статических и переменных нагрузках.

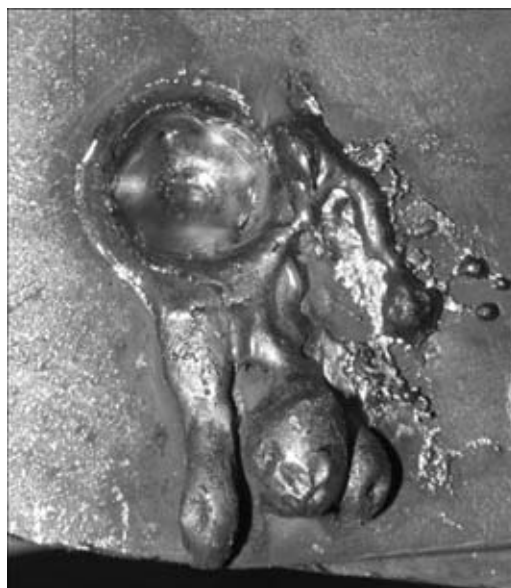


Рис. 1. Некачественно сформированная сварная точка вследствие стекания расплавленного металла по вертикальной плоскости

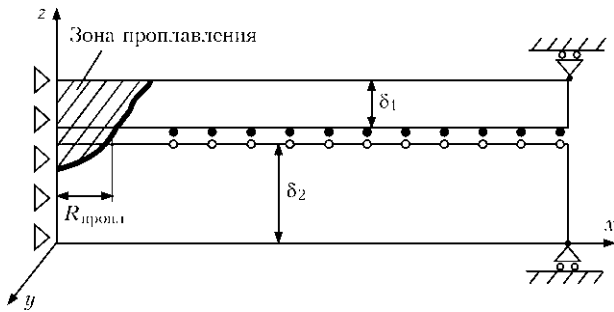


Рис. 2. Схема конечно-элементной модели точечного дугового сварного соединения, полученного ДТС: белые и черные точки — контактные элементы поверхности соответственно верхнего и нижнего соединяемых листов; δ_1, δ_2 — толщина соответственно верхнего и нижнего соединяемых листов

Для проведения моделирования ДТС внахлест разработана конечно-элементная модель (рис. 2). Использована модель пространственно-распределенного источника сварочного нагрева в осесимметричной двухмерной постановке, для которой удельный тепловой поток имеет следующее распределение:

$$q(x, y) = \frac{2q_{эф}}{\pi} k_x \sqrt{k_y} \exp(-k_x x^2 - k_y (y - y_0)^2),$$

где $q_{эф} = \eta I_{св} U_d$ — эффективная тепловая мощность сварочного источника нагрева; $I_{св}$ — сварочный ток; U_d — напряжение на дуге; η — коэффициент полезного действия сварочного нагрева; k_x, k_y — коэффициенты распределения тепловой мощности.

Тепловое контактное сопротивление (ТКС) между двумя свариваемыми пластинами зависит от чистоты и шероховатости поверхности, контактного давления и зазора между пластинами. Поэтому в каждом конкретном случае при сварке пластин значение коэффициента ТКС может изменяться в диапазоне $k_{ТКС} = 0,0002 \dots 0,0037$ Вт/(мм²·К) [5]. Однако, как показали результаты расчета с учетом кратковременности процесса сварки, изменение значений ТКС в указанном диапазоне существенного влияния на кинетику распределения температурных полей не оказывает.

В разработанной модели изменение ТКС между пластинами в процессе сварки с учетом процесса сплавления моделируется следующим образом. Если на каком-либо временном шаге температура в точке контакта превышает температуру плавления, то на данном временном шаге и на всех последующих значение $k_{ТКС}$ равно значению коэффициента теплоотдачи при идеальном контакте. Таким образом в процессе сварочного нагрева определяется максимальный радиус проплавления $R_{пропл}$ между пластинами. Если точка контакта входит в зону проплавления, то на последующих временных шагах значение $k_{ТКС}$ равно

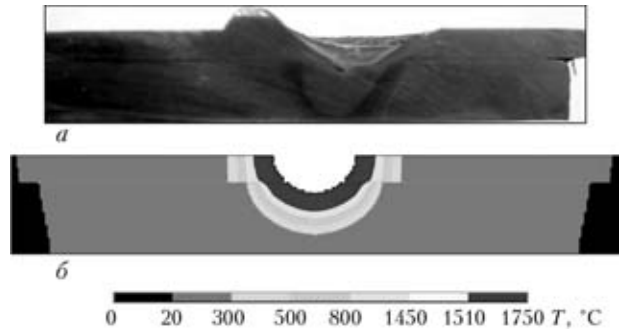


Рис. 3. Макрошлиф точечного сварного соединения (а) и математическая модель, учитывающая выливание части расплавленного металла после прожигающего сварочного цикла (б)

значению коэффициента теплоотдачи при идеальном контакте.

В результате решения температурной задачи определяются температурные поля в свариваемых внахлест пластинах при нагреве и последующем охлаждении, а также форма и размеры зоны проплавления. Разработанная математическая модель нагрева свариваемых внахлест пластин в пространственном положении на вертикальной плоскости учитывает выливание части расплавленного металла во время мощного сварочного цикла, при котором происходит прожигание верхнего листа (рис. 3). Приблизительный объем вылитого расплавленного металла может определяться на основе экспериментальных данных.

Температурная и механическая задачи просматривались последовательно по времени от начала нагрева до полного остывания металла. Распределение температур на каждом временном шаге используется как нагрузка для решения механической задачи по определению напряженно-деформированного состояния на текущем временном шаге с учетом состояния на предыдущем шаге.

Задачу термопластичности решали с помощью теории пластического течения Прандтля–Рейсса, ассоциированной с условием текучести Мизеса. На каждом этапе прослеживания линеаризованную задачу решали методом конечных элементов. Физическую нелинейность реализовали итерационным путем. При этом расчетная модель учитывала зависимость физико-механических свойств стали 09Г2С от температуры (табл. 1). При решении механической задачи конечные элементы в пределах зоны проплавления закрепляются между собой, моделируя таким образом сплавление пластин.

С помощью разработанной модели проведено исследование процесса формирования точечного сварного соединения внахлест двух пластин из стали 09Г2С толщиной 2,5 и 7,0 мм при ДТС в углекислом газе на режиме, состоящем из пяти последовательных сварочных циклов (табл. 2, рис. 4). Сварку выполняли в пространственном положении на вертикальной плоскости, что свя-



Таблица 1. Физико-механические свойства стали 09Г2С*

T, °C	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(мм·°C)	Объемная энтальпия h _{1/3} , Дж/мм ³	Модуль Юнга E·10 ⁻⁵ , МПа	Коэффициент линейного термического расширения α·10 ⁵ , 1/°C	Предел текучести σ _T , МПа
20	0,040	0	1,97	1,14	435
100	0,040	0,5	1,97	1,14	398
200	0,039	1,0	2,01	1,22	360
300	0,038	1,5	1,95	1,26	323
400	0,036	1,7	1,88	1,30	285
500	0,034	2,0	1,80	1,38	222
600	0,032	2,4	1,69	1,39	97
700	0,029	3,2	1,56	1,41	45
800	0,026	4,0	1,35	1,83	43
900	0,026	5,0	1,25	1,87	43
1000	0,028	6,0	1,25	1,94	43
1100	0,029	7,6	1,25	1,95	43
1200	0,030	9,2	1,25	1,95	43
1400	0,030	10,0	1,25	1,95	43
1510	0,030	15,0	1,25	1,95	43
1750	0,030	17,5	1,25	1,95	43

* Коэффициент Пуассона ν = 0,3.

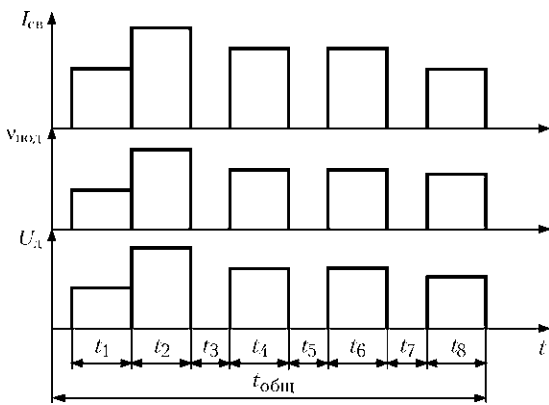


Рис. 4. Схема изменения параметров режима ДТС в вертикальном положении: t₁...t₈ — длительности импульсов и пауз; t_{общ} — общее время цикла ДТС

Таблица 2. Параметры режима ДТС

№ сварочного цикла	Напряжение на дуге U _д , В	Сварочный ток I _{св} , А	Скорость подачи сварочной проволоки v _{под} , м/ч	Длительность сварочного импульса t _{св} , с	Длительность паузы между импульсами t _{пауз} , с
1	28	200	120	0,4...0,5	0,1
2	42	450	276	1,0...1,3	2,0
3	30	250	138	0,8...1,0	1,5
4	30	250	138	0,8...1,0	1,0
5	26	190	120	0,5	—

зано с определенными сложностями формирования сварного соединения.

Коэффициент полезного действия сварочного нагрева выбран равным η = 0,7 на основе данных работы [6], а также из условия согласования размеров зоны проплавления на макрошлифе сварного точечного соединения с расчетными результатами (рис. 5). Коэффициент распределения тепловой мощности k_x = 3,0 1/мм² скорректирован также из этого условия. В первом разогревающем сварочном цикле не моделировали внесение присадочного материала из-за незначительной его продолжительности и последующего выливания расплавленного металла во время второго сварочного цикла. Объем расплавленного металла, вылитого в конце нагрева во время второго сварочного цикла, определяли из условия последующего заполнения присадочным материалом во время третьего и четвертого сварочных циклов.

Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов показало, что разработанная математическая модель вполне работоспособна при определении формирования точечного сварного соединения внахлест двух пластин дуговой сваркой в пространственном положении на вертикальной плоскости и может применяться для разработки технологии сварки таких соединений при сложном сварочном цикле.

Указанная математическая модель позволила получить расчетные результаты по распределению остаточных напряжений в зоне сварного соединения. Эта информация может быть полезна при оценке прочности точечного сварного соединения.

Разрушение сварных соединений с точечными швами обычно происходит при разрушении сварных точек по механизму среза (рис. 6) [7, 8]. Возможны и другие механизмы разрушения соединения как по основному металлу или зоне термического влияния, так и вследствие вырыва сварной точки из основного металла по ее периметру. Определяющим является разрушение, которое начинается у вершины полости, примыкающей к сварной точке, и распространяется либо по телу точки либо по основному металлу. Таким образом, разрушение инициируется острым концентратором напряжений, расположенным по периметру сварной точки. Действие указанного концентратора может быть учтено на основе современных критериев механики разрушения, а именно, двухпараметрического критерия вязкох-

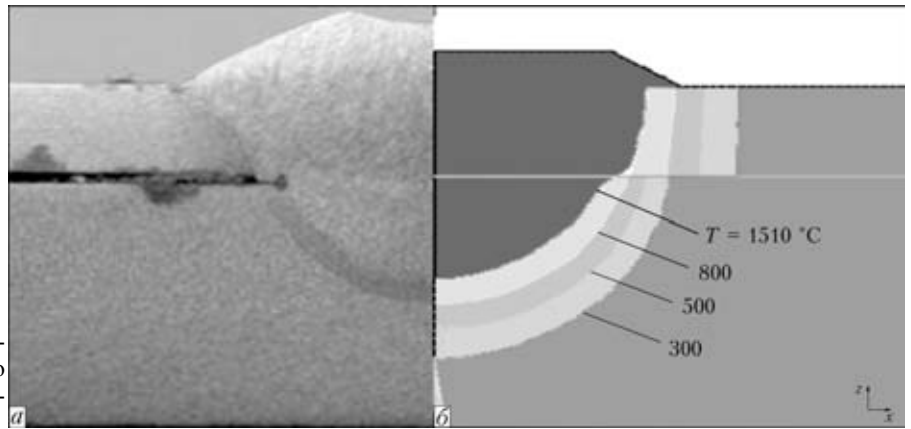


Рис. 5. Сравнение размера зоны проплавления на макрошлифе точечного сварного соединения (а) с расчетными результатами (б)

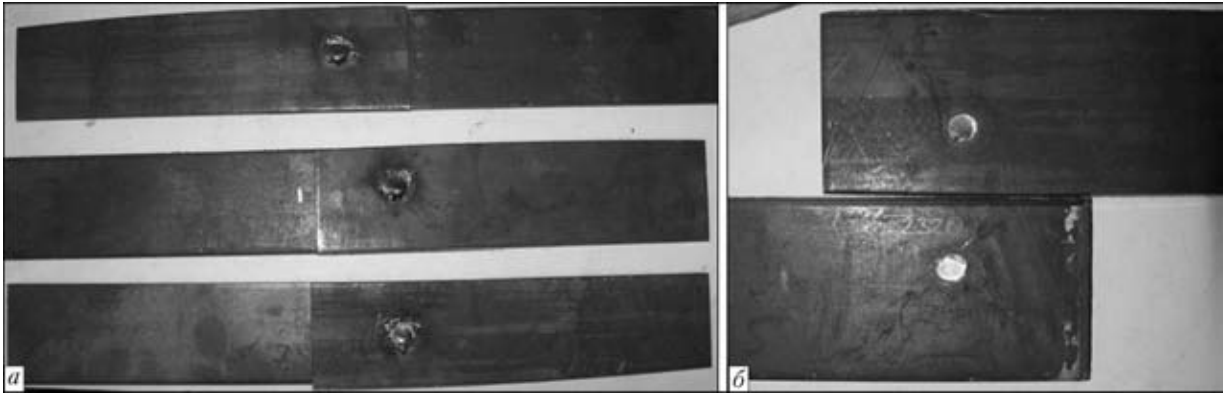


Рис. 6. Вид образцов точечных сварных соединений до испытаний на растяжение (а) и после разрушения сварных точек по механизму среза (б)

рупкого разрушения [9, 10]. Согласно этому подходу равновесие трещины не нарушается, если соблюдается условие

$$K_r \leq f_1(L_r),$$

где $K_r = K_I/K_{IC}$ — отношение интенсивности напряжений K_I в вершине трещины к критическому значению этой величины K_{IC} ; $L_r = \sigma_{реф}/\sigma_T$ — отношение критического напряжения в зоне сварной точки $\sigma_{реф}$, определяющего разрушение по механизму пластической неустойчивости, к пределу текучести материала σ_T . Вид функции $f_1(L_r)$ определяется экспериментально. На рис. 7 эти данные приведены для различных конструкционных сталей.

При вычислении значений K_I должны учитываться как внешняя нагрузка, т. е. нагрузка усилием P_x на одну точку в плоскости свариваемых листов (рис. 8), так и остаточные нерелаксированные напряжения в зоне сварного соединения. При вычислении значений L_r остаточные напряжения не учитываются, поскольку они полностью релаксируются.

Значения P_x определяются через напряжения на периферии соединяемых элементов σ_{xx}^∞ (рис. 8, а), значения толщины металла δ_j и шага l между сварными точками, т. е. $P_x = \sigma_{xx}^\infty \delta_j l$ ($j = 1, 2$). В результате нагружения происходит деформирова-

ние соединения (рис. 8, б). При деформировании на сварную точку действуют срезающие усилие $P_x = P_x \cos \beta$, отрывное усилие $P_z = P_x \sin \beta$ и момент

$$M = M_1^0 + M_2^0 = P_x \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \cos \beta.$$

Значения угла β находятся в сложной зависимости от геометрических параметров сварного соединения, механических свойств материалов и усилия P_x . Параметры деформирования точечного сварного нахлесточного соединения и значения

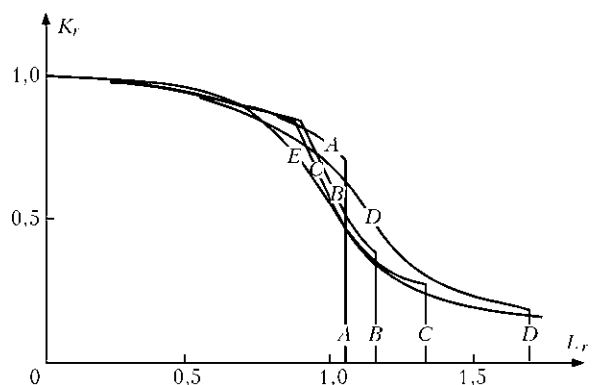


Рис. 7. Диаграммы предельного состояния $K_r \leq f_1(L_r)$ для конструкционных сталей разного типа [3]: А — высокопрочная сталь EN408; В — сталь для сосудов давления А533В; С — низкоуглеродистая сталь с марганцем; D — аустенитная сталь; E — расчетная кривая [9]

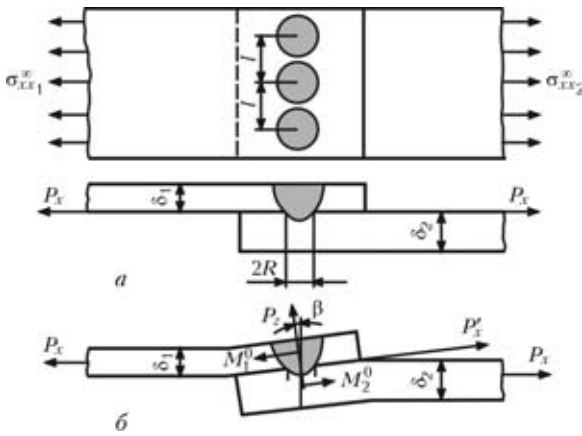


Рис. 8. Схемы сварного соединения с однорядным точечным сварным швом до нагружения (а) и деформирования его при P_x (б); l — расстояние между центрами сварных точек (шаг); P_x' , P_x'' — усилия, действующее в зоне сварной точки; M_1^0 , M_2^0 — усилия, действующее соответственно на верхние и нижние соединяемые листы; β — угол изгиба

K_1 могут быть вычислены по зависимостям, предложенным в работах [11, 12]. По указанным зависимостям выполнены расчетные оценки предельных значений напряжений $(\sigma_{xx}^{\infty})_{пр}$ в верхнем более тонком листе при статическом нагружении в зависимости от шага l сварных точек размером $2R$, толщины верхнего δ_1 и нижнего δ_2 листов, а также от остаточных напряжений σ_{zz} в зоне сварной точки.

Расчетные данные, представленные на рис. 9, показывают, что предельные значения напряжений $(\sigma_{xx}^{\infty})_{пр}$ при статическом нагружении резко уменьшаются с увеличением шага l сварных точек.

Размер сварной точки также существенно влияет на предельные значения напряжений $(\sigma_{xx}^{\infty})_{пр}$ (рис. 10). Увеличение размера сварной точки спо-

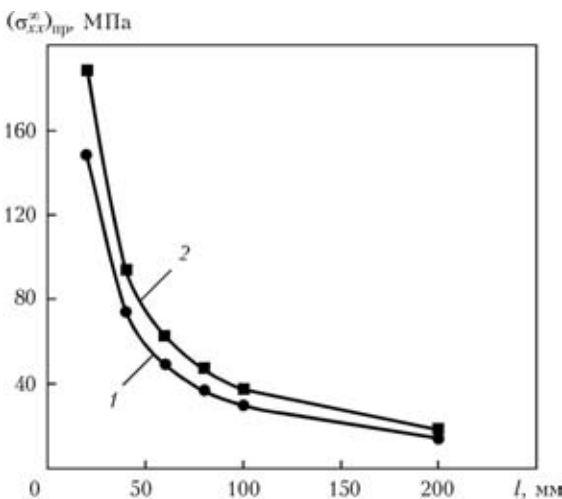


Рис. 9. Расчетные данные об изменении предельных значений напряжений $(\sigma_{xx}^{\infty})_{пр}$ в верхнем более тонком листе ($\delta_1 = 2,5$ мм, $\delta_2 = 7,0$ мм) при статическом нагружении в зависимости от шага l сварных точек размером $2R = 10$ мм (разрушение срезом): 1 — здесь и на рис. 10, 11 $K_{1C} = 1025$; 2 — $2050 \text{ МПа}\cdot\text{мм}^{1/2}$

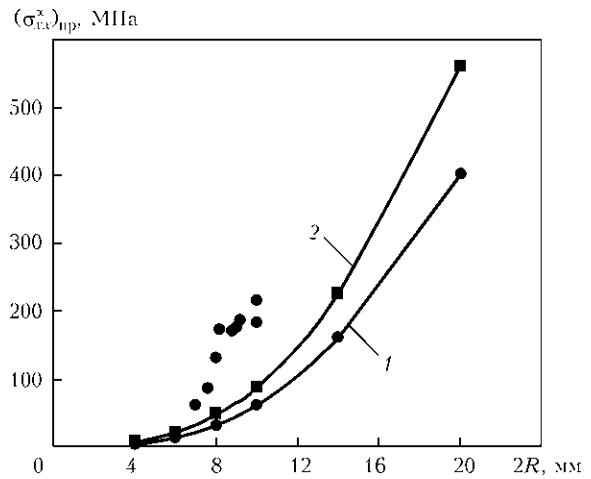


Рис. 10. Сопоставление расчетных (1, 2) и экспериментальных данных (точки) предельных значений напряжений $(\sigma_{xx}^{\infty})_{пр}$ в верхнем более тонком листе ($\delta_1 = 2,5$ мм, $\delta_2 = 7,0$ мм) при статическом нагружении в зависимости от размера $2R$ сварной точки (шаг $l = 50$ мм)

собствует повышению прочности сварного соединения при статическом нагружении. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных на рис. 10 показало, что применяемый расчетный подход является достаточно консервативным.

Увеличение толщины как верхнего, так и нижнего листа отрицательно влияет на прочность точечного сварного соединения. Этот фактор является отрицательным для усовершенствованной технологии ДТС с многоцикловым сварочным нагревом, которая в основном применяется при сварке достаточно толстых листов.

Расчетные данные на рис. 11 показали, что влияние уровня остаточных напряжений σ_{zz} , действующих по толщине листов в зоне сварной точки, на предельные значения напряжений $(\sigma_{xx}^{\infty})_{пр}$ в верхнем более тонком листе при статическом нагружении незначительно. Как видно из рис. 12, уровень остаточных напряжений σ_{zz} достаточно

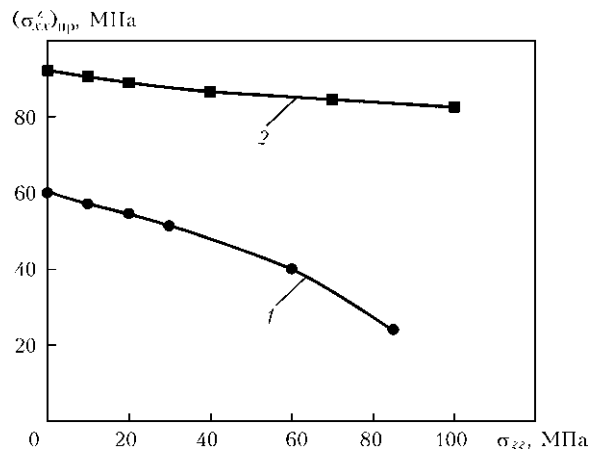


Рис. 11. Изменение предельных значений напряжений $(\sigma_{xx}^{\infty})_{пр}$ в верхнем листе ($\delta_1 = 2,5$ мм, $\delta_2 = 7,0$ мм) при статическом нагружении в зависимости от остаточных напряжений σ_{zz} (размер сварной точки $2R = 10$ мм, $l = 50$ мм)

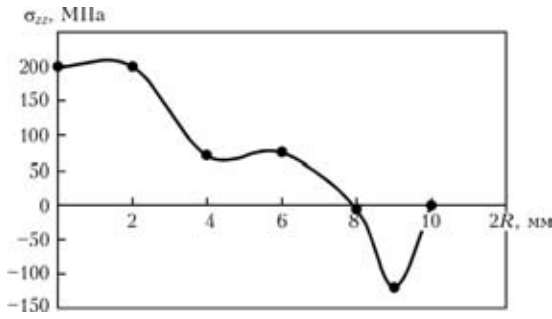


Рис. 12. Расчетные данные о распределении остаточных напряжений σ_{zz} в зоне точечного сварного соединения по линии сплавления свариваемых листов ($\delta_1 = 2,5$ мм, $\delta_2 = 7,0$ мм), размер сварной точки $2R = 10$ мм

низкий. В соответствии с уравнением равновесия интеграл нормальных напряжений σ_{zz} по линии (площади) сплавления должен быть равен нулю. На основании этого можно утверждать, что уровень остаточных напряжений не является определяющим фактором прочности точечного сварного соединения при статическом нагружении.

При циклическом нагружении точечного сварного соединения условие предельного состояния может быть сформулировано в виде [13]

$$\Delta K_{\omega}^{\max} = K_{\omega}^{\max} - K_{\omega}^{\min} = \Delta K_{th}^0 (1 - \alpha r_{\sigma}),$$

где максимальные K_{ω}^{\max} и минимальные K_{ω}^{\min} значения определяются соответственно при $P_x = P_x^{\max}$ и $P_x = P_x^{\min}$, r_{σ} — коэффициент асимметрии цикла изменения усилия P_x ; ΔK_{th}^0 — пороговое значение размаха коэффициента интенсивности напряжений K_I ($r_{\sigma} = 0$), при котором распространение трещины нормального отрыва практически не происходит; α — экспериментальная характеристика материала ($\alpha \approx 0,50 \dots 0,85$) [13].

Выполнена расчетная оценка прочности точечного сварного соединения при циклическом нагру-

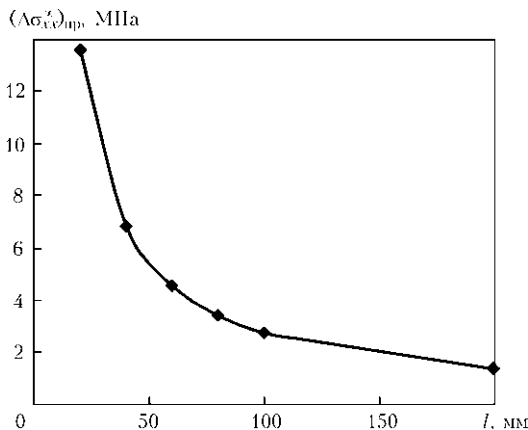


Рис. 13. Изменение предельных значений размаха напряжений $(\Delta\sigma_{xx})_{пр}$ в верхнем более тонком листе ($\delta_1 = 2,5$ мм, $\delta_2 = 7,0$ мм) при циклическом нагружении на базе $2 \cdot 10^6$ цикл в зависимости от шага l сварной точки размером $2R = 10$ мм (разрушение срезом)

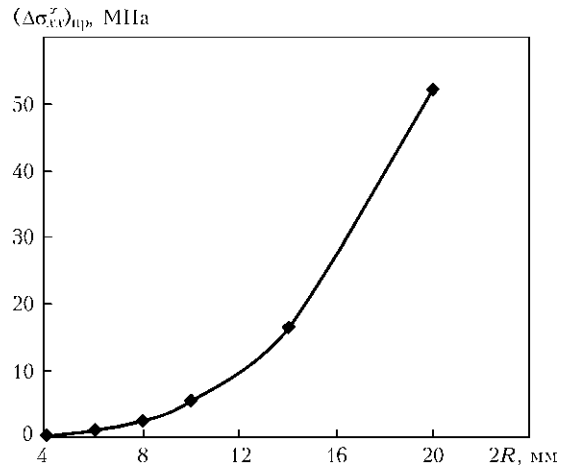


Рис. 14. Изменение предельных значений размаха напряжений $(\Delta\sigma_{xx})_{пр}$ в верхнем более тонком листе ($\delta_1 = 2,5$ мм, $\delta_2 = 7,0$ мм) при циклическом нагружении на базе $2 \cdot 10^6$ цикл в зависимости от размера сварной точки $2R$ ($l = 50$ мм)

жении в зависимости от шага l и размера $2R$ сварной точки, толщины верхнего δ_1 и нижнего δ_2 листов при консервативном значении коэффициента асимметрии цикла $r_{\sigma} = 0$ и $\Delta K_{th}^0 = 190$ МПа·мм^{1/2}. Расчетные данные рис. 13 и 14 показали, что эта зависимость имеет такой же характер, как и при статическом нагружении. Однако по предельным значениям размах напряжений при циклическом нагружении на базе $2 \cdot 10^6$ цикл приблизительно на порядок ниже (на уровне 10...20 МПа), чем при статическом нагружении, что согласуется с современным представлением о циклической прочности сварных соединений.

Выводы

1. Путем регулирования параметров сварочных циклов при ДТС тонколистового металла в вертикальном положении обеспечивается получение высококачественных точечных соединений. Усовершенствованная технология предоставляет новые возможности применения ДТС конструкций в различных отраслях промышленности, особенно при изготовлении каркасных конструкций современных грузовых и пассажирских вагонов.

2. Разработанная математическая модель может эффективно применяться при разработке технологии ДТС соединений внахлест, в том числе при сложном сварочном цикле.

3. Как показали полученные расчетные данные, уровень остаточных напряжений σ_{zz} , действующих по толщине листов в зоне сварной точки, достаточно низкий. В соответствии с уравнением равновесия интеграл нормальных напряжений σ_{zz} по линии (площади) сплавления равен нулю. Следовательно, уровень остаточных напряжений не является определяющим фактором для прочности точечного сварного соединения при статическом нагружении.



4. Предельные значения напряжений (σ_{xx}^{∞})_{пр} при статическом нагружении и размаха напряжений ($\Delta\sigma_{xx}^{\infty}$)_{пр} при циклическом нагружении резко падают с увеличением шага сварных точек.

5. Увеличение размера сварной точки способствует существенному повышению прочности сварного соединения как при статическом, так и циклическом нагружении.

1. Особенности дуговой точечной сварки плавящимся электродом в углекислом газе / В. И. Терещенко, А. Н. Шаровольский, К. А. Сидоренко и др. // Автомат. сварка. — 1983. — № 9. — С. 51–53.
2. Ткаченко А. Н., Воскресенский А. С. Применение дуговой точечной сварки при изготовлении кузовов вагонов // Там же. — 2005. — № 12. — С. 26–28.
3. ГОСТ 14776–79. Дуговая сварка. Соединения сварные точечные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. — Введ. 01.07.80.
4. Лобанов Л. М., Тимошенко А. Н., Гончаров П. В. Дуговая точечная сварка нахлесточных соединений в вертикальном положении // Автомат. сварка. — 2009. — № 1. — С. 34–37.

5. Lienhard J. IV, Lienhard J. V. Heat transfer textbook. — Cambridge, Massachusetts: Phlogiston Press, 2002. — 746 p.
6. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
7. Дорофеев А. Н. Расчет прочности точечных соединений. — М.: Машиностроение, 1964. — 139 с.
8. Серенко А. И., Крумбольдт М. Н., Багрянский К. В. Расчет сварных соединений и конструкций. — Киев: Виш. шк., 1977. — 333 с.
9. Assessment of the integrity of structure containing defects / R. P. Harrison, K. Loosmore, J. Milne et al. // Central Electricity Generating Board. — Berkley, 1980. — Report 6. Rev. 2.
10. Махненко В. И., Починок В. Е. Применение критериев механики разрушения к расчету на прочность сварных соединений с предусмотренными несплошностями трещинообразного типа // Автомат. сварка. — 1982. — № 1. — С. 1–6.
11. Махненко В. И., Рябчук Т. Г., Починок В. Е. Совершенствование методики расчета на прочность сварных соединений с точечными швами // Там же. — 1990. — № 1. — С. 9–14.
12. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. — М.: Наука, 1974. — 640 с.
13. Махненко В. И., Починок В. Е. Сопротивление циклическим нагрузкам сварных соединений, имеющих швы с неполным проплавлением // Автомат. сварка. — 1984. — № 10. — С. 33–40.

Mathematical modelling of the metal-arc spot welding process was carried out by the thermoplasticity method combined with the final element method to estimate the possibility of improving the welding technology. Performance of a spot welded joint under static and alternating loads was evaluated based on the data on sizes of the fusion zone and level of residual stresses within the spot weld zone.

Поступила в редакцию 11.11.2010



11-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА ОБОРУДОВАНИЯ, ПРИБОРОВ И ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ СВАРКИ И РЕЗКИ

22–25 марта 2011

Беларусь, Минск
Выставочный комплекс

В рамках выставки будет работать специализированный салон
Защита от коррозии. Покрытия.

Организатор: МинскЭкспо тел.: +375 17-226-98-58, 17-226-90-83
факс: +375 17-226-98-58, 17-226-99-36
E-mail: e_fedorova@solo.by



ПОВЫШЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОБРАБОТКОЙ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Г. В. СТЕПАНОВ, д-р техн. наук, А. И. БАБУЦКИЙ, И. А. МАМЕЕВ, кандидаты техн. наук, А. В. ЧИЖИК, инж. (Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины),
 В. В. САВИЦКИЙ, канд. техн. наук, Г. И. ТКАЧУК, инж., Н. А. ПАЩИН, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены экспериментальные данные по повышению циклической долговечности образцов из нержавеющей стали и алюминиевого сплава в результате обработки, основанной на прямом пропускании электрического тока через материал, а также данные расчетно-экспериментальных исследований релаксации остаточных сварочных напряжений под действием индуцированного электрического тока. Даны результаты исследований влияния обработки током на остаточные напряжения в покрытии и в материале после шлифовки.

Ключевые слова: металлические материалы, сварные соединения, защитные покрытия, импульсный электрический ток, усталость, остаточные напряжения, релаксация, циклическая долговечность

Результаты исследований влияния обработки импульсным электрическим током (ИЭТ) на механические свойства металлических материалов свидетельствуют о ее положительном воздействии на характеристики сопротивления усталости [1–3]. Однако значительного прогресса в понимании механизма влияния обработки ИЭТ на эти характеристики не достигнуто, поэтому получение новых экспериментальных данных актуально.

Известно также влияние остаточных напряжений (ОН), в частности, остаточных сварочных напряжений (ОСН) на усталость элементов конструкций: в условиях циклического нагружения, особенно при нагружении с малым уровнем напряжений, влияние ОСН проявляется в существенном снижении предела выносливости материала сварного соединения и повышении скорости развития усталостной трещины [4, 5].

Операции по снижению ОСН в конструкциях обычно трудновыполнимы, требуют значительных затрат и в основном сводятся к тепловому и силовому (механическому) воздействию на металл сварного соединения или к сочетанию этих воздействий. Каждый из этих методов не лишен недостатков. Например, локальное применение высокого отпуска приводит к формированию в конструкции после ее полного остывания областей с высокой остаточной напряженностью, поскольку такая обработка по сути воспроизводит термический цикл сварки. Аналогичная ситуация возникает при термообработке некоторых видов покрытий. Таким образом, разработка новых ме-

тодов снижения ОН, лишенных недостатков, свойственных существующим методам, также является актуальной задачей.

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния обработки ИЭТ на усталость стали 10X18H10T и алюминиевого сплава Д16Т, а также результаты экспериментальной оценки влияния ИЭТ на релаксацию ОСН и ОН в покрытии и шлифованном материале.

Влияние ИЭТ на усталость стали 10X18H10T и алюминиевого сплава Д16Т. Для исследований использовали образцы из нержавеющей стали 10X18H10T (рис. 1, а) и аналогичные образцы из алюминиевого сплава Д16Т толщиной

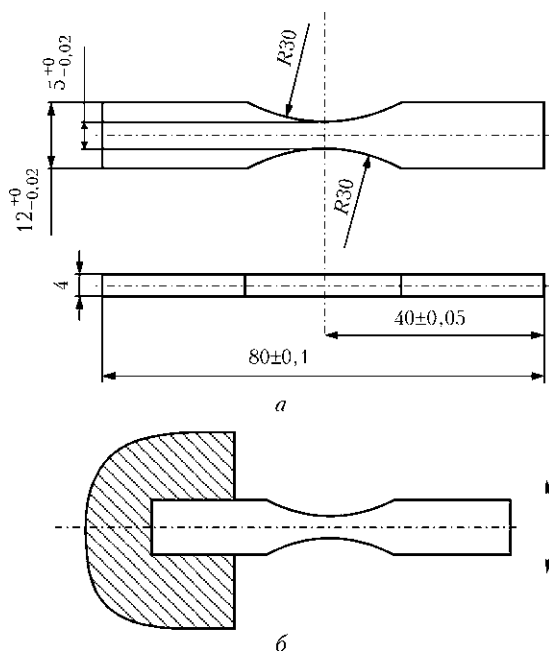


Рис. 1. Эскиз образца для испытаний на усталость (а) и схема его нагружения (б)

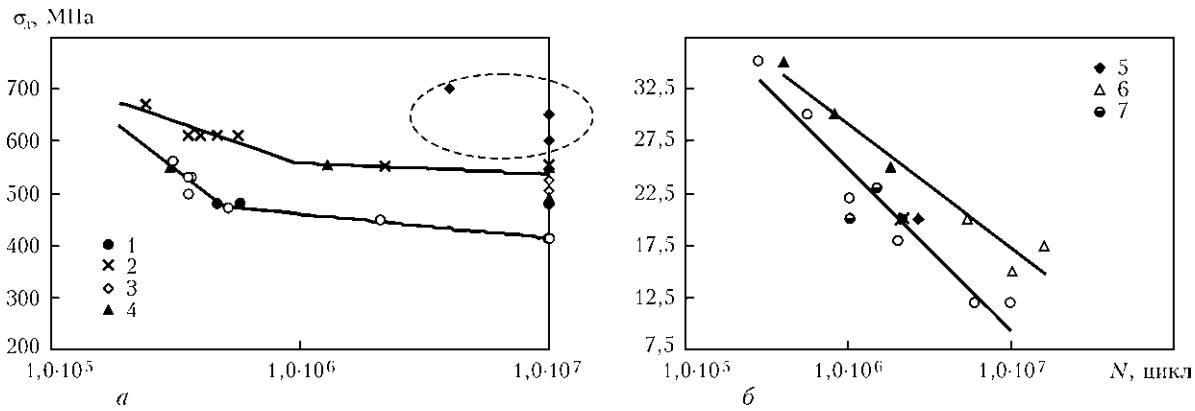


Рис. 2. Кривые усталости образцов из стали 10X18N10T (а) и алюминиевого сплава Д16Т (б) в исходном состоянии (светлый кружок) и после обработки ИЭТ по режимам № 1–7 согласно таблице

3,7 мм (в отличие от 4 мм для стали). При испытаниях на усталость образец консольно (рис. 1, б) закрепляли в захвате установки (электродинамического вибростенда) [6]. Всего было испытано девять групп образцов: по одной — без обработки

(состояние поставки) и семь — после обработки ИЭТ при различных режимах (таблица).

При обработке ИЭТ образцы подсоединяли к клеммам генератора импульсных токов [7]. Через каждый из образцов пропускали по три импульса тока.

Режимы обработки образцов ИЭТ

№ режима	j , кА/мм ²	C , мкФ	U , кВ	I , кА
10X18N10T				
1	1,00	150	1,8	20
2	2,00	150	3,63	40
3	4,00	600	3,46	80
4	5,75	600	5,0	115
Д16Т				
5	1,35	150	2,25	25
6	2,60	100	5,0	48
7	4,32	600	3,46	80

Результаты испытаний (рис. 2) свидетельствуют о существенном влиянии ИЭТ на характеристики сопротивления материалов разрушению. Обработка стальных образцов при плотности тока $j = 1,0$ кА/мм² (режим № 1) приводит к незначительному повышению этих характеристик. При плотности тока $j = 2,0$ кА/мм² (режим № 2) предел выносливости стали повышается на 30 %. Увеличение плотности тока при обработке до $j = 4,0$ кА/мм² (режим № 3) приводит к возрастанию предела выносливости более чем на 50 %. Однако дальнейшее увеличение плотности тока до $j = 5,75$ кА/мм² (режим № 4) вызывает снижение характеристик сопротивления усталости.

Аналогичная тенденция и в случае обработки материала из сплава Д16Т: обработка при плотности тока $j = 1,35$ кА/мм² (режим № 5) не приводит к изменению характеристик усталости по сравнению с исходным состоянием материала. При плотности тока $j = 2,60$ кА/мм² (режим № 6) предел выносливости Д16Т повысился на 40 %. Дальнейшее увеличение плотности тока до $j = 4,32$ кА/мм² (режим № 7) не вызывает изменения характеристик сопротивления усталости по сравнению с исходным состоянием.

Из результатов рентгеноструктурного анализа образцов из стали следует, что при обработке происходит некоторое изменение ориентировки кристаллов, составляющих зерна, свидетельствующее об упорядочении кристаллической структуры материала в направлении действия тока.

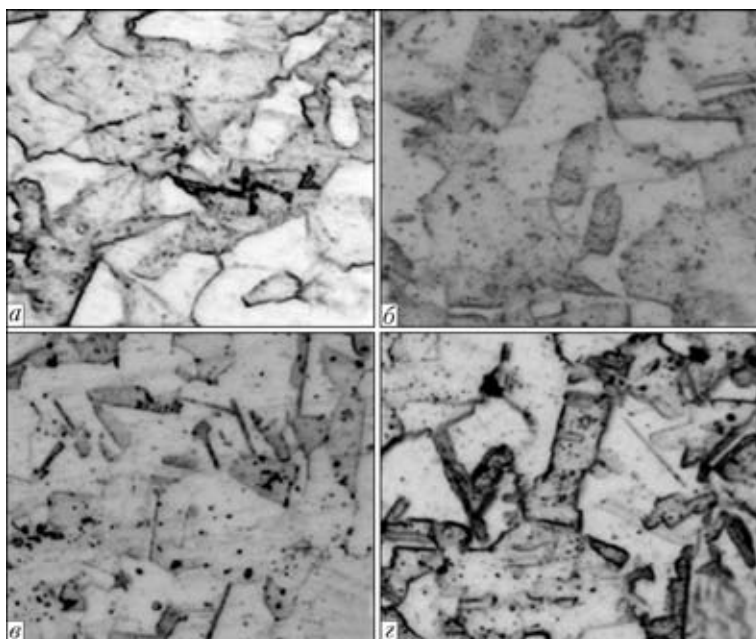


Рис. 3. Микроструктуры (×1000) образца из стали 10X18N10T в зависимости от параметров ИЭТ: а — исходное состояние; б — $I = 40$; в — 80; г — 115 кА

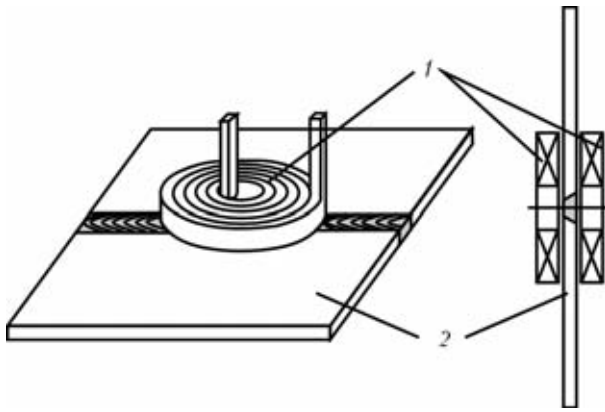


Рис. 4. Схема обработки ИЭМП: 1 — индукторы; 2 — пластина со сварным швом

го, согласно данным металлографических исследований в результате обработки в объеме зерен металла происходит выделение карбидов (сложные карбиды $(Cr,Fe)_7C_3$) (рис. 3). При этом максимальная плотность выделенных карбидов в теле зерен наблюдается при режиме № 3, соответствующем максимальному увеличению предела выносливости (рис. 3, в). Дальнейшее увеличение плотности тока приводит к интенсивному выделению карбидов по границам зерен (рис. 3, з) и, как следствие, разупрочнению материала.

Влияние индуцированного тока на ОН в сварном соединении. Обработку импульсным электромагнитным полем (ИЭМП) пластины из алюминиевого сплава АМг6, полученной стыковой сваркой двух частей длиной 360 мм, шириной 250 мм и толщиной 3,7 мм (стыковой шов по длинной стороне, ширина зоны плавления B около 12 мм), выполняли по схеме, приведенной на рис. 4. При обработке соосно установленные индукторы с наружным диаметром 45 мм смещали вдоль оси шва на 15 мм после каждого разряда. При обработке через индукторы, соединенные последовательно, разряжали батарею конденсаторов емкостью 600 мкФ при напряжении 3 кВ. Результаты измерения ОСН, выполненные методом спеклинтерферометрии, приведены на рис. 5.

Влияние ИЭТ на перераспределение ОН в покрытии. Отрицательное влияние растягивающих ОН на усталость и износостойкость конструктивных элементов с покрытиями хорошо известно. Однако значительные сжимающие ОН в приповерхностном слое не всегда обеспечивают максимальный эффект повышения долговечности деталей. Так, в работе [8] показано, что снижение сжимающих ОН, наведенных в приповерхностном слое титанового сплава после виброамплитудного упрочнения, приводит к значительному увеличению количества циклов до разрушения.

Следовательно, повышение усталостной прочности и износостойкости конструктивных элементов, обеспечиваемые при оптимальном уровне и распределении ОН для заданного режима тер-

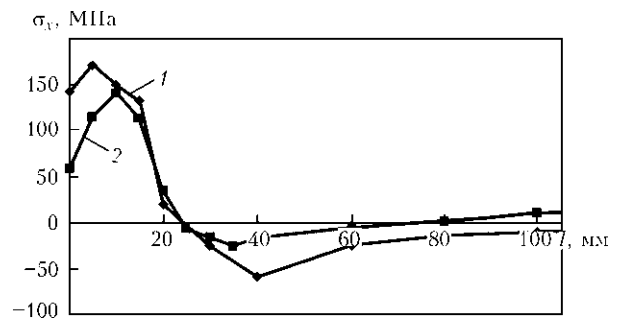


Рис. 5. Зависимость ОН в образце сплава АМг6 (перпендикулярно оси сварного шва, середина пластины) от расстояния от оси шва x до (1) и после обработки ИЭМП (2)

момеханического нагружения и разработка эффективных методов технологической обработки, обеспечивающих формирование оптимального уровня ОН в системе покрытие–основа, являются актуальной задачей.

Исследованы образцы в виде брусков шириной 10 мм, длиной 80 мм и толщиной 3 мм из инструментальной стали системы Cr–Mo–V с односторонним покрытием из нитрида хрома CrN толщиной $b_c = 3$ мкм, нанесенным магнетронным напылением. Покрытие наносили при двух режимах, обеспечивавших по данным изготовителя образцов ОН в покрытии на уровне 0,5 и 1,5 ГПа. При обработке через образец пропускали 2 импульса тока с максимальной амплитудой около 40 кА (разряд батареи конденсаторов емкостью 300 мкФ, при начальном напряжении 2,5 кВ).

Оценку влияния ИЭТ на напряженно-деформированное состояние покрытия выполняли на образцах без обработки и после обработки при полном удалении покрытия, сравнивая данные регистрации изменения деформации на противоположной стороне по отношению к покрытию. По результатам измерений обработка образцов пропусанием ИЭТ вызывает снижение уровня регистрируемой тензорезистором деформации и, следо-

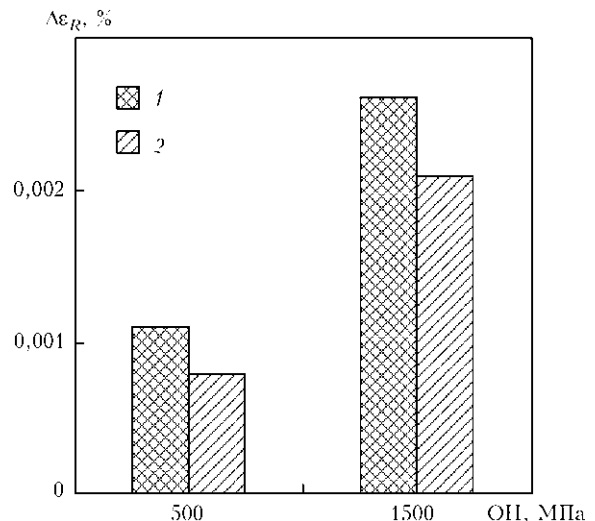


Рис. 6. Изменение деформации в образцах с покрытием после его удаления: 1 — без ИЭТ; 2 — после ИЭТ



вательно, уровня сжимающих ОН в покрытии примерно на 20 % (рис. 6).

Влияние ИЭТ на остаточные напряжения после шлифования. Для исследований использовали полосы из стали 10X18H10T шириной 10 мм и толщиной 2 мм. Полосы крепили винтами к жесткой предварительно шлифованной стальной базе, которую в свою очередь устанавливали на столе плоскошлифовального станка, обеспечивая совпадение направления шлифования с осью полос. На первом этапе выполняли предварительное шлифование полос до толщины 1,9 мм, при этом используя смазочно-охлаждающую жидкость и малую подачу по толщине. На втором этапе подачу смазочно-охлаждающей жидкости перекрывали и за два прохода удаляли слой 0,1 мм при скорости корундового круга 30 м/с. После такого «жесткого» шлифования и снятия с базы полосы имели явно выраженный изгиб — результат действия растягивающих напряжений в слое, прилегающем к шлифованной поверхности (рис. 7). Полосы разрезали на образцы длиной около 70 мм, затем на шлифованную поверхность образцов в центральной части наклеивали тензодатчики.

При обработке ИЭТ образец прижимали токопроводами генератора импульсных токов к плоской поверхности массивной текстолитовой направляющей таким образом, чтобы между токопроводами был участок образца длиной около 40 мм (обрабатываемая часть образца) с тензодатчиком в центральной части. Пропускали один импульс тока с амплитудой 50 кА, при этом прирост температуры составил 110 °С, что существенно ниже температуры, необходимой для снижения ОН при обычной термообработке.

При исследованиях регистрировали начальное сопротивление тензодатчика при свободном (изогнутом) состоянии полосы A_1 , в ее распрямленном состоянии, прижатом к поверхности текстолита A_2 , после обработки ИЭТ (пропускание тока и последующее охлаждение) A_3 и освобожденном состоянии после обработки A_4 . По результатам измерений с учетом калибровочного коэф-

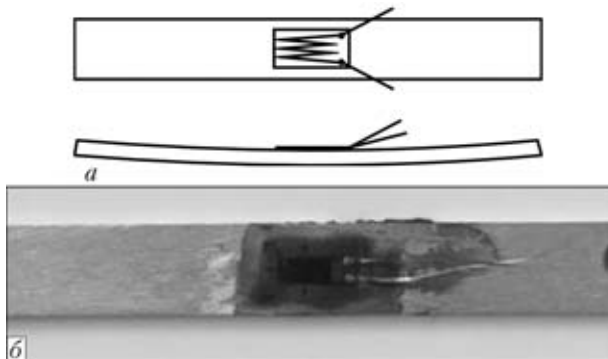


Рис. 7. Схема (а) и внешний вид (б) образца после шлифования

фициента k определяли значение растягивающей деформации, вызванной выпрямлением полосы в исходном состоянии $\epsilon_b = k(A_2 - A_1)$ и после обработки ИЭТ — $\epsilon_b^{ИЭТ} = k(A_3 - A_4)$, а также вызванное обработкой продольное сжатие $\Delta\epsilon = k(A_2 - A_3)$ и уменьшение изгибной деформации в свободном состоянии $\Delta\epsilon_b = \epsilon_b - \epsilon_b^{ИЭТ}$.

С помощью указанных результатов регистрации деформации оценивали влияние ИЭТ на ОН в шлифованном слое. Пластическое сжатие металла в перегретом в результате шлифования слое δ_1 вызывает в нем после остывания растягивающие σ_1 (рис. 8) и сжимающие σ_2 ОН в слое (слое основного металла, незатронутого перегревом). Из условия равенства сил в слоях до и после обработки и совместности деформаций слоев в результате действия ИЭТ можно показать, что изменение напряжения в первом слое равно

$$\sigma_1^{ИЭТ} = [(\delta - \delta_1)/\delta_1]\Delta\epsilon E, \quad (1)$$

где E — модуль упругости.

В то же время уровень напряжений и деформаций в поверхностном слое после закрепления образца на плоской текстолитовой базе пропорционален исходным напряжениям после шлифования. Можно показать, что изменение изгибной деформации, вызванное обработкой ИЭТ, равно $\Delta\epsilon_b = [1 - 3(\delta_1/\delta)]\sigma_1^{ИЭТ}/E$, следовательно,

$$\sigma_1^{ИЭТ} = \frac{\delta}{\delta - 3\delta_1}\Delta\epsilon_b E. \quad (2)$$

Тогда толщина шлифованного слоя δ_1 определяется приравниванием выражений (1) и (2)

$$\frac{\delta}{\delta - 3\delta_1}\Delta\epsilon_b = [(\delta - \delta_1)/\delta_1]\Delta\epsilon$$

и окончательно

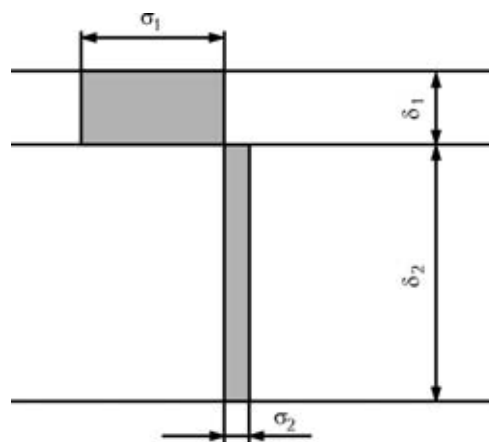


Рис. 8. Схематическое распределение ОН в выравненном после шлифования образце ($\delta_1 + \delta_2 = \delta$)



$$\delta_1 = \frac{\delta}{6} [\xi + 4 - (\xi^2 + 8\xi + 4)^{1/2}], \quad (3)$$

где $\xi = \Delta\epsilon_b / \Delta\epsilon$.

Из данных регистрации для $\Delta\epsilon_b$ и $\Delta\epsilon$ величина ξ может быть определена как $\xi = 0,57576$. При толщине полосы $\delta = 1,8$ мм с использованием уравнения (3) можно определить толщину деформированного слоя $\delta_1 = 0,48$ мм, при этом расчетное снижение ОН в результате пропускания тока через образец, определенное по уравнению (1) или (2), составляет $\sigma_1^{ИЭТ} \approx 40$ МПа.

Выводы

1. Определены режимы обработки, позволяющие существенно повысить предел выносливости ряда металлических материалов при циклическом нагружении.

2. Показано, что данная обработка приводит к существенному перераспределению ОН в сварном шве, покрытии и материале после шлифования, что при применении ее на элементах конструкций позволит повысить их циклическую долговечность.

1. *Доронин Ю. Л.* Исследование возможностей повышения конструкционных и эксплуатационных характеристик деталей летательных аппаратов импульсным воздействием высокоэнергетического электромагнитного поля: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1992. — 18 с.
2. *Влияние* обработки импульсным электрическим током на прочностные и пластические свойства титановых сплавов / О. В. Попов, Д. Ю. Таненберг, С. В. Власенков, А. А. Вепрев // Тез. докл. II Всесоюз. конф. «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов». — Ч.1. — Николаев: РИО Облполиграфиздат, 1990. — 6 с.
3. *Повышение* надежности изделий из среднеуглеродистых сталей импульсным токовым воздействием / С. В. Коновалов, О. И. Соснин, В. Е. Гронов и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2002. — № 3. — С. 19–23.
4. *Труфяков В. И.* Усталость сварных соединений. — Киев: Наук. думка, 1973. — 216 с.
5. *Труфяков В. И., Михеев П. П., Кузьменко А. З.* Влияние масштабного фактора и остаточных сварочных напряжений на скорость распространения усталостных трещин // Пробл. прочности. — 1980. — № 6. — С. 20–22, 30.
6. *Усталость* жаропрочных сплавов и рабочих лопаток ГТД / Б. А. Грязнов, С. С. Городецкий, Ю. С. Налимов и др. — Киев: Наук. думка, 1992. — 264 с.
7. *Степанов Г. В., Бабуцкий А. И., Мамеев И. А.* Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсом электрического тока высокой плотности // Пробл. прочности. — 2004. — № 4. — С. 60–67.
8. *Лоскутов С. В., Левитин В. В.* Влияние электроимпульсной обработки на структуру и долговечность титановых сплавов // Журн. техн. физики. — 2002. — 72. — С. 133–135.

The paper presents experimental data on improvement of cyclic fatigue life of stainless steel and aluminium alloy samples as a result of treatment based on direct passage of electric current through the material. Data of calculation-experimental studies of residual welding stress relaxation under the impact of induced electric current are described.

Поступила в редакцию 15.02.2010

РАЗРАБОТАНО В ИЭС

Высокопроизводительные установки для ЭЛС шестерен и буровых долот



Промышленные установки тактового типа (УЛ-157, АВТО-ЗА3, Мелитополь) применяются для сварки блоков шестерен коробок передач



НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В. А. ЛЕБЕДЕВ, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
И. В. ЛЕНДЕЛ, В. И. ЛЕНДЕЛ, инженеры (Ильницкий завод механического сварочного оборудования),
В. Г. ПИЧАК, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализированы основные направления развития механического сварочного оборудования для изготовления конструкций, производящихся в Украине и за ее пределами указаны основные требования, предъявляемые к ним. Рассмотрены универсальные вращатели, в конструкции которых используется привод нового поколения с компьютеризированным управлением и бесколлекторными электродвигателями, отмечена специфика их работы, приведены преимущества. Представлены способы переустановки роlikоопор роlikового вращателя и указаны некоторые методы устранения дрейфа свариваемого или наплавляемого изделия.

Ключевые слова: сварка, наплавка, резка, рабочее место, организация, оборудование, вращатели, манипуляторы, новые решения

Успешное выполнение работ по сварке, восстановливающей и упрочняющей наплавке, а также резке разных металлоконструкций, обеспечение их качества и производительности работ значительно зависят от организации и комплектования рабочих мест. Большую роль в этом играют различные средства и оборудование, облегчающие работу сварщиков и позволяющие значительно повысить производительность и точность выполняемых работ. Как правило, к этому оборудованию относят средства механизации сварочного производства, в частности, различные типы вращателей, кантователей, колонн для сварочных и наплавочных автоматов.

Целью настоящей работы является обсуждение направлений разработки и производства вспомогательного механического оборудования для сварки и наплавки как в Украине (специализированное предприятие Ильницкий завод механического сварочного оборудования), так и за ее пределами (по материалам выставки 2009 г. в Эссене).

В технической литературе имеются описания различных средств механизации для организации сварочных и наплавочных производств [1, 2], которые являются ориентиром для выбора и конструирования различного оборудования этого типа.

Как и прежде, основным требованием, предъявляемым к механическому вспомогательному сварочному оборудованию, является стабильность вращения изделия, т. е. поддержание сварочной скорости. Большое значение придается плавности вращения изделия (без вибраций, рывков, заеданий и др.), что в первую очередь достигается за счет жес-

ткости станины вращателя, точности изготовления зубчатых передач, наличия минимальных зазоров в посадочных местах, надежности закрепления изделия на планшайбе вращателя.

В последнее время возросли требования к качеству выполняемых работ с использованием механизированных дуговых процессов, реализуемых полуавтоматами и автоматами различной степени технического совершенствования, в том числе с дополнительными движениями (степень автоматизации, наличие слежения за разделкой, устройств для раскладки наплавленных валиков и др.). Все это требует расширения возможностей оборудования для организации современных рабочих мест для сварки, наплавки и резки сталей и сплавов алюминия по следующим направлениям: стабилизация скорости сварки и наплавки, решение задач позиционирования изделия или сварочного инструмента, усовершенствование процессов, связанных с выполнением начала шва и заварки кратера. Большинство из этих задач решается без использования дополнительного оборудования, например, без датчиков положения при позиционировании или организации повторных циклов при широкослойной наплавке и др. При этом оборудование такого типа должно содержать системы программирования и накопления баз данных. Особо актуально стоят задачи энерго- и ресурсосбережения, решаемые путем оптимизации систем управления и регулирования для них, которые обеспечивают оптимальные траектории движения изделия или сварочного инструмента.

Интересным является направление совершенствования рассматриваемого типа оборудования, при котором оно непосредственно связано с режимами работы сварочного оборудования (скорость сварки является функционально зависимой от значения сварочного тока) $v_{св} = f(I_{св})$. Реализация этого направления также требует наличия опре-

деленной базы данных, при этом обеспечивает следующие преимущества:

точную установку и поддержание соответствия энергетических характеристик дуги и сварочного перемещения;

независимость механизированного места для сварки и наплавки от квалификации оператора; качественное выполнение сварки или наплавки с равномерно сформированным валиком, имеющим товарный вид непосредственно после выполнения цикла дугового процесса.

Для осуществления таких возможностей в работе вспомогательного оборудования для сварки и наплавки требуется наличие регулируемых электроприводов рабочего перемещения с достаточно большим диапазоном регулирования и, что весьма важно, высоким быстродействием. При этом основными задачами для механического сварочного оборудования остаются: обеспечение вращения свариваемого (наплавляемого) изделия с заданной скоростью в процессе автоматической или полуавтоматической сварки (наплавки) и установка изделия с маршевой скоростью в удобное для сварки положение.

В настоящее время в системах вспомогательного оборудования используют электроприводы на основе коллекторных и бесколлекторных (как правило, вентильных) электродвигателей постоянного тока с тиристорными или транзисторными регуляторами частоты вращения вала, а также получающих в последнее время распространение асинхронных электродвигателей с частотными регуляторами.

Рассмотрим некоторые типы современного механического сварочного оборудования. На выставке в Эссене это оборудование было представлено различными фирмами-производителями из Гонконга, Тайваня, Китая, а также Германии, Франции, Великобритании, Италии, Швеции, Греции и др.

В качестве привода вращения в механическом сварочном оборудовании ведущих фирм («JAVAC», Германия, «Key Plant», Великобритания, ESAB, Швеция, «Lambert Jouty», Франция и др.) в основном применяют асинхронные двигатели в комплекте со стандартными редукторами или редукторами собственного производства, а также мотор-редукторами (рис. 1). Для регулирования скорости вра-

щения применяют преобразователи частоты асинхронных электродвигателей, выпускаемые разными фирмами.

Фирмы, занимающиеся производством механического сварочного оборудования, на выставке представили также позиционеры, в приводе вращения которых используется вентильный электродвигатель (рис. 2).

Вентильный электродвигатель — это синхронный двигатель, работа которого основана на принципе частотного регулирования с самосинхронизацией. Контроллер вентильного электропривода (рис. 3) регулирует момент, действующий на ротор, и в отличие от щеточного электродвигателя постоянного тока коммутация в вентильном электродвигателе осуществляется и контролируется с помощью электроники.

Вентильные электродвигатели с электронными системами управления часто объединяют лучшие качества бесконтактных двигателей: высокое быстродействие и динамику; точность позиционирования; широкий диапазон изменения частоты вращения; отсутствие узлов, требующих техобслуживания; большую перегрузочную способность по моменту; высокие энергетические показатели ($\text{КПД} > 90\%$, $\cos \varphi > 0,95$); большой срок службы, высокую надежность и повышенный ресурс работы в результате отсутствия скользящих электрических контактов; низкий нагрев электродвигателя при работе в режимах с возможными перегрузками.

Отечественный производитель различного механического вспомогательного сварочного оборудования — Ильницкий завод механического сварочного оборудования (ИЗМСО) большое внимание уделяет разным приводам вращения. Начиная с 2001 г. предприятие в течение двух лет перешло на использование преобразователей частоты вращения асинхронных электродвигателей в конструкции позиционеров (рис. 4). В качестве асинхронных электроприводов используют зарубежные разработки, в частности, электропривод фирмы «General Electric» (модель VAT-200).

ИЗМСО работает над внедрением электроприводов нового поколения — вентильного типа. В начале 2009 г. был создан ряд экспериментальных позиционеров на базе отечественных вентильных



Рис. 1. Универсальные позиционеры, в приводе вращения которых используется асинхронный электродвигатель

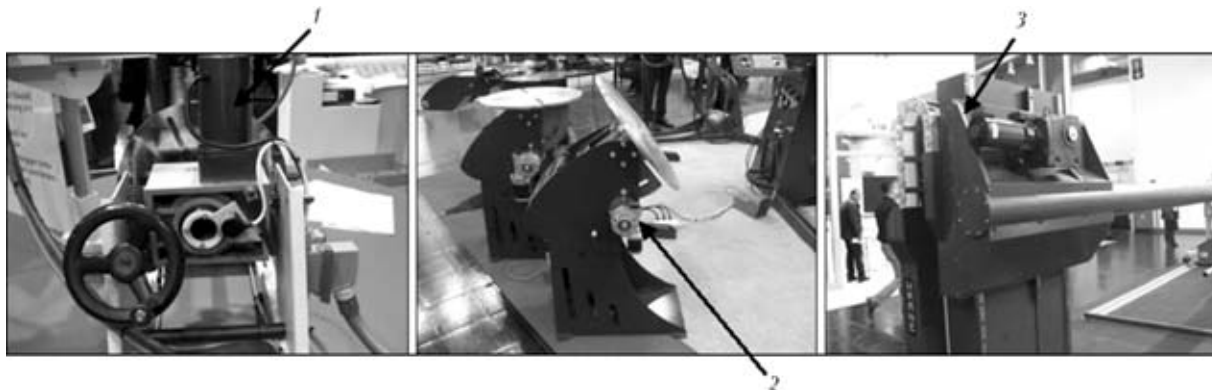


Рис. 2. Универсальные позиционеры с вентильными электродвигателями (1–3)



Рис. 3. Блок управления вентильного электродвигателя

электроприводов. Сегодня ИЗМСО готов к промышленному выпуску позиционеров с электроприводами нового поколения (рис. 5), которые позволят программировать некоторые элементы вращения изделия как по скорости вращения, так и по углу поворота изделия. Кроме того, при всех одинаковых характеристиках габаритные размеры и масса вентильных электроприводов меньше, чем у электроприводов с асинхронным электродвигателем. Сравнительные технические характеристики этих вращателей с регулируемыми электроприводами на основе асинхронных и вентильных электродвигателей представлены в таблице.

Существует большое разнообразие роликовых вращателей (рис. 6), требования к которым относительно скорости вращения, точности уста-



Рис. 4. Универсальные позиционеры производства ИЗМСО

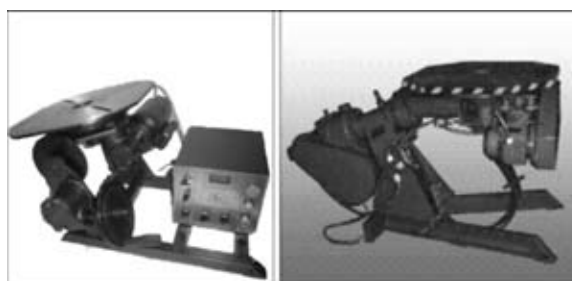


Рис. 5. Новые модели позиционеров ИЗМСО на базе приводов с вентильными электродвигателями

новки роликов относительно оси изделия, быстроты переустановки роликов на требуемый диаметр изделия остаются те же. При неточном расположении оси роликов относительно оси вращения изделия наблюдается такое явление, как смещение свариваемого изделия вдоль его оси (дрейф), что, в свою очередь, приводит к уходу сварного шва с места сварки. Смещение зависит от диаметра изделия и угла непараллельности осей изделия и роликов. Различные фирмы реша-



Рис. 6. Роликовые вращатели с различными компоновочными схемами приводов

Сравнительные технические характеристики вращателей с регулируемыми электроприводами на основе асинхронных и вентильных электродвигателей

Параметр	SPS 150-150S (рис. 1)	PRO 1 (рис. 2)	M211080 (рис. 4)
Максимальная грузоподъемность, кг	125	120	125
Частота вращения планшайбы, мин ⁻¹	0,5...9,0	0,5...5,0	0,16...5,0
Угол наклона планшайбы, град	0...180	0...90	0...135
Диаметр планшайбы, мм	500	350	450
Номинальный сварочный ток (ПВ=100%), А	500	300	500
Напряжение сети, В/частота, Гц	230/50	230/50	230/50
Установка наклона	Вручную		
Габаритные размеры (L×B×H), мм	1050×880×1080	480×325×470	850×695×400
Масса, кг, не более	100	50	75



Рис. 7. Упорный ролик



Рис. 8. Рабочий орган следящей системы, смонтированный на сварочной головке

ют эту проблему по-разному. Так, фирма «Lambert Jouty» устанавливает следящую систему по смещению изделия и в зависимости от этого значения система в автоматическом режиме дает сигнал на привод доворота осей ролика.

ИЗМСО решает эту проблему путем установки механических вращающихся упоров (рис. 7), а также перемещения рабочего органа (слежение за швом) сварочной головки с помощью следящей системы (рис. 8).

Для переустановки роликоопор, секции роликового вращателя в требуемое положение существует несколько способов, но из представленных на выставке можно выделить следующие:

с помощью передачи винт-гайка. Он дает возможность одновременно перемещать две роликоопоры и устранять небольшие перепады высоты между секциями роликоопор;

с помощью упоров разных конструкций, при этом наиболее распространенными являются фиксация роликоопор по отверстиям и перемещение

роликоопор — способ более быстрый, но трудоемкий.

В дальнейшем будет активно продолжаться внедрение нового поколения электроприводов, поскольку они имеют ряд преимуществ — возможность уменьшения энергозатрат и расширения возможности механического вспомогательного оборудования, а также значительное улучшение качества выпускаемых изделий. Получат также развитие новые системы регулирования с обратными связями по параметрам сварочного оборудования.

1. Евстифеев Г. А., Веретенников И. С. Средства механизации сварочного производства: конструирование и расчет. — М.: Машиностроение, 1977. — 96 с.
2. Куркин С. Л., Ховов В. М., Рыбачук А. М. Технология, механизация и автоматизация производства сварных конструкций: Атлас: Уч. пособие. — М.: Машиностроение, 1989. — 328 с.

Main trends in development of mechanised welding equipment are reviewed on the basis of analysis of structures fabricated in and outside Ukraine, and basic requirements to them are indicated. Versatile spinners comprising a new generation of drives with computer numerical control and commutatorless motors are analysed, specific features of their operation are considered, and advantages are noted. Also, the article analyses methods for reinstalling carrying rollers in the roller spinner, and considers some methods for elimination of drift of a workpiece in welding or surfacing.

Поступила в редакцию 29.03.2010



ОБРАБОТКА ТРЕХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ ПРОГРАММИРОВАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ

П. ЗАЙФФАРТ, Р. ГЕДЕ («Инжинертекник унд Maschinenbau ГмбХ», г. Росток, Германия)

Гибкий способ обработки изображений для сварочных роботов, разработанный компанией ИМГ и используемый судостроительной компанией «ВАДАН ярд МТВ», позволяет быстро получать систему программирования робота. Она обеспечивает точность установки робота после согласования системы обработки изображений и системы программирования робота до $\pm 0,5$ мм.

Ключевые слова: роботизированная сварка, угловое соединение, обработка изображений, программирование робота, сварка микропанелей, сварка в судостроении

Основными деталями при строительстве судов являются плоские и искривленные панели размером до 20×40 м и более, а также микропанели различных форм и размеров от 2×2 до 4×16 м. В контейнеровозе среднего размера, рассчитанном на 2000 контейнеров, приходится около 2500 или более различных микропанелей. Для изготовления микропанелей, состоящих из пластин и ребер жесткости, используют различные технологии. На судовой верфи для монтажа и сварки микропанелей применяют роботы (рис. 1, 2). Ввиду наличия множества различных типов конструкций микропанелей существует необходимость в программировании многофункциональных роботизированных систем, которые осуществляют перемещение роботов в трехмерных координатах при использовании различных параметров режима сварки. В судостроении при изготовлении каждой микропанели применяют определенную программу сварки. Для всех известных методик программирования робота требуется либо дополнительная информация об изделии в виде данных автома-

тизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), либо работа в интерактивном режиме. Классическое программирование сварочных роботов, используемых при изготовлении микропанелей, выполняется независимо от реально существующего изделия и схемы производства, используя данные АСУ ТП в сочетании со сложными операциями, которые осуществляют в интерактивном режиме. Программирование выполняют задолго до начала производства, при этом требуется наличие точных данных об их конструкции. К сожалению, при производственном потоке невозможно учесть все изменения в конструкции, а следовательно, и в цифровых данных о ней.

Для достижения высокой степени точности при автоматизированном программировании роботов на линии по производству микропанелей (рис. 1, 2) предприятие «Инжинертекник унд Maschinenbau ГмбХ» в сотрудничестве с компаниями АвиКОМ и ТСВЕ сконструировало, разработало и внедрило в производство быстродействующую систему обработки трехмерных изображений. На рис. 3 представлена схема системы обработки трехмерных изображений, а на рис. 4 — схема модулей управления этой системой.



Рис. 1. Монтажный портал для ребер жесткости на линии по производству микропанелей

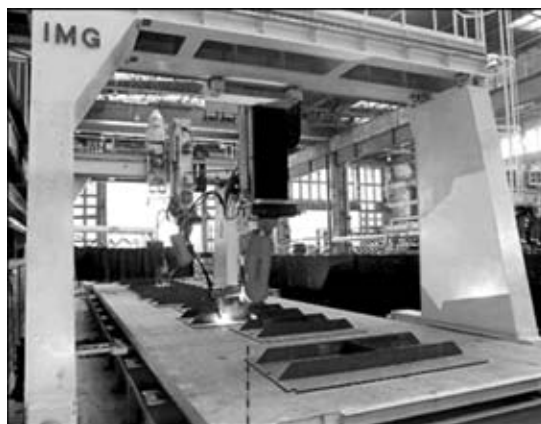


Рис. 2. Сварочный пост на линии по производству микропанелей, использующий два робота (до переоснащения линии)

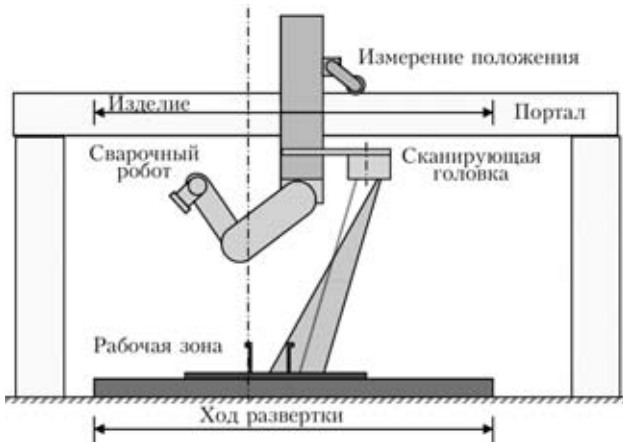


Рис. 3. Схема системы обработки трехмерных изображений при программировании робота

Основной частью новой промышленной измерительной системы с трехкоординатным сканером является камерная сканирующая головка, созданная по современной технологии, которая измеряет трехмерные данные в соответствии с принципом лазерной триангуляции. Для измерения трехмерной формы используют внешний линейный лазерный источник. Лазерный генератор, установленный на роботе, проецирует лазерную линию на рабочую зону с расстояния около 2 м по высоте. Камера, направленная на эту линию под углом, фиксирует кривую, которая повторяет профиль объекта по высоте. Таким образом, измерив отклонения лазерной линии от воображаемой прямой контрольной линии, можно вычислить высоту объекта.

Сканирующая головка робота перемещается вдоль рабочей зоны, при этом образуются срезы контура объекта. Их совокупность (или трехмерных профилей) дает полное представление о форме объекта. Уникальная технология с использованием камеры позволяет определить положение лазерной линии и получить информацию об изображении объекта в координатах лазерной головки, которые затем передают на персональный компьютер (ПК). Операции по получению трехмерных изображений система выполняет очень быстро и точно.

В камере сканирующей головки применяют несколько различных способов создания трехмерных профилей, которые отличаются скоростью и разрешением по высоте. Гибкость камеры используется для оптимизации результатов конкретной задачи сканирования.

При измерении деталей, скрытых для поля зрения камеры, существуют два типа ограничений: перекрытие камеры, если лазерная линия закрыта от камеры объектом, и перекрытие лазера, если лазер не мо-

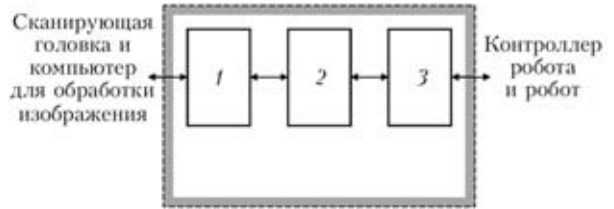


Рис. 4. Схема модулей управления системы обработки изображений при программировании робота: 1 — математическое обеспечение для обработки изображений; 2 — система программирования в неавтономном режиме; 3 — макроуправление сервером управления

жет соответствующим образом осветить части объекта из-за угла его проекции. Путем регулировки углов сканирующей головки и лазера перекрытие можно уменьшить. Кроме того, используются две сканирующие головки с двумя лазерными источниками, освещающими микропанели (и особенно профили) с противоположных сторон.

Трехмерное поле зрения измерительной системы представляет собой трапециевидный участок, на котором лазерная линия пересекает поле зрения камеры. Только на этом участке камера осуществляет трехмерное изображение. Поле обзора камеры задается с помощью выбора параметров линзы и математического обеспечения. Разрешение измерений по высоте зависит от угла между лазером и камерой (по мере его увеличения разрешение возрастает) и выбранного трехмерного способа измерения. Если алгоритм определения профиля имеет высокую точность, то максимальная скорость определения профиля будет ограничена по сравнению с менее точным, но более быстродействующим алгоритмом.

Максимальная скорость определения профиля зависит от сочетания выбранного трехмерного способа измерения, требуемых разрешения и высоты измеренного участка. Скорость определения профиля может быть увеличена путем уменьшения, например, длины участка, используемого для контроля объекта по высоте. Однако следует отметить, что скорость определения профиля зависит также от количества света, отраженного от объекта.

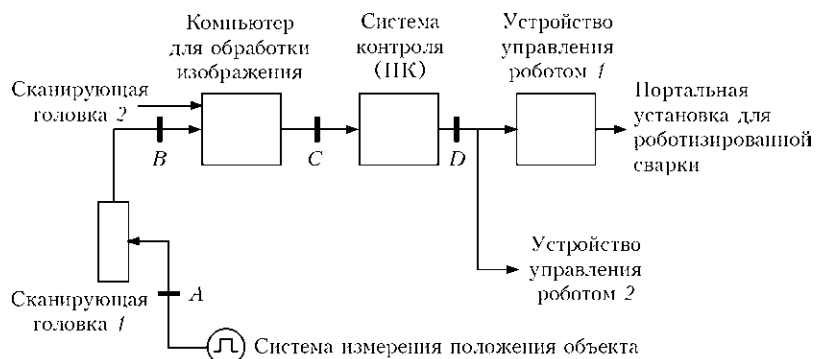


Рис. 5. Схема обработки данных для двух роботов (от сканирующей головки до сварочного робота)

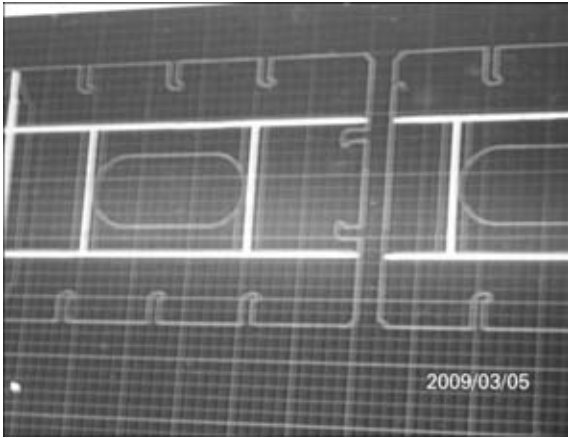


Рис. 6. Микропанель на экране ПК для дальнейшей обработки данных на более высоком уровне

Поток данных о профилях синхронизируют с движением робота с помощью внешнего кодировщика. При этом результаты измерения длины объекта и его масштаб в направлении движения будут правильными даже при изменении скорости движения объекта (рис. 5).

Все параметры оптимизированы для сканирования микропанелей в производственных условиях. Скорость сканирования равна 0,5 м/с и не зависит от условий освещения. Разрешение трехмерных точек составляет около 1 мм по x и y и 2 мм по z . Следует учесть, что разрешение в пределах поля зрения отличается в зависимости от высоты точек. Диапазон измерения по z составляет 400 мм.

Путем расчета определены общее время сканирования, а также время, необходимое для сканирования и обработки данных. Хотя скорость сканирования могла быть и выше (до 1 м/с), время этого процесса можно сократить за счет обработки данных параллельно со сканированием.

Сканирование осуществляют полосами шириной 1,2 м и длиной 16,0 м в обратном порядке относительно движения вперед и назад. Вся рабочая зона состоит максимально из четырех полос для каждой сканирующей головки.

Flexible image processing for welding robots developed by IMG Company and used by WADAN Yards MTV Shipbuilding Company allows quickly generating the robot programming system. The accuracy of the robot positioning is $\pm 0,5$ mm after the shake hand process between the image processing system and programming system.

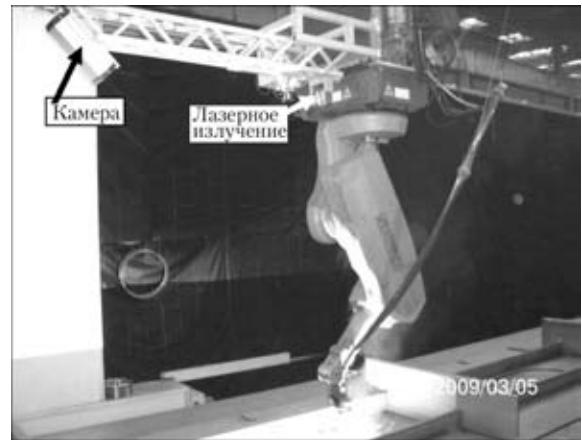


Рис. 7. Внешний вид робота с системой автоматизированного программирования путем обработки изображений, используемого для выполнения работ на судовой верфи

Данные об измеренных трехмерных точках в плоскости лазера обрабатывают с помощью сложных математических алгоритмов для вычисления их реальных координат в основном в ходе процесса сканирования параллельно вводу трехмерных точек. Кроме того, из полученных данных выделяют информацию о форме объекта (плоскостях панели, плоскостях и контурах профиля). Вся рабочая область сканируется приблизительно за 3,5 мин. При этом уже имеется информация о форме объекта для обработки на высоком уровне с целью определения его окончательной геометрической формы (рис. 6).

На рис. 7 показана сканирующая консоль с двумя лазерными источниками и камерой, закрепленной на переоснащенном роботе.

Описанная система позволяет создать быстродействующую и гибкую производственную систему для микропанелей без какой-либо связи с центральной компьютеризированной системой судовой верфи. Эта автономная система является независимой, гибкой и имеет высокую производительность.

Поступила в редакцию 14.01.2010

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ СВАРКЕ И НАПЛАВКЕ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ ПОД ФЛЮСОМ

В. Н. КОЛЕДА, инж., **В. М. ИЛЮШЕНКО**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты оценки влияния комбинированной защиты на газонасыщенность металла на стадии капли и ванны при сварке и наплавке меди и ее сплавов. Оптимизированы параметры процесса сварки и наплавки под флюсом при использовании дополнительной газовой защиты. Разработан новый способ импульсной подачи защитного газа в зону дуги при сварке и наплавке под флюсом.

Ключевые слова: дуговая сварка, наплавка под флюсом, медь и сплавы меди, газовая защита, водород, предупреждение пористости

Автоматическая сварка и наплавка под флюсом меди и ее сплавов является одним из перспективных способов изготовления как элементов металлургического оборудования, так и получения биметаллических изделий медь–бронза, сталь–бронза [1–4].

В настоящее время для сварки и наплавки меди и медных сплавов применяют плавные флюсы АН-60, АН-20П, АН-26П, АН-348-А, ОСЦ-45 и др., разработанные для сварки сталей. Однако даже при соблюдении всех технологических рекомендаций (прокалка флюсов, механическая очистка, обезжиривание проволоки и основного металла) они не всегда обеспечивают требуемую плотность металла. Известно, что эффективной мерой предупреждения пористости является снижение парциального давления водорода в атмосфере дуги. Это может быть достигнуто за счет как связывания его в соединения, так и добавления в атмосферу дуги других газов [5, 6].

В настоящей работе оценивали влияние дополнительной газовой защиты на газонасыщенность металла на стадии капли и ванны, качество сварных швов меди, меди со сталью и наплавки медных сплавов на сталь и медь.

Для выбора оптимальной схемы подачи газа в зону дуги были опробованы два способа — через медное сопло и через расположенную горизонтально медную трубку. В качестве дополнительной защиты использовали азот (расход 300...700 л/ч), который подавали в непрерывном режиме. При подаче защитного газа первым способом изменяли диаметр сопла (от 10 до 20 мм) и расстояние от его торца до основного металла (от 10 до 30 мм), при втором способе — диаметр трубки (от 3 до 10 мм), угол наклона (от 0 до 30°) к горизонту,

расстояние от выходного отверстия до электрода (от 10 до 30 мм), до основного металла (от 5 до 15 мм). Наружные поры определяли визуально. Наличие и характер расположения внутренних дефектов изучали на макро- и микрошлифах. Склонность наплавленного металла к пористости оценивали по количеству плотных валиков.

Как показали проведенные эксперименты, при подаче защитного газа через сопло положительный эффект достигался только тогда, когда нижний край сопла находился в расплавленном шлаке и создавались благоприятные условия для попадания защитного газа в зону дуги. Однако это приводит к шунтированию сварочного тока, нарушению стабильности процесса и ухудшению формирования валика.

При подаче защитного газа через газопроводную медную трубку наилучшие результаты получены тогда, когда она располагалась перед дугой или сбоку под углом не более 5...10° к горизонту, причем ее конец находился в расплавленном шлаке. Оптимальный диаметр трубки составлял 4...6 мм. При выборе наиболее эффективной защитной среды опробовали азот, аргон и углекислый газ.

С целью изучения механизма влияния дополнительной газовой защиты на пористость определяли газонасыщенность металла на стадиях капли и ванны. Для этого определяли содержание водорода в каплях электродного металла, остающихся на концах электрода после прекращения сварки, и в «карандашных пробах», которые отбирали путем слива металла ванны через отверстие в образце. Жидкий металл попадал в разборной медный кристаллизатор диаметром внутреннего отверстия 10 мм. Фиксация растворенных в жидком металле газов происходит в результате высокой скорости кристаллизации проб. Образцы, изготовленные из «карандашных проб», и капли электродного металла анализировали на приборе

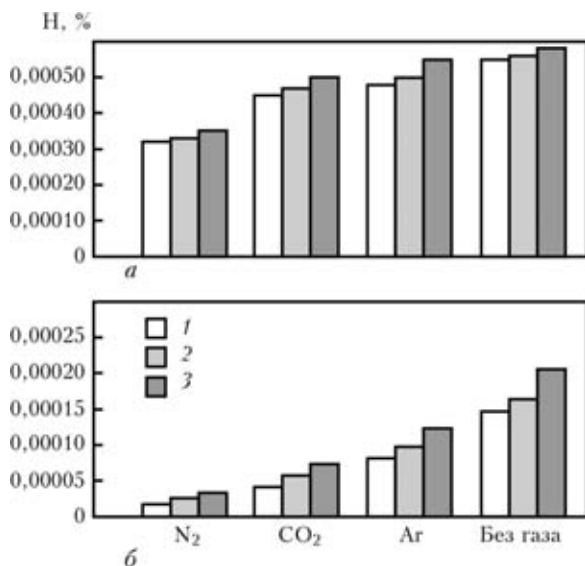


Рис. 1. Влияние защитного газа на содержание водорода в каплях электродного металла (а) и металла сварочной ванны (б): 1 — проволока марки БрАМц9-2; 2 — БрХ07; 3 — МНЖКТ5-1-0,2-0,2

РН-2 фирмы «LECO» с целью определения в них содержания остаточного водорода. Наплавку проводили проволокой марки БрАМц9-2 под флюсом АН-26П на пластины из бронзы марки БрАМц9-2 толщиной 10 мм. При сварке меди толщиной 10 мм использовали проволоку марки БрХ07 и флюс АН-348А, меди со сталью толщиной 10 мм — проволоку марки МНЖКТ5-1-0,2-0,2 и флюс АН-60. Расход аргона, азота и углекислого газа составлял 500 л/ч. Газ подавали в непрерывном режиме через медную трубку диаметром 5 мм, установленную перед дугой под углом 10° к горизонту. Расстояние от выходного отверстия до электрода составляло 12 мм, а до поверхности образцов — 7 мм.

Установлено, что применение дополнительной газовой защиты позволяет уменьшить насыщение жидкого металла водородом на стадии капли и ванны (рис. 1), что обуславливает снижение пористости швов и наплавов.

В швах и наплавках, выполненных с дополнительной газовой защитой, пористость отсутствовала во всех случаях. Без применения дополнительной

газовой защиты при сварке меди и меди со сталью в швах наблюдали отдельные поры, а при наплавке бронзы — значительную пористость.

Из рис. 1 видно, что содержание водорода в жидкой ванне значительно ниже, чем в каплях электродного металла, что, по-видимому, обусловлено частичной дегазацией ванны.

Для изучения влияния дополнительной газовой защиты на пористость наплавленного металла применили методику многослойной наплавки, когда в каждом следующем валике склонность наплавленного металла к пористости увеличивается. Наплавки проводили проволокой марки БрАМц9-2 под флюсом АН-26П на медные и стальные образцы толщиной 15 мм. Медную трубку диаметром 5 мм устанавливали на расстоянии 10 мм от электрода перед дугой. Угол наклона к горизонту составлял 5°, а расстояние от выходного отверстия до поверхности образцов — 5 мм. В качестве дополнительной защиты использовали аргон, азот и углекислый газ, которые подавали в непрерывном режиме, изменяя расход от 100 до 900 л/ч. Данные о влиянии дополнительной газовой защиты на пористость наплавленного металла приведены на рис. 2.

Как показали проведенные эксперименты, с увеличением расхода газа стойкость наплавленного металла против образования пор возрастала. Однако при расходе более 800 л/ч наблюдаются разрывы шлакового пузыря, что приводит к нарушению стабильности процесса горения дуги, повышенному разбрызгиванию металла и ухудшению формирования валиков. При расходах менее 200 л/ч не обеспечивается равномерная подача газа из-за залипания трубки шлаком.

Наилучшая плотность наплавленного металла достигается при использовании в качестве дополнительной защиты углекислого газа, который не только разбавляет атмосферу дуги, но и, имея окислительную способность, дополнительно связывает водород.

Большую эффективность азота в качестве защитного газа по сравнению с аргоном, по-видимому, с одной стороны, можно объяснить содержанием в техническом азоте примесей кислорода

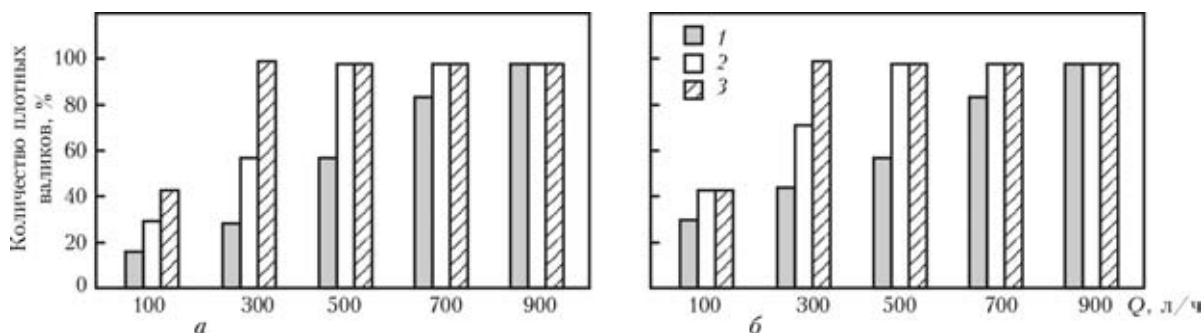


Рис. 2. Влияние состава газов и их расхода на стойкость против пористости при наплавке бронзы БрАМц9-2 под флюсом АН-26П на медь (а) и сталь (б): 1 — Ar; 2 — N₂; 3 — CO₂

(от 0,5 до 5 %), который связывает водород, а с другой, — лучшими условиями дегазации сварочной ванны. При этом возможно выделение пузырьков азота, которые могут служить зародышами пор и приводить к пористости при более низких содержаниях водорода в жидком металле.

С целью уменьшения расхода защитного газа проводили сравнительные опыты по подаче защитного газа в импульсном и непрерывном режимах. В опытах изменяли угол наклона газопровода от 0 до 15°, расстояние от выходного отверстия газопровода до основного металла от 3 до 9 мм, частоту импульсов от 0 до 1,5 Гц, расход защитного газа от 250 до 800 л/ч.

Опробование способа подачи защитного газа через медную трубку в импульсном режиме показало, что при определенных параметрах импульсной подачи можно достичь значительного уменьшения расхода защитных газов, улучшения стабильности процессов сварки и наплавки при гарантированном отсутствии пор в швах и наплавленном металле.

На основании проведенных экспериментов разработан способ подачи защитного газа в зону дуги в импульсном режиме, схематически изображенный на рис. 3. На границе плавления флюса 1 размещают газопровод 2, выполненный в виде трубки. Газ в зону сварки можно подавать как в постоянном, так и в импульсном режиме через устройство 3.

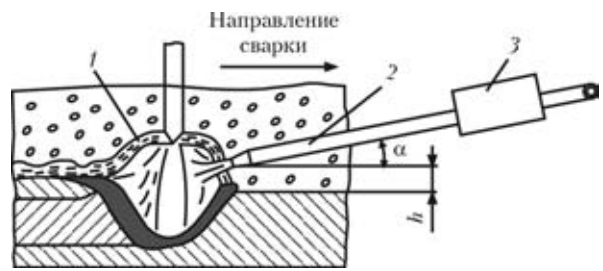


Рис. 3. Схема способа подачи защитного газа (обозначения см. в тексте)

Выходной диаметр газопровода выбирают в пределах одного диаметра электрода и размещают на расстоянии 5...7 мм от поверхности свариваемой детали, а газопровод устанавливают под углом 5...10° к горизонтальной плоскости. Продолжительность импульса подачи газа устанавливают в размере 40...60 % длительности выбранного периода подачи газа. Увеличение или уменьшение угла наклона газопровода к горизонтальной плоскости приводит к ухудшению формирования шва, разбрызгиванию металла при сварке и наплавке, образованию наплыва, нарушению стабильности процесса сварки и наплавки, а также появлению пористости в швах и наплавленном металле. При установке расстояния от выходного отверстия газопровода до поверхности свариваемой детали менее 5 мм возможны случаи зацепления его за поверхность металла, а при увеличении этого расстояния более 7 мм струя за-

Влияние параметров подачи защитного газа и технологических факторов на качество швов

Частота импульсов f , Гц	Угол наклона газопровода α , град	Высота газопровода над основным металлом, мм	Расход защитного газа Q , л/ч	Качество		Наличие пор
				стабильности процесса	формирования валика	
0,50	5	5	250	Уд.	Уд.	Поры
0,75	7	5	250	Хор.	Хор.	Пор нет
1,00	5	6	250	Отл.	Отл.	»
1,25	5	7	250	»	Хор.	»
1,50	5	5	250	»	»	Отдельные поры
1,00	0	5	250	Уд.	Неуд.	Пор нет
1,00	10	5	250	Хор.	Хор.	»
1,00	15	5	250	Уд.	Уд.	Отдельные поры
1,00	7	3	250	Неуд.	Неуд.	Поры
1,00	7	9	250	Хор.	Уд.	»
—	5	5	250	Отл.	Отл.	»
—	5	5	300	»	»	»
—	5	5	400	»	»	»
—	5	5	500	»	»	»
—	5	5	600	»	»	Отдельные поры
—	5	5	700	»	»	»
—	5	5	800	»	»	Пор нет



щитного газа может распространяться во флюсе над расплавленной пленкой шлака. При этом парциальное давление водорода не снижается, что приводит к появлению пористости в наплавляемом металле. Частоту пульсации газа устанавливают в пределах 0,75...1,25 Гц. Уменьшение частоты импульсов приводит к появлению пористости в наплавляемом металле, а увеличение частоты — практически к непрерывной подаче газа и увеличению его расхода. Уменьшение или увеличение соотношения длительности импульса к длительности всего периода пульсации от 40...60 % приводит к пористости в наплавляемом металле шва.

Экспериментальные данные обобщены в таблице, в которой приведены результаты наплавки бронзовой проволокой БрАМц 9-2 диаметром 4 мм на образцы из меди марки М1 под флюсом АН-26П при различных расходах защитного газа аргона.

При пульсирующей подаче защитного газа достигается периодический разрыв пленки расплавленного флюса и газ, беспрепятственно проходя в зону дуги, снижает в ней парциальное давление водорода, оказывая динамическое воздействие на расплавленный металл и облегчая тем самым выход растворенного в нем водорода.

Как видно из таблицы, соблюдение указанных выше оптимальных параметров импульсной подачи газа через медную трубку позволяет получать стабильный процесс наплавки, плотные валики с хорошим формированием при более низких расходах защитного газа по сравнению с его подачей в постоянном режиме.

Широкое опробование данного способа при сварке меди и меди со сталью, многослойной наплавке на медь и сталь бронз типа БрАМц9-2, БрКМц-3-1 под флюсами марок АН-26П, АН-20П, АН-60, АН-348-А, ОСЦ-45 показало, что применение комбинированной защиты во всех случаях обеспечивает получение плотных швов и наплавленного металла.

Способ комбинированной защиты прошел промышленную апробацию при сварке меди со сталью под флюсом применительно к изготовлению доменных фурм с толщиной свариваемых кромок 5...10 мм, а также при наплавке бронзы на сталь под флюсом на кольцевые поверхности с целью повышения работоспособности и служебных характеристик биметаллических изделий, что позволяет рекомендовать его для промышленного внедрения.

1. *Гуревич С. М.* Справочник по сварке цветных металлов. — Киев: Наук. думка, 1990. — 510 с.
2. *Патон Б. Е.* Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
3. *Машиностроение.* Энциклопедия. Т. 4. — Сварка цветных металлов и сплавов / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 2006. — 767 с.
4. *Monnean Ph.* Les liaisons du cuivre // Vide Sei, techn. et appl. — 2000. — 55, № 296. — S. 147–158.
5. *Сварка под газонасыщенным флюсом* / В. В. Подгаецкий, С. М. Мендельберг, В. С. Бендер и др. // Автомат. сварка. — 1973. — № 6. — С. 28–31.
6. *Илюшенко В. М., Босак Л. К.* Влияние степени окисленности флюса на пористость при сварке меди // Там же. — 1984. — № 4. — С. 67–68.

The paper presents the results of evaluation of the influence of combined shielding on metal gas saturation at the stage of the drop and the pool in welding and surfacing of copper and its alloys. Parameters of the process of gas-shielded welding and surfacing when using additional gas shielding were optimized. A new method of pulsed feed of shielding gas into the arc zone in submerged-arc welding and surfacing was developed.

Поступила в редакцию 04.06.2010

ПОЛУВЕКОВОЙ ЮБИЛЕЙ ПЕРВОЙ ВЫСТАВКИ ДОСТИЖЕНИЙ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А. Н. КОРНИЕНКО, д-р ист. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

50 лет назад (с 12 июля по 3 октября 1960 г.) в Москве на ВДНХ в павильоне «Машиностроение» на площади свыше 6 тыс. м² состоялась выставка «Внедрение передовой сварочной техники в народное хозяйство СССР», на которой было представлено более тысячи экспонатов (натурных образцов, макетов и плакатов). По масштабам демонстрации развития сварочного производства в отдельной стране экспозиция не имела себе равных. К тому времени в Советском Союзе не только успешно применяли известные в мире способы сварки и родственных технологий, но и был создан ряд принципиально новых способов соединения. Поэтому можно считать, что в экспозиции освещался мировой уровень сварочной техники на конец первой половины XX века. Именно в течение этого периода сварка стала наиболее широко используемой технологией при выполнении неразъемных соединений. В 1930-х годах сварочное производство внесло значительный вклад в индустриализацию в СССР. В США и ряде других капиталистических стран несмотря на депрессию и замедление темпов экономического развития сварка также продолжала вытеснять клепку в машиностроении, промышленном строительстве. В те годы закладывались научные основы сварки. В частности, под руководством Е. О. Патона были разработаны методы расчета и проектирования узлов сварных конструкций, исследована прочность сварных образцов, созданы высококачественные электроды для ручной дуговой сварки, завершена разработка и начато внедрение на заводах СССР высокопроизводительного способа автоматической сварки под флюсом. В годы Великой Отечественной войны в эвакуации на Урале специалисты Института электросварки впервые в мире разработали автоматическую сварку под флюсом броневых сталей, экспериментально доказали наличие дугового разряда под флюсом, на основе открытия саморегулирования дуговых процессов создали новые конструкции сварочных головок, спроектировали и смонтировали десятки установок для

сварки узлов танков, авиабомб. В других странах, как и в СССР, внедрение сварки ускорило производство вооружения, транспортных средств, строительство и восстановление металлических конструкций.

В послевоенный период темпы развития сварки сохранились. Институт электросварки под руководством Е. О. Патона приступил к конверсии дуговой сварки под флюсом. Еще в 1944 г. начались работы по механизации сварочных работ на монтаже, расширению применения автоматической сварки в разных областях гражданского производства, была предложена двухдуговая сварка на высоких скоростях, мобильные сварочные тракторы-автоматы, шланговые полуавтоматы и др. В этот период Е. О. Патон заложил основы объединения теоретических и экспериментальных исследований с прикладными разработками, которая привела к возникновению исследований принципиально нового класса — целенаправленных фундаментальных.

Работы, выполненные в Институте электросварки им. Е. О. Патона, способствовали ускорению восстановления разрушенной промышленности страны, прежде всего металлургии и топливно-энергетического комплекса. Были разработаны технологии производства труб и строительства трубопроводов, крупноблочного строительства судов, производства и ремонта железнодоро-





рожного транспорта и др. Впервые в мире была осуществлена автоматическая сварка под флюсом вертикальных швов, внедренная в строительство домен, мостов и других конструкций, создано производство резервуаров из плоских полотнищ, разработаны сборочно-сварочные автоматы для изготовления шахтных вагонеток, стоячков, шахтерских ламп и др. Выдающимся достижением ИЭС им. Е. О. Патона, отмеченным Гран-при на Всемирной выставке в Брюсселе (1958), является создание электрошлаковой сварки — технологии соединения металлов (сталей, алюминия, меди, титана и их сплавов) неограниченной толщины. На основе этой технологии были разработаны электрошлаковая наплавка и переплав. Мировым достижением стала разработка в ИЭС им. Е. О. Патона кольцевого трансформатора для контактной сварки в полевых условиях рельсов, стыков труб, в том числе магистральных трубопроводов большого диаметра. В конце 1940-х годов ЦНИИТ-МАаш, ИЭС им. Е. О. Патона, НИАТ, ИМЕТ и рядом других организаций впервые в мире была создана дуговая сварка в углекислом газе, внедрение которой позволило в значительной мере механизировать сварочное производство стальных конструкций. Для изготовления ответственных изделий из цветных металлов разрабатывали дуговую сварку в аргоне, плазменную, ультразвуковую, трением, электронно-лучевую, диффузионную, сварку труб дугой, вращающейся в магнитном поле, и др. Новые технологические возможности газоплазменной обработки, в частности, резки, были достигнуты благодаря работам таких организаций, как ВНИИАВТОГЕН и ВНИ-ИЭСО.

Следует отметить, что организации выставки предшествовало рассмотрение руководством СССР состояния сварочного производства и науки. 5 июня 1958 г. Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О дальнейшем внедрении в производство сварочной техники» были намечены

основные направления развития сварки в СССР на семь лет. Впервые сварка признавалась самостоятельным видом производства, устанавливалось государственное планирование производства сварных конструкций и уровня механизации сварочных работ. 23–24 февраля 1959 г. в Киеве под председательством Б. Е. Патона состоялось первое заседание Совета по координации научно-исследовательских работ в области сварки, в состав которого вошли 70 ведущих специалистов страны по сварке — ученых и руководителей производства. Было организовано 15 комиссий по отдельным вопросам сварочной науки и техники, которые начали вести самостоя-

тельную оперативную работу по координации. Июньский пленум ЦК КПСС 1959 г. намечил создание специализированных сварочных заводов в различных регионах страны. 13 июля 1960 г. на очередном пленуме с докладом «Сварка, ее значение в промышленности и строительстве и перспективы дальнейшего развития» выступил Б. Е. Патон. Выставка послужила наглядной иллюстрацией доклада, сделанного от имени всех сварщиков страны. Она состояла из следующих разделов: вводного, сварных конструкций, автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом, сварки в защитных газах, источников питания для дуговой сварки, наплавки, электрошлаковой сварки, контактной сварки, новейших способов сварки и резки, сварочных материалов, газоплазменной обработки, механизации сборочно-сварочных работ, контроля сварных соединений и сварочных материалов. Достижения демонстрировали предприятия 43 советов народного хозяйства всех регионов страны, 18 министерств, ведомств и комитетов, 22 научных и научно-исследовательских, конструкторских и технологических организаций. На выставке можно было ознакомиться с новейшими технологическими процессами, оборудованием, рациональными сварными конструкциями, автоматизацией и механизацией сборочно-сварочных, наплавочных и других работ.

В разделе «Сварные конструкции» на примере подкрановой балки Челябинского завода металлоконструкций были показаны преимущества сварки по сравнению с клепкой. В экспозиции был представлен макет двухъярусного стенда для изготовления плоских полотнищ, сворачиваемых в рулон, в соответствии с патоновским методом промышленного изготовления крупных резервуаров. На выставке был представлен газгольдер в стадии изготовления методом рулонирования. Этот метод позволил в несколько раз сократить продолжительность монтажных работ, снизить



полную стоимость сооружения резервуаров. Кроме того, была разработана технология изготовления плосковорачиваемых труб из полос, свариваемых по кромкам. Жидкость или газ, подаваемые между полосами под давлением, придают заготовкам форму цилиндрической трубы. Так, в Татарии укладка 100 км трубопроводов из таких труб позволила сэкономить более тысячи тонн металла и снизить строительство на 1700 тыс. руб. На выставке были представлены результаты внедрения новых технологий сварки ответственных инженерных изделий. Уникальным образцом сварной конструкции являлся и сам выставочный павильон, купол которого состоял из колец, соединенных между собой по меридиональным сечениям элементами жесткости.

Одной из наиболее металлоемких отраслей является судостроение, в которой широко используется крупноблочный метод строительства. На выставке были представлены отдельные узлы, макеты атомного ледокола «Ленин», крупнотоннажных танкеров, сухогрузов и др.

Электрошлаковая сварка уже в начале 1950-х годов была применена для изготовления мощных энергетических установок, кузнечно-прессового, подъемно-транспортного и другого оборудования, оборудования для химической, атомной и других отраслей на Ново-Краматорском заводе, Таганрогском заводе «Красный котельщик», Уралмашзаводе, Ленинградском металлическом заводе и других заводах и организациях, представивших свыше 80 экспонатов-изделий и макетов.

Широкое распространение в нашей стране получила сварка в углекислом газе. Высокий экономический эффект процесса подтверждался макетами и натурными образцами изделий автомобилестроения, турбогенераторных и турбомоторных заводов Харькова, Новосибирска, Ленинграда, судостроительных заводов Херсона и Николаева, других машиностроительных заводов, макетами и узлами доменных печей, промышленных сооружений и др. В показе достижений в этой области сварочной техники приняло участие свыше 30 организаций, в том числе НИАТ, ВНИ-ИЭСО, ИЭС им. Е. О. Патона, ЦНИИТМаш, НИ-ИХИММаш.

Максимальная механизация сборочно-сварочных работ в транспортном машиностроении, котло-, приборостроении, а также в ряде других отраслей была обеспечена благодаря применению всех способов контактной сварки. На выставке было также отражено широкое применение ремонтных технологий восстановления изношенных деталей наплавкой. В этом разделе привлекала внимание серия специального наплавочного механизированного оборудования. С развитием новых видов техники и ужесточением требований к качеству материалов и их соединений усиливалось внимание к родственным процессам и специальной электротехнологии. К способам, которые позволяют значительно повысить эксплуатационные свойства деталей и механизмов, относятся наплавка и другие технологии нанесения покрытий.



Успешное внедрение новых технологических процессов стало возможным благодаря резкому увеличению выпуска современного сварочного оборудования. В разделе «Источники питания для дуговой сварки» было представлено много типов сварочных трансформаторов, механических преобразователей постоянного тока и полупроводниковых выпрямителей, разработанных ВНИИЭСО, ИЭС им. Е. О. Патона, НИИТ, заводом «Электрик» и др. Широко были представлены сотни образцов аппаратов для дуговой сварки, машин для контактной сварки, станков, держателей, различных установок сварочных постов и другого оборудования. ИЭС им. Е. О. Патона на выставку представил сварочный трактор ТС-32 со скользящим водоохлаждаемым медным ползуном, принудительно формирующим нижний валик шва; трактор ТС-33 для автоматической сварки стыковых и угловых алюминия толщиной до 40 мм полуоткрытой дугой по слою флюса с универсальной настройкой для укладки шва между колес и рядом с трактором (в том числе и кольцевых швов на сосудах диаметром 1000 мм и выше); рельсовый аппарат А-372р и магнитошагающий аппарат А-501М, которые с успехом демонстрировались в Брюсселе и Нью-Йорке; пистолет А-564 для приварки шпилек под флюсом в нижнем, вертикальном и потолочном положениях; универсальный трактор ТС-17М, полуавтоматы ПШ-5 и др.

Полуавтомат А-547р конструкции ИЭС им. Е. О. Патона предназначался для сварки в углекислом газе проволокой диаметром 0,6...1,2 мм на токах 20...200 А металла малой толщины во всех пространственных положениях. Демонстрировался комплект из шлангового держателя, подающего механизма вместе с катушкой проволоки в общем футляре, пульта управления, газовой аппаратуры и выпрямителя ВС-200. Для точечной контактной сварки ИЭС им. Е. О. Патона разработал малогабаритные клещи К-165 со встроенным трансформатором, подвесные машины для стыковой сварки оплавлением рельсов (К-155) и труб (КТСА-1). Большое количество универсальных и специализированных машин и клещей для всех способов контактной сварки было представлено ВНИИЭСО и заводом «Электрик». Другие технологические процессы также были обеспечены высокоэффективным оборудованием. По техническим данным отечественное оборудование не уступало лучшим зарубежным образцам, а конструктивные решения послужили основой для создания нового оборудования.

Выставка привлекла внимание специалистов многих отраслей производства, продемонстрировала высокий уровень сварочного производства в СССР и оказала существенное влияние на дальнейшее развитие сварки.

РАЗРАБОТАНО В ИЭС

Сварка в авиастроении



Введена в эксплуатацию установка КЛ-138

Отличительной особенностью этой установки является наличие аппаратуры для косметического заглаживания корневой части швов, в том числе в труднодоступных удаленных местах.



УДК 621.791.004.518

ВЫБОР РАСПОЛОЖЕНИЯ ДАТЧИКА ТОКА В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ СВАРОЧНЫХ ПУШЕК

Чл.-кор. НАН Украины **О. К. НАЗАРЕНКО**, **С. А. ШЕВЧУК**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы спектральные характеристики тока, протекающего в плюсовой цепи электронно-лучевых источников ускоряющего напряжения, работающих на промышленной частоте или с высокочастотным преобразованием. Даны рекомендации, касающиеся места расположения резистивного датчика тока.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, источник ускоряющего напряжения, инверторные преобразователи напряжения, резистивный датчик тока электронного пучка

Особенностью большинства источников ускоряющего напряжения, предназначенных для питания сварочных электронных пушек, является применение резистивных датчиков тока с целью замыкания обратной связи по току пучка.

Многочисленные попытки установить этот датчик в плюсовой цепи традиционных источников питания, формирующих выпрямленное напряжение непосредственно от сети частотой $f = 50$ Гц без

частотного преобразования, к успеху не привели, поскольку сигнал обратной связи существенно зашумлен протекающими в этой цепи паразитными емкостными токами обмоток высоковольтного трансформатора и токами перезарядки фильтровых емкостей. На рис. 1, а приведена осциллограмма тока в плюсовой цепи источника ЭЛА-60, высоковольтный выпрямитель которого собран по схеме звезда–треугольник Ларионова. До 30...50 % обще-

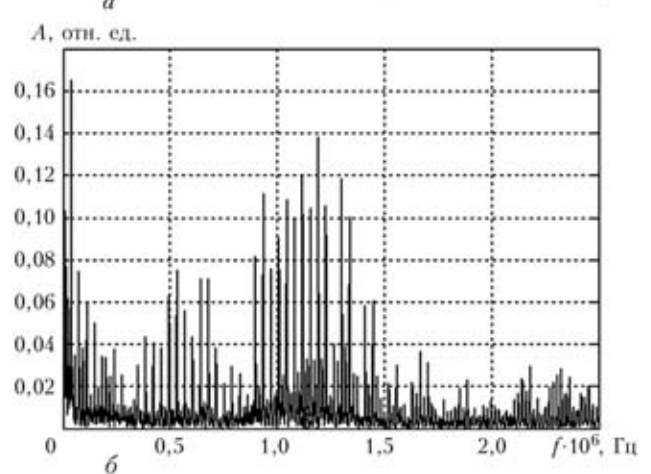
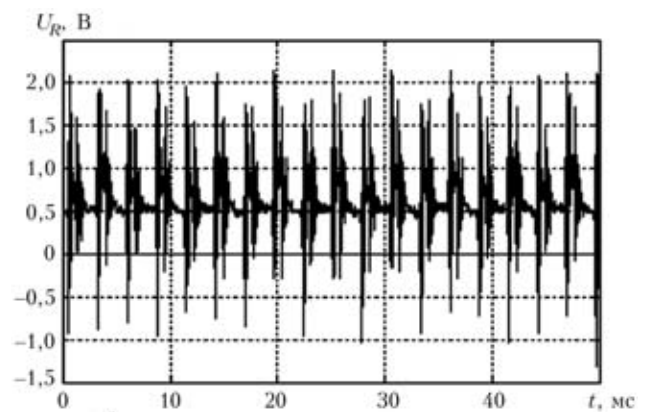
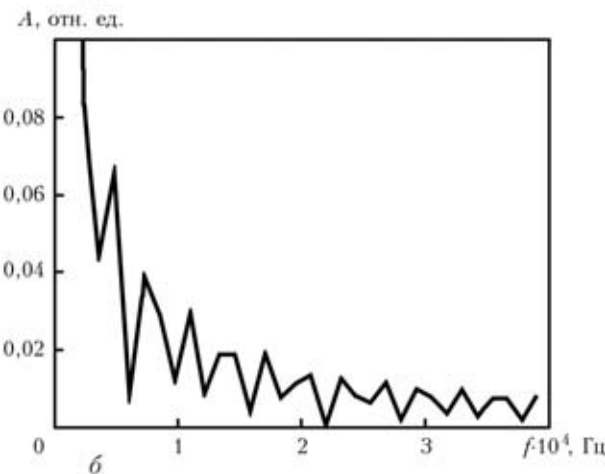
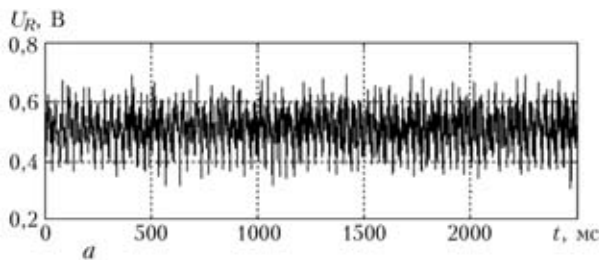


Рис. 1. Осциллограмма падения напряжения U_R на резистивном датчике тока с сопротивлением $R = 10$ Ом, расположенном в плюсовой цепи источника ускоряющего напряжения ЭЛА-60 (а), и спектр его переменной составляющей при токе нагрузки 50 мА (б); A — амплитуда напряжения

Рис. 2. Осциллограмма падения напряжения U_R на резисторе с сопротивлением $R = 10$ Ом обратной связи по току в плюсовой цепи инверторного источника ускоряющего напряжения ЭЛАИ-120/18 (а) и спектр его переменной составляющей при токе нагрузки 50 мА (б)



го тока, особенно в диапазоне значений малых токов (от одного до нескольких процентов номинального тока), составляют низкочастотные ($f = 50 \dots 600$ Гц) переменные составляющие, для которых результаты анализа Фурье приведены на рис. 1, б. Для подавления этих шумов необходимо применять фильтры с частотой среза $f_{\text{среза}} < 10$ Гц. Для фильтров первого порядка, у которых $f_{\text{среза}} = (2\pi RC)^{-1}$ (здесь R, C — сопротивление и емкость составляющих элементов), постоянная времени составляет не менее 100 мс [1]. При этом оказывается невозможным обеспечить требуемое быстродействующее управление током пучка для сварки с импульсной модуляцией тока пучка, а также использовать вторично-электронные системы слежения за стыком свариваемых кромок в режиме реального времени, когда необходимо задавать и стабилизировать ток пучка в течение импульса длительностью 5 мс.

При установке резистивного датчика тока в высоковольтной цепи этих же источников питания сигнал обратной связи зашумлен мало, необходимость в его фильтрации отпадает и становится возможным быстродействующее управление током пучка. Однако такое решение влечет

за собой усложнение аппаратуры и снижение ее надежности [2].

В инверторных источниках питания с высокочастотным преобразованием сетевого напряжения размещение резистора обратной связи по току в плюсовой цепи источника питания применимо благодаря тому, что частоты переменной составляющей лежат в области высоких значений ($f = 20 \dots 30$ кГц) (рис. 2). Для фильтрации этих составляющих можно применить фильтры с частотой среза 2...3 кГц, что соответствует постоянной времени $t < 0,2$ мс.

Таким образом, резистор обратной связи по току в электронно-лучевых источниках ускоряющего напряжения, работающих на промышленной частоте, должен размещаться в высоковольтной цепи выпрямителя, а в инверторных источниках питания с высокочастотным преобразованием сетевого напряжения его целесообразно размещать в плюсовой цепи выпрямителя.

1. Мошниц Г., Хорн П. Проектирование активных фильтров. — М.: Мир, 1984. — 286 с.
2. Назаренко О. К., Ланбин В. С. Исследование высоковольтных цепей управления током сварочного электронного пучка // Автомат. сварка. — 2007. — № 5. — С. 20–24.

Studied were spectral characteristics of current flowing in the plus circuit of electron beam sources of accelerating voltage operating on industrial frequency or with high-frequency transformation. Recommendations on the position of resistance current sensor are given.

Поступила в редакцию 26.05.2010

ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины



В. И. Дзыкович (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины) защитил 6 октября 2010 г. кандидатскую диссертацию на тему «Исследования и разработка материалов для износостойкой наплавки на основе сфероидизированных гранул карбидов вольфрама».

Диссертация посвящена исследованию и разработке материалов для износостойкой наплавки на основе сфероидизированных гранул карбидов вольфрама.

Проведен анализ существующих материалов для нанесения износостойких композиционных сплавов на основе дробленых частиц карбидов вольфрама. Показано, что для улучшения качества наплавленного слоя, уменьшения степени раство-

рения армирующих частиц при наплавке, улучшения эксплуатационных свойств композиционных покрытий, увеличения объемной доли износостойких гранул в наплавленном слое за счет максимального объема сферической частицы при минимальной удельной поверхности наиболее перспективна сферическая форма частиц.

Обоснован выбор способа термоцентробежного распыления тугоплавких материалов для получения сферических частиц карбидов вольфрама с целью использования их в качестве износостойкой фазы в составе материалов для композиционной наплавки.

С помощью математического моделирования способа термоцентробежного распыления карбидов вольфрама построены соответствующие математические уравнения, связывающие основные параметры (тепловые характеристики источника нагрева, скорость вращения) с производительностью процесса $V_{\text{под}}$ и размером образующихся



гранул релита d . В результате разработан механизм управления гранулометрическим составом сфероидизированных гранул карбидов вольфрама $WC - W_2C$. Получена формула для расчета скорости вращения шпиндельного узла установки с целью распыления материала требуемого гранулометрического состава.

Разработана технология выплавки исходных материалов с применением индукционного нагрева, что позволило получать слитки для термоцентробежного распыления эвтектического состава высокого качества.

Проведены исследования влияния качества слитков для распыления на структуру, свойства и стехиометрический состав полученных сферических частиц карбидов вольфрама. При сравнении сфероидизированных гранул карбидов вольфрама с аналогами известных зарубежных фирм установлено, что частицы, полученные методом термоцентробежного распыления, имеют максимальные значения микротвердости и однородность химического и фазового состава.

С учетом теоретических и экспериментальных результатов разработана технология термоцентробежного распыления тугоплавких материалов с использованием в качестве источника нагрева плазменной дуги, создано промышленное оборудование. Оптимальным режимом для распыления слитков карбидов вольфрама является: $I_{св} = 550...600$ А при $U_d = 38...40$ В. При этом оптимальная скорость вертикальной подачи слитка составляет $0,12...0,18$ мм/с. Основным параметром, влияющим на гранулометрический состав распыляемых сферических частиц, является скорость вращения слитка. При этом изменение частоты вращения от 1200 до 10000 об/мин позволяет получать частицы размером от 1000 до 50 мкм.

Впервые проведены исследования морфометрических характеристик сфероидизированных гранул карбидов вольфрама $WC - W_2C$ и установлено, что все тестируемые порошки имеют очень стабильные и однородные показатели по форме частиц. При отделении несферической составляющей из состава готового материала текучесть сфероидизированных гранул карбидов вольфрама на 15...20 % выше текучести исходного материала, что положительно сказывается на работе дозирующих устройств при некоторых способах наплавки.

Разработаны наплавочные материалы для нанесения износостойких композиционных слоев на основе сфероидизированных гранул карбидов вольфрама различными способами. При наплавке опытных образцов достигнута максимальная концентрация армирующей фазы в наплавленном слое (до 50 %) за счет наибольшего объема сферических частиц при минимальной удельной по-

верхности по сравнению с дроблеными частицами. За счет отсутствия концентраторов неравномерного прогрева частиц (сферическая форма не имеет острых углов достигается минимальное их растворение (до 5...10 %) в наплавленном слое. При этом в матрице сплава, особенно на основе никеля и меди, отсутствуют вторичные железо-вольфрамовые карбиды, которые в значительной степени охрупчивают наплавленный слой. Износостойкость образцов, наплавленных различными способами с использованием сфероидизированных гранул в среднем на 25 %, выше чем образцов с дроблеными частицами карбидов вольфрама, вследствие повышенной микротвердости сфероидизированных гранул, отсутствия в них дефектов в виде пор и трещин, а также минимального содержания хрупких фаз в матрице сплава.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины



Т. Р. Ганеев (Черниговский государственный технологический университет) защитил 6 октября 2010 г. кандидатскую диссертацию на тему «Совершенствование технологии диффузионной сварки меди с молибденом».

Диссертационная работа посвящена разработке технологии диффузионной сварки в вакууме молибдена с медью.

С целью повышения статической прочности и термостойкости, а также снижения электрического сопротивления сварных узлов в работе предложено применение низкоэнергетической ионной обработки в плазме тлеющего разряда поверхности молибдена, предварительно покрытой слоем меди, для создания промежуточной прослойки при его сварке с медью.

Для выявления путей влияния низкоэнергетических ионов плазмы на свойства приповерхностных слоев молибдена применили методы молекулярной динамики. Математическим моделированием процесса установлена связь между энергией бомбардирующих поверхность металла ионов и положением максимума смещений атомов молибдена, что позволило рассчитать режим, обеспечивающий наилучшие условия внедрения атомов напыленного слоя меди в молибден.

Методами поляризационного сопротивления и краевого угла смачивания определен режим ионного травления, позволяющий повысить качество подготовки поверхности молибдена перед термическим вакуумным напылением на нее слоя меди. Предложен режим, обеспечивающий напыление слоя необходимой толщины.



Обнаружен диапазон режимов ионной обработки поверхности молибдена, покрытой слоем меди, при котором образуется модифицированный слой с механическими свойствами, обеспечивающими сварному образцу плавное изменение микротвердости от меди к молибдену.

Для определения влияния предложенной последовательности операций на служебные характеристики сварного соединения проведен ряд исследований. С помощью метода микрорентгеноспектрального анализа показано увеличение ширины диффузионной зоны меди в молибдене на 15 % при применении модифицированного слоя. Определен режим сварки молибдена с медью, обеспечивающий повышение прочности соединения на срез до 110 МПа, т. е. равнопрочной меди.

С помощью экспериментального рентгеновского метода и метода математического моделирования показано снижение остаточных эквивалентных напряжений в полученных соединениях на 30...35 %, увеличение стойкости при термоциклировании в 5 раз по сравнению с соединением непосредственно Cu–Mo, а также снижение удельного электрического сопротивления на 20 % по сравнению со сварным соединением, полученным по традиционной технологии с применением прослойки никеля.

На основе проведенных исследований разработана технология изготовления способом диффузионной сварки в вакууме медномолибденовых анодов.



ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛА «WELDING and CUTTING», 2010, № 2

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПЛАЗМЕННОЙ, ГАЗОКИСЛОРОДНОЙ И ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ. — С. 91–93

В данной статье рассматриваются вопросы выбора оптимального способа резки в зависимости от совокупности требований к качеству реза, производительности процесса, капитальных и технологических затрат, рентабельности и диапазона технологической применимости конкретного способа.

В зависимости от указанных выше требований применяют три основных способа резки: плазменный, газокислородный или лазерный. Например, для раскроя углеродистой стали толщиной более 50 мм, если отсутствуют высокие требования к качеству реза, наиболее подходящей с точки зрения перечисленных выше критериев является газокислородная резка. Этот процесс характеризуется минимальными капитальными и технологическими затратами, но себестоимость отдельного реза достаточно высока из-за низкой скорости процесса и низкого качества реза, что зачастую приводит к необходимости механической зачистки разрезаемых кромок.

В процессе плазменной резки используют комбинацию электрической энергии и энергии сжатого газа и ее применяют для раскроя любых металлов толщиной от 0,5 до 50 мм, независимо от состояния поверхности (покрытой ржавчиной, окрашенной или рифленой). Ширина реза при плазменной резке в зависимости от толщины разрезаемого металла варьируется в пределах 1,3...8,6 мм. Способ плазменной резки представляет собой наиболее полное сочетание преимуществ относительно

соотношения капитальных и технологических затрат, качества реза и производительности процесса.

Лазерный нагрев используют для нагрева, плавления, частичного испарения металлов и резки при раскрое любых металлов с нормальным состоянием поверхности (без следов коррозии), толщиной менее 6 мм, хотя известно ее применение и для толщин до 25 мм, с достаточно жесткими требованиями к точности. При этом ширина реза составляет от 0,15 до 0,51 мм.

Выбор наиболее подходящего для данной задачи способа резки зависит от наиболее существенного критерия выбора, например, от требуемого качества реза, производительности, технологических затрат, экономической эффективности или возможности быстрой переналадки оборудования и процесса для решения новых технологических задач.

Относительно влияния способа резки на глубину зоны термического влияния, при лазерной резке она минимальна и не превышает 0,2 мм, максимальная глубина этой зоны образуется при газокислородной резке. Лазерный и плазменный способы резки до определенной толщины листа обеспечивают получение достаточно высокой чистоты реза, и в случае образования натеков металла шлак легко удаляется. Точность резки при лазерной сварке находится в пределах 0,0762...0,254 мм, при плазменной резке — 0,254...0,762 мм, а при газокислородной — в пределах 0,508...1,524 мм.



Окупаемость производственных затрат при газокислородной резке составляет 250 рабочих дней с последующим превышением ежедневных доходов над расходами в сумме

200 евро, при лазерной резке эти параметры составляют 395 дней и 760 евро, а при плазменной резке — 56 дней и 1776 евро.

ОЦЕНКА РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ БОЙЛЕРОВ ДЛЯ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. — С. 94–98

В статье обсуждаются вопросы сочетания различных типов сварочного оборудования, материалов и сварочных процессов, используемых при изготовлении в заводских условиях узлов трубных теплообменников водогрейных котлов для последующего их монтажа на теплоэлектростанциях мощностью порядка 150 МВт.

Структурная схема сборочных линий, на которых выполняется значительный объем сварочных работ, существенно зависит от характеристик и разновидностей имеющихся в наличии сварочных установок.

Согласно наиболее распространенному варианту технологической схемы изготовления узлов трубных теплообменников, например, на сборочных станах «Straight Tube Welder» фирмы «Polysoude» после фиксирования и центровки труб в сборочном приспособлении сварку труб проводят с вращением их с заданной скоростью относительно неподвижной сварочной головки (рис. 1). Затем проводят приварку к трубам промежуточных элементов типа угольников или U-образных колен, как показано на рис. 2.

Так как в этом варианте различные виды сварных швов могут выполняться как в ручном, так и в автоматическом режиме (при сварке неповоротных стыков), время изготовления узла существенно зависит от количества сварочных установок и операторов-сварщиков.

Исходя из тенденции увеличения мощности тепловых электростанций за счет повышения температуры рабочих сред, для изготовления теплообменников разрабатывают новые более жаростойкие материалы, которые требуют совершенствования существующих способов сварки. Прочностные характеристики наиболее широко используемых для изготовления теплообменников материалов приведены на рис. 3.

Сталь X20CrMoV12-1 (X20) с 1950 г. успешно используют в Германии и в других странах при изготовлении теплообменников на тепловых электростанциях, работающих на ископаемом топливе, а так как сварка этой стали требует особого подхода, эта сталь не была внесена в реестр ASME.

В 1980 г. в США была разработана сталь P91 (A335 согласно коду ASMT или X10CrMoVNb9-1 согласно стандарту DIN № 1.4903), что позволило поднять рабочую тем-

пературу теплообменников с 540 до 600 °С. Более высокая температура эксплуатации была достигнута в ходе разработки стали E911 (X11CrMoWVNb9-1-1 согласно стандарту DIN — № 1.4905) и стали P92 (X10CrMoVNb9-2), которые могут быть использованы для ремонта теплообменников и замены изношенных узлов.

Дальнейшее повышение температуры возможно при применении аустенитных сталей или никелевых сплавов, сварка которых требует предварительного подогрева и последующей термообработки, которую необходимо выполнять индукционным или резистивным нагревом. Газопламенный нагрев менее предпочтителен из-за отсутствия возможности точного контроля теплового режима.

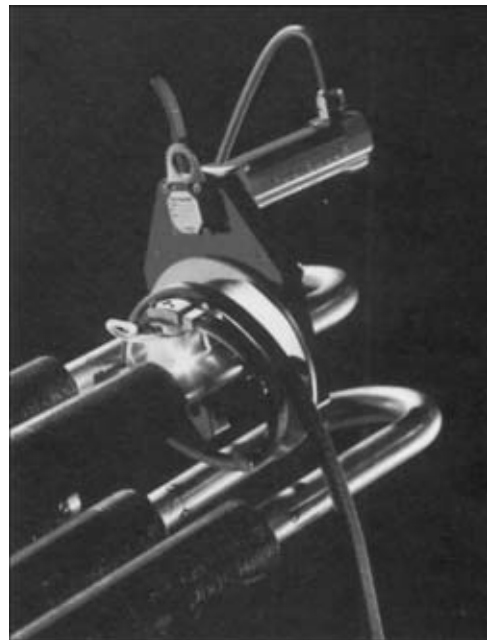


Рис. 2. Приварка U-образных колен

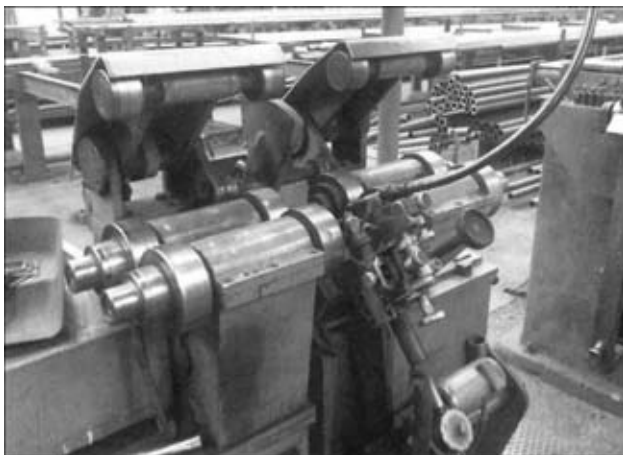


Рис. 1. Трубосварочная установка типа VKW со сварочной головкой, установленной под стыком труб (с верхней подачей присадочной проволоки)

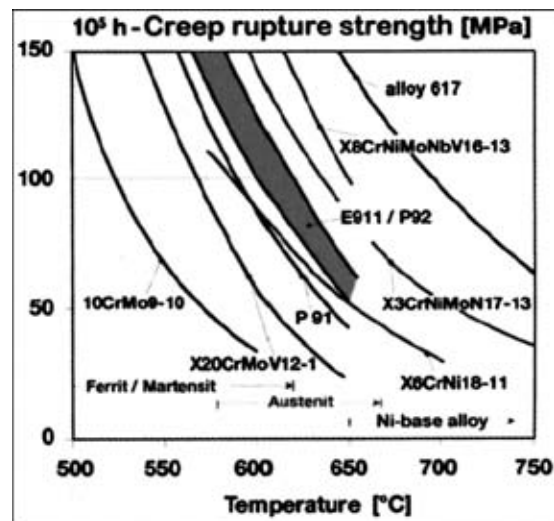


Рис. 3. Зависимость сопротивления ползучести материалов теплообменников от температуры их эксплуатации в течение 10⁵ ч

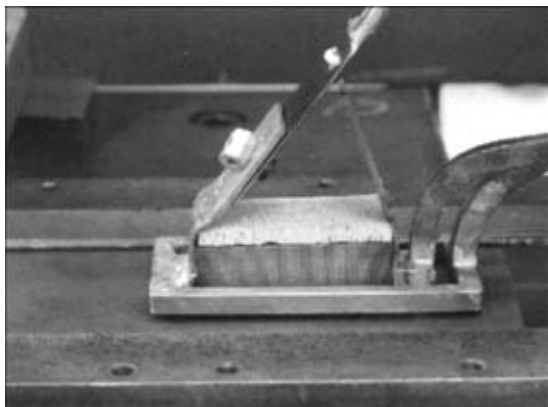


СВАРКА СТАЛЕЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ С ЛОКАЛЬНЫМ ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВОМ. — С. 101–105

В настоящее время в основном используют преимущества процесса сварки трением с перемешиванием для сварки металлов с низкой температурой плавления, например, алюминия, магния и медных сплавов. Результаты исследований конструкционных и нержавеющей сталей пока еще не нашли широкого применения в серийном производстве из-за низкой стойкости сварочного наконечника, обусловленной воздействием на него высоких механических нагрузок при температуре, близкой к температуре плавления соединяемых материалов. В связи с этим выбор материалов для изготовления сварочного наконечника ограничен молибденом, вольфрамом и некоторыми квазикерамическими материалами.

С целью выявления возможности использования при изготовлении сварочного наконечника из более дешевых материалов и снижения степени воздействия на него механических нагрузок были проведены исследования этого процесса сварки с предварительным локальным индукционным нагревом зоны соединения. Кроме того, предстояло выяснить, позволит ли снижение механических нагрузок на сварочный инструмент повысить скорость сварки до 30 см/мин, возможно ли применение этого способа для соединения высокопрочных сталей, а также решить вопрос выбора оптимального материала подложки или материала специального покрытия, исключающего присоединение к ней свариваемых листов металла.

Для индукционного нагрева использовали индукционную установку КУКА MF-40 с выходной мощностью 40 кВт с индуктором, показанным на рисунке.



Индуктор с керамическими вставками, обеспечивающими стабильный зазор между индуктором и свариваемыми листами

При проведении исследований использовали сварочные наконечники, изготовленные из титан-циркониевого сплава с добавками молибдена, вольфрама и сплавов на его основе, поликристаллического кубического нитрида бора (PCBN), что позволяет увеличить длину сварного шва до нескольких метров.

Температуру на верхней поверхности свариваемых листов проводили бесконтактным методом инфракрасным пирометром, данные которого уточняли в нескольких точках вдоль сварного шва по показаниям термопар, закрепленных в специально высверленных отверстиях на нижней поверхности свариваемого металла.

Выводы

При сварке низкоуглеродистой стали S235JR оказалось возможным достижение удовлетворительного качества сварных соединений при температуре предварительного подогрева 500 °С, что позволило снизить механические воздействия на сварочный инструмент и сварочную установку.

При сварке конструкционной термомеханически обработанной мелкозернистой стали S700MC получение удовлетворительного качества сварных соединений было достигнуто при температуре предварительного нагрева около 250 °С. При более высоком вкладе энергии индукционного нагрева относительно энергии, генерируемой сварочным инструментом, возможно появление дефектов сварки в виде разрывов металла сварного шва.

В соответствии с результатами проведенных экспериментов процесс сварки трением с перемешиванием не рекомендуется для соединения оцинкованных листов двухфазной стали DP800+Z.

При сварке коррозионностойкой хромоникелевой стали X5CrNi18-10 возможно получение удовлетворительных результатов при снижении температуры предварительного подогрева и скорости сварки.

При сварке конструкционной и хромоникелевой стали различной толщины (3 и 2 мм) возможно получение качественных сварных соединений, причем основное влияние на качество соединения оказывает не температура предварительного подогрева, а разница толщин соединяемых металлов.

При сварке нахлесточных соединений низкоуглеродистой стали S235JR получение удовлетворительных результатов возможно при относительно невысоком уровне предварительного подогрева из-за неизбежного перегрева верхнего листа. Несмотря на использование предварительного индукционного подогрева свариваемых листов, сварочный наконечник должен обладать максимальной термостойкостью. Для выполнения сварки протяженностью нескольких сантиметров необходимо использование, по меньшей мере, сварочных наконечников, изготовленных из вольфрам-оксид лантана, вольфрам-оксид церия или, лучше всего, из ренированного вольфрама или PCBN. Для выполнения сварных соединений большой длины необходимо использовать PCBN.

Во избежание прилипания свариваемых листов к нижней плите сварочной установке необходимо напылять на нее керамические покрытия и, кроме того, более точно устанавливать глубину погружения сварочного инструмента в свариваемые листы стали.

Наличие покрытий, например, цинка, приводит к появлению вибраций из-за различия коэффициентов трения и к нестабильности процесса сварки.

В некоторых случаях прочность сварных швов превышает прочность основного металла (при сварке низкоуглеродистой стали S235JR), соответствует прочности основного металла (при сварке стали X5CrNi18-10) и составляет 70...80 % прочности основного металла при сварке термомеханически упрочненной стали S700MC.

СВАРКА ТРЕНИЕМ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ. — С. 106–110

Сварку трением широко используют для соединения металлов одного состава, разнородных металлов (стали с титаном, стали с алюминием) или металлов с ограниченной сва-

риваемостью (литых или металлокерамических), однако ранее область применения этого способа ограничивалась металлами круглого или близкого к кругу поперечного сечения.



В данной статье представлены результаты исследования способа сварки трением образцов прямоугольного сечения $a(5...20 \text{ мм}) \times b(10...40 \text{ мм})$ и $30 \times 10 \text{ мм}$, пустотелых образцов с различной толщиной стенки ($2...3 \text{ мм}$) сечением от 20×20 до $40 \times 40 \text{ мм}$ и различных металлов (низкоуглеродистой стали S355 и S235, нержавеющей коррозионностойкой стали X6CrNiMoTi17-12-2, алюминиевых сплавов AlMgSi, AlMg4 и латуни CuZn39Pb2).

Исследования нового способа сварки проводили на специально разработанной для этой цели установке типа MOSUS-RSM100 с приводом зажимного устройства, обеспечивающим вращение и перемещение оси вращения свариваемых деталей кривошипно-кулисным механизмом (рисунок), напоминающее перемещение абразивного круга плоскошлифовальной машины.

Особенностью данного способа сварки трением является постоянство относительной скорости перемещаемых деталей (около 1 м/с) в любой точке свариваемых поверхностей.

К преимуществам предлагаемого способа сварки относятся формирование зоны термического влияния, симметричной относительно плоскости первоначального контакта соединяемых поверхностей, равномерное по всей плоскости соединения выделение энергии (в отличие от минимума тепловыделения вблизи центра вращения при реализации обычного процесса сварки трением), а также совокупность общеизвестных преимуществ, характеризующих обычный процесс сварки трением: возможность проведения процесса без разбрызгивания металла, появления дыма или светового излучения, минимальное тепловложение, возможность соединения разнородных и неэлектропроводных материалов (пластмасс или керамики с металлом).

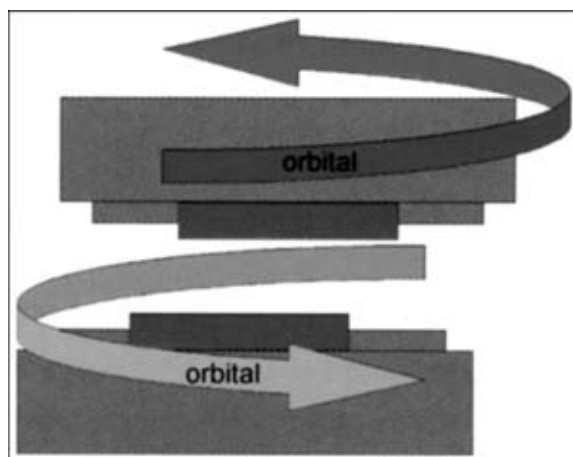


Схема процесса сварки трением с вращательно-поступательным перемещением свариваемых деталей

В результате проведенных исследований установлена возможность достижения механической прочности сварных соединений на разрыв на уровне 90% прочности основного металла в следующем диапазоне технологических параметров процесса сварки: время сварки $2...6 \text{ с}$, усилие сжатия $10...80 \text{ Н/мм}^2$, относительная скорость перемещения свариваемых поверхностей $1...2 \text{ м/с}$. Максимальная частота осцилляции при эксцентриситете $1,5 \text{ мм}$ составляла $2 \times 87 \text{ Гц}$ при смещении наружных поверхностей свариваемых образцов сечением до 400 мм^2 не более $0,2 \text{ мм}$.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ НИКЕЛЬ-ЦИНКО-ФЕРРИТНОГО ПОКРЫТИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВ. — С. 111–116

Ферриты обладают низкой электропроводностью ($10...10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и в зависимости от их химического состава относятся к полупроводникам или изоляторам. Ферриты в основном изготавливают методами порошковой металлургии, однако за последнее время повсеместно проявляется интерес к технологии нанесения толстых ферритовых покрытий (типа $\text{Me-Fe}_2\text{O}_4$) методами термического напыления, например, введением порошка в воздушно-плазменный или высокоскоростной газокислородный поток.

Порошки феррита наиболее часто изготавливают методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, основанного на экзотермической реакции большинства металлов с бором, углеродом, азотом, кремнием и другими элементами. При изготовлении ферритов в качестве оксидан-

та используют NaClO_2 , после чего готовый Ni-Zn-феррит дробят, отсеивают мелкую фракцию в воздушном потоке, а более крупную фракцию отделяют на ситах.

Результаты проведенных исследований показывают, что при методе высокоскоростного газопламенного нанесения ферритового покрытия на подложку из низкоуглеродистой стали достигается меньшая пористость, чем при использовании плазменного напыления, хотя при этом варианте достигается большая степень адгезии к основному материалу. В процессе термического напыления порошка феррита любым методом происходит его частичное разложение основной фазы (шпинели) на вюстит (FeO) и возгонка цинка, причем, несмотря на меньшую температуру нагрева порошка, эти процессы более заметны при газопламенном напылении.

ВЫСОКОТОЧНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ ФОРСИРУЮТ ПОСТРОЙКУ АВИАНОСЦЕВ ВЕЛИКОБРИТАНИИ. — С. 72

«Techserv Cutting System Ltd.» (Dewsbury/UK) — фирма, специализирующаяся на выпуске установок для резки металлов с числовым программным управлением, разработала установку HS 4000 для высокоточного плазменного раскроя листов металлов шириной до 5 м и толщиной до 35 мм со скоростью резки от 50 до 16000 мм/мин в зависимости от толщины разрезаемого листа.

Система бесщеточного сервопривода фирмы «Baldor Electric Co». (Dewsbury/UK) обеспечивает высокоточное перемещение резака по трем осям с дополнительной автоматической установкой резака на заданном расстоянии от разре-

заемой поверхности и контролем его положения в процессе резки. Повышенная точность реза достигнута в результате разработки специальных программ с применением многоцелевого программного языка, что позволило увеличить скорость обработки и отображения информации в режиме реального времени.

«UK's Aircraft Carrier Alliance» приобрела четыре установки HS 4000 для изготовления гнутых стальных панелей для строящихся двух авианосцев класса Queen Elisabeth, выпуск которых планируется в $2016\text{--}2018 \text{ гг.}$

Материал подготовил В. М. Кисльцын,
канд. техн. наук

ДРУЖЕСТВЕННЫЕ КОНТАКТЫ

В июле 2010 г. ИЭС им. Е. О. Патона посетила делегация Чуньцинского муниципального народного правительства во главе с вице-мером Тун Сяопин, в которую входили ведущие ученые и специалисты Чуньцинской Академии наук и технологий (ЧАНТ).

Делегацию, которую сопровождал первый секретарь посольства КНР в Украине профессор Ли Синьжу, была принята заместителем директора ИЭС им. Е. О. Патона академиком НАН Украины Л. М. Лобановым и ведущими специалистами.

Гости были ознакомлены с разработками ИЭС им. Е. О. Патона в области создания оборудования для утилизации медицинских отходов с помощью плазменных технологий, а также достижениями в области применения электрической сварки для соединения живых тканей. Последовавшие затем переговоры сторон выявили взаимный интерес к сотрудничеству. Было подписано Соглашение о разработке рамочной программы долгосрочного научно-технического сотрудничества между ИЭС им. Е. О. Патона и ЧАНТ в области сварки и родственных процессов. Обе стороны рассматривают достигнутые договоренности как первый шаг долгосрочного взаимовыгодного сотрудничества и намерены по мере его развития и углубления обсудить возможные формы его осуществления.

В 2009 г. НАН Украины и ИЭС им. Е. О. Патона были подписаны Меморандум о научно-техническом сотрудничестве между Народным правительством г. Циндао провинции Шаньдун (КНР) и НАН Украины, а также Соглашение о создании совместной базовой лаборатории морской подводной сварки, в которых задекларированы направления совместных работ в ближайшие годы.

В развитие намеченного сотрудничества в июне 2010 г. ИЭС им. Е. О. Патона вновь посетила делегация Народного правительства провинции Шаньдун во главе с вице-губернатором господином Ли Чжаоцянь с целью уточнения направлений сотрудничества в области высоких технологий, определения возможности установления прямых контактов заинтересованных в сотрудничестве предприятий и организаций, входящих в Шаньдунскую АН, с предприятиями и исследовательскими организациями НАН Украины, в том числе ИЭС им. Е. О. Патона. В состав делегации входили ответственные работники Народного правительства провинции Шаньдун, ученые Шаньдунской АН, бизнесмены.



Во время встречи с делегацией Чуньцинского муниципального народного правительства во главе с Тун Сяопин



Встреча с делегацией Народного правительства Шаньдун

Делегация была принята заместителем директора ИЭС им. Е. О. Патона академиком НАН Украины Л. М. Лобановым и заместителем генерального директора «НТК «ИЭС им. Е. О. Патона» доктором техн. наук Г. С. Маринским. Делегация из КНР посетила цех электронно-лучевой сварки, демонстрационный зал института, подробно ознакомилась с оборудованием для электронно-лучевой сварки, поставка которого будет произведена одному из предприятий провинции Шаньдун до конца текущего года.

В результате переговоров подписано Рамочное соглашение о сотрудничестве в области сварки между ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины и «Jinan Iron and Steel Croop co., Ltd.», КНР.

Редакция



МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «МЕЕ-2010»

20–24 сентября 2010 г. на базе санаторного комплекса «Понизовка» (Большая Ялта, Крым) проходила Шестая международная конференция «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий», посвященная 80-летию со дня рождения известного ученого-материаловеда Виктора Ивановича Трефилова. Организовали конференцию Национальная академия наук Украины (НАНУ), Российская академия наук (РАН), Национальная академия наук Беларуси (НАНБ), Украинское материаловедческое общество, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ, Институт высоких температур РАН, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Институт тепломассообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, ООО «ИНТЕМ» (Украина).

Конференция проходила под патронажем штаб-квартиры ВВС США в Европе, Секретариата Европейской программы EUREKA, JNR Global и федерации европейских материаловедческих обществ. Спонсорами конференции являлись: European Office of Airspace Research and Development; Air Force Office Scientific Research; United States Air Force Research Laboratory; U.S. Office of Naval Research Global; Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАНУ; Национальная академия наук Украины; «Вириал» (Санкт-Петербург, Россия); «Диском» (Киев, Украина); «Элтехмаш» (Винница, Украина).

В работе конференции приняли участие свыше 150 ученых, научных сотрудников, аспирантов и инженеров из ведущих мировых научно-исследовательских центров, НИИ, университетов, академий, отраслевых лабораторий и других организаций 17 стран.

Открыл конференцию и выступил с приветственной речью академик НАНУ В. В. Скороход. Он пожелал всем ее участникам успешной работы, делового сотрудничества, а также озвучил задачи конференции и изложил организационные вопросы.

Проблематика конференции рассматривалась в девяти секциях:

секция А. Принципы конструирования материалов и покрытий для работы в экстремальных условиях;

секция В. Научные основы и компьютерное моделирование процессов получения материалов и покрытий, работающих в экстремальных условиях;

секция С. Перспективные технологии получения и соединения материалов и изделий, работающих в экстремальных условиях;

секция D. Структура и свойства материалов и покрытий для работы в экстремальных условиях;

секция E. Специальная сессия «Теплозащитные покрытия»;

секция F. Экспериментальные результаты использования материалов и покрытий в натуральных экстремальных условиях;

секция G. Возможности и современные технологии переработки промышленных отходов с целью получения конструкционных, теплоизоляционных, облицовочных и других материалов;

секция H. Научно-организационные и информационные вопросы сотрудничества ученых-материаловедов;

секция I. Круглый стол «Результативный трансфер технологий — катализатор инновационного развития общества».

Тематика докладов, рассматриваемых на секциях В и С, включала сварочные технологии и технологии, которые классифицируются как родственные сварочным, а также строение материалов и их свойства, получаемые путем сварочного нагрева. Для специалистов-сварщиков, по нашему мнению, могут представлять интерес следующие доклады: «Получение функционально градиентных покрытий на основе титана методом лазерной наплавки» (В. К. Нарва, А. В. Марани, Московский институт стали и сплавов, Россия); «Преимущества электронно-лучевой технологии при создании упрочняющих покрытий» (Н. К. Гальченко, С. И. Белюк, К. А. Колесникова, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия); «Технологии и оборудование для диффузионной сварки прецизионных деталей из разнородных материалов» (А. В. Люшинский, ОАО «Раменское приборостроительное КБ», Россия); «Разработка ресурсосберегающей восстановительной технологии для рабочих лопаток турбины из сплава ХН65ВМЮТ (ЭИ893)» (Ю. П. Тарасенко, О. Б. Бердник, В. А. Сорокин, Нижегородский филиал Института машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН, Россия); «Повреждаемость длительно эксплуатируемых сварных соединений паропроводов» (В. В. Дмитрик, С. Н. Барташ, НТУ–ХПИ, Харьков, Украина) и ряд других.

После пленарных докладов участники конференции заслушали устные и рассмотрели стендовые доклады. Всего было сделано около 200 докладов и устных сообщений.

В процессе работы конференции были обсуждены пути дальнейшего развития материаловедческих направлений для решения конкретных задач по разработке конструкционных материалов и покрытий для их использования в экстремальных условиях. Участники конференции обменялись научной информацией, установили между собой деловые кон-

такты, наметили планы выполнения совместных научных работ.

На наш взгляд, конференция представляла практический интерес не только для ученых-материаловедов, но и сварщиков, изучающих строение материалов и покрытий, получаемых путем использования как сварочных, так и родственных технологий.

В. В. Дмитрик, д-р техн. наук

УДК 621.791.009(100)

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕМИНАР «АВИАСТРОЕНИЕ — ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ»

7 октября 2010 г. в с. Княжичи Киевской обл. в Технологическом центре ООО «Фрониус Украина» состоялся однодневный семинар «Авиастроение — технологии и оборудование для сварки». Семинар, который становится традиционным, был организован дирекцией и специалистами ООО «Фрониус Украина». Идея проведения семинара была подсказана возросшим в последние годы интересом предприятий Украины, работающих в области авиастроения и ремонта авиационной техники, к разработкам компании «Фрониус», а также необходимостью ознакомления ведущих специалистов предприятий с эксплуатацией оборудования этой компании на предприятиях.

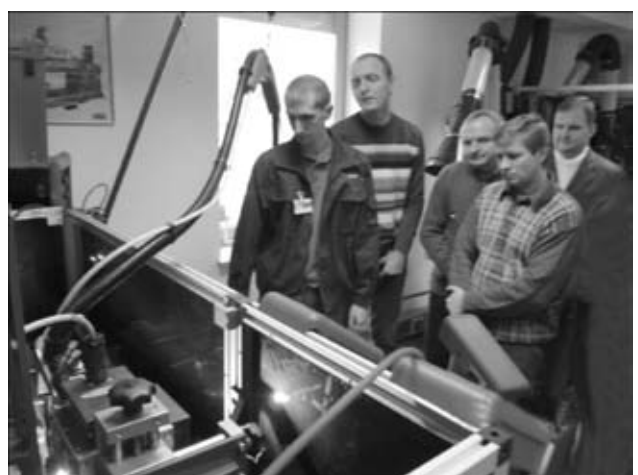
В семинаре приняли участие представители ГП «Антонов» и его филиала «Серийный завод Антонова», Харьковского государственного авиационного производственного предприятия, ГП «ПО Южный машиностроительный завод им. А. М. Макарова», ОАО «Мотор Сич», Харьковского национального университета «ХАИ», ООО «Аэропракт», ЧП «Анисимов», ООО «Луганский авиационно-ремонтный завод», Львовский и Николаевский авиационные ремонтные заводы МО Украины, ОАО «Линде Газ Украина», ООО «Фаворит Лтд.», Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Укра-



ины, ОАО «Северодонецкий завод химического нестандартизированного оборудования».

Семинар открыл директор по торговле ООО «Фрониус Украина» В. Л. Бондаренко. Программа семинара, проходившего в режиме диалога между менеджерами ООО «Фрониус Украина» и его участниками, включала теоретическую и демонстрационную части по темам:

технологические особенности применения оборудования «Фрониус» для сварки нержавеющей стали и алюминиевых сплавов методом ТИГ (В. Шку-





ренко, менеджер торгового отдела (ТО) ООО «Фрониус Украина»;

сварочные маски серии Vizor 3000 (А. Пиндюра, менеджер ТО);

технологические возможности процесса СМТ и его применения (Д. Бойко, менеджер по рекламе); автоматизация процессов сварки. Орбитальные системы сварки (В. Онищук, инженер);

оборудование для плазменной резки TransCut 300 (А. Тараймович, инженер).

Кроме того, на семинаре выступили главный сварщик филиала ГП «Антонов» — «Серийный завод Антонова» Г. Коваленко с докладом «Опыт применения оборудования «Fronius» на авиастроительном предприятии и младший научный сотрудник ИЭС им. Е. О. Патона А. Гринюк с докладом «Технология и оборудование плазменной сварки и ее применение».

Доклады, заслушанные на семинаре, вызвали живой интерес слушателей. Динамичная форма их представления, хорошее иллюстративное оформление, вопросы и ответы по ходу выступлений позволяли удовлетворить запросы участников семинара. Последующее практическое ознакомление с оборудованием во время демонстрации работы на различных режимах и на гамме материалов эффективно дополняло теоретическое обсуждение.

Все участники семинара выразили благодарность организаторам семинара за насыщенную программу, возможность детального ознакомления с передовыми образцами оборудования и технологиями.

Все участники семинара были приглашены на Международный промышленный форум (г. Киев, МВЦ, 23–26.11.2010), на стенд «Фрониус Украина».

В. Н. Липодаев, д-р техн. наук

ПАМЯТИ А. А. РОССОШИНСКОГО



В июле 2010 г. на 94-м году ушел из жизни доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины (2003), лауреат Государственной премии СССР (1981) и УССР (1982), лауреат Премии Совета Министров СССР (1990) Алексей Анатольевич Россошинский.

В 1941 г. он закончил Киевский индустриальный институт по специальности инженер-теплотехник, а в 1944 г. — Военную ордена Ленина академию бронетанковых и механизированных войск Советской Армии по специальности инженер-механик.

В годы Великой Отечественной войны воевал в действующей армии, был неоднократно ранен, награжден боевыми орденами и медалями.

После войны пришел на должность инженера в ИЭС им. Е. О. Патона. В 1956 г. защитил кандидатскую диссертацию, посвященную металлографии сварных швов. Докторская степень ему была присуждена в 1971 г. за работу в области сварки и пайки полупроводниковых приборов. В том же году ему присвоено ученое звание профессора.

Большие усилия приложил Алексей Анатольевич для создания отдела пайки в микроэлектронике. В 1971 г. возглавил созданный им отдел, в котором работал до конца жизни.

А. А. Россошинский много и плодотворно работал в различных направлениях сварочной науки. Начав работу с изучения металлографии сварочных швов, он разработал оригинальную методику полу-

чения первичной структуры и выявления σ -фазы. Он был одним из разработчиков прессовой сварки шпангоутов большого сечения и плазмотрона с независимым горением дуги, внедренных на «Южмаше».

Большой вклад Алексей Анатольевич внес в разработку технологии сборки полупроводниковых приборов с применением ультразвука; руководил работами по созданию оригинальной технологии сваркопайки полупроводниковых диодов средней мощности. Огромный объем работ выполнен им по разработке припоев, заменяющих серебросодержащие, которые были внедрены на десятках предприятий. Под его руководством в Украине созданы водородно-кислородные генераторы производительностью до 1,5 м³/ч для пайки и сварки.

Особое внимание Алексей Анатольевич уделял подготовке кадров для пайки. На проводимые им ежегодные семинары собирались специалисты со всего Советского Союза. Он активно участвовал в жизни единственной в СССР кафедры пайки Тольяттинского политехнического института.

Под руководством А. А. Россошинского были подготовлены четыре доктора и 21 кандидат наук. Он опубликовал 4 монографии, более 220 статей и получил около 80 авторских свидетельств СССР.

Память об Алексее Анатольевиче как о хорошем человеке, друге, известном ученом сохраняют его многочисленные друзья, ученики и коллеги.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона
Редколлегия журнала «Автоматическая сварка»

ПОДПИСКА — 2011 на журнал «Автоматическая сварка»

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
	480 грн.	960 грн.	2100 руб.	4200 руб.	78 дол. США	156 дол. США

*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Если Вас заинтересовало наше предложение по оформлению подписки непосредственно через редакцию, заполните, пожалуйста, купон и отправьте заявку по факсу или электронной почте.

Контактные телефоны: (38044) 287-63-02, 271-26-23; факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23.

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

ПОДПИСНОЙ КУПОН	
Адрес для доставки журнала _____	
Срок подписки с _____	20 г. по _____ 20 г. включительно
Ф. И. О. _____	
Компания _____	
Должность _____	
Тел., факс, E-mail _____	



РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (1905 190мм) — 700\$
 Вторая страница обложки (2005 290мм) — 550\$
 Третья страница обложки (2005 290мм) — 500\$
 Четвертая страница обложки (2005 290мм) — 600\$

Обложка внутренняя, полноцветная

Первая страница обложки (2005 290мм) — 400\$
 Вторая страница обложки (2005 290мм) — 400\$
 Третья страница обложки (2005 290мм) — 340\$
 Четвертая страница обложки (2005 290мм) — 340\$

Внутренняя вставка

Полноцветная (разворот А3) (4005 290мм) — 570\$
 Полноцветная (2005 290мм) — 340\$
 Полноцветная (2005 142мм) — 170\$
 Реклама в разделе информации
 Полноцветная (1655 245мм) — 300\$
 Полноцветная (1655 120мм) — 170\$
 Полноцветная (825 120мм) — 80\$
 • Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
 • Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
 • Статья на правах рекламы (страница А4, 1705 240мм) — 170\$
 • При заключении рекламных контрактов на сумму, превышающую 1000\$, предусмотрена гибкая система скидок

Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 2005 290мм
- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5мм 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
- К файлам должна прилагаться распечатка (макеты в формате Word не принимаются)

Подписано к печати 11.10.2010. Формат 605 84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 9,09. Усл.-отт. 9,67. Уч.-изд. л. 10,22 + 2 цв. вклейки. Цена договорная.

Печать ООО «Фирма «Эссе». 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

Powermax от Hypertherm: универсальный инструмент плазменной резки

На протяжении более 40 лет американская компания «Hypertherm» занимается разработкой и производством оборудования исключительно для плазменной резки. Каждая система плазменной резки собирается и тестируется на собственных производственных площадях в США. Технологическое новаторство в сочетании с высочайшей производительностью и надежностью по достоинству оценили пользователи, работающего по всему миру оборудования «Hypertherm».

В системах плазменной резки тепловая энергия плазмы используется для плавления металла, а газ высокого давления (воздух или азот) — для выдувания расплавленного металла. В результате получаем практически не требующую обработки кромку реза высокого качества.

В состав системы плазменной резки входят следующие компоненты:

- резак для ручной или механизированной резки
- источник питания переменного тока (стационарный или генератор)
- сжатый воздух (можно также использовать азот) — производственная магистраль, переносной компрессор или баллоны.

Каждая модель линейки Powermax от «Hypertherm» является универсальным инструментом. В мастерской, на заводе, дома и даже в полевых условиях можно выполнять резку и строжку металлов различной толщины и формы.

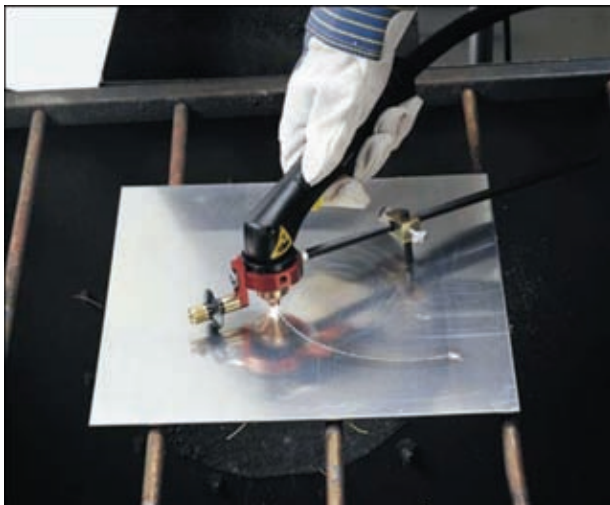
Плазменные системы Powermax можно использовать для резки по шаблонам, резки штабелированных листов, покрашенного или ржавого металла, а также любого другого электропроводного металла, начиная от обычной низкоуглеродистой стали и заканчивая алюминием.

Оборудование серии Powermax часто применяется со столами двумерной резки, роботизированными системами пространственной резки и резки по направляющей, системами резки труб и т. д.

Модельный ряд Powermax компании «Hypertherm» представлен пятью системами.

Модель		Powermax30	Powermax45	Powermax65 (new)	Powermax85 (new)	Powermax1650
Толщина ручной резки	Рекомендуемая ¹⁾	6 мм при 500 мм/мин	12 мм при 500 мм/мин	19 мм при 500 мм/мин	25 мм при 500 мм/мин	32 мм при 500 мм/мин
		10 мм при 250 мм/мин	19 мм при 250 мм/мин	25 мм при 250 мм/мин	32 мм при 250 мм/мин	38 мм при 250 мм/мин
	Предельная ²⁾	12 мм при 125 мм/мин	25 мм при 125 мм/мин	32 мм при 125 мм/мин	38 мм при 125 мм/мин	44 мм при 125 мм/мин
Толщина механизированного прожига (максимальная) ³⁾ , мм		Не применимо	10	12	16	19
Производительность строжки	Количество снимаемого в час металла, кг	Не применимо	2,8	4,8	8,8	9,8
	глубина × ширина, мм	Не применимо	3,3 × 5,5	3,5 × 6,6	5,8 × 7,1	6,6 × 7,1
Выходной ток, А		15-30	20-45	20-65	25-85	30-100
Номинальное выходное напряжение, В		83	132	139	143	160
Масса (с резаком), кг		10	16	26	28	65
Источник газа		Воздух или N ₂	Воздух или N ₂	Воздух или N ₂	Воздух или N ₂	Воздух или N ₂
<p>¹⁾ Рекомендуемая толщина ручной резки — толщина низкоуглеродистой стали, при которой система обеспечивает хорошее качество резки при скорости не ниже 500 мм/мин. Не менее 80 % резки должно выполняться при рекомендуемой толщине.</p> <p>²⁾ Предельная толщина ручной резки — толщина низкоуглеродистой стали, обработка которой целесообразна при скорости не менее 125 мм/мин, но с низким качеством резки. Резку при предельной толщине следует выполнять редко.</p> <p>³⁾ Толщина механизированного прожига — толщина низкоуглеродистой стали, на которой можно выполнять прожиг с хорошим качеством резки без чрезмерного износа расходных деталей. Если применяется пуск на краю, толщина при механизированной резке совпадает с толщиной при ручной обработке.</p>						

* Статья на правах рекламы.



Особое внимание следует уделить новинкам модельного ряда — Powermax65 и Powermax85. Благодаря большому выбору резаков и использованию новаторских технологий, системы Powermax65 и Powermax85 расширяют возможности ручной и механизированной плазменной резки. Четыре типа ручных резаков серии Duratax обеспечивают максимальную универсальность и позволяют с легкостью выбрать наиболее подходящий для работы инструмент. Быстрое переключение между резаками для ручной и механизированной резки стало возможным благодаря функциональной новинке FastConnect. Технология Smart Sense автоматически регулирует давление газа в соответствии с режимом резки и длиной провода резака для достижения оптимальной производительности и качества реза. С помощью технологии Powercool обеспечивается эффективное охлаждение внутренних компонентов системы для увеличения надежности и времени бесперебойной работы. Запатентованная технология цифровой обработки сигналов позволяет увеличить быстродействие системы за счет использования программного обеспечения вместо аппаратных компонентов для управления и контроля.

Оборудование от «Hypertherm» тестируется для экстремальных условий эксплуатации, проходит интенсивное механическое и полное диагностическое тестирование, тем самым гарантируя высочайший уровень надежности.

Низкие эксплуатационные затраты, универсальность и удобство использования делают системы Powermax идеальным выбором для различных сфер применения.

Приглашаем всех желающих посетить стенд компании «Фрониус Украина» на выставке IX «Международный промышленный форум», которая состоится 23–26.11.2010 в г.Киеве. Помимо сварочного оборудования «Fronius», на стенде можно будет ближе познакомиться с системами плазменной резки компании «Hypertherm», задать интересующие вопросы и получить информационные материалы.

Приглашаем всех желающих посетить стенд компании «Фрониус Украина» на выставке IX «Международный промышленный форум», которая состоится 23–26.11.2010 в г.Киеве. Помимо сварочного оборудования «Fronius», на стенде можно будет ближе познакомиться с системами плазменной резки компании «Hypertherm», задать интересующие вопросы и получить информационные материалы.



ОТЛИЧНАЯ СВАРКА

Официальный представитель компании «Hypertherm» в Украине — 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



ГП «Опытный завод
сварочных материалов
ИЭС им. Е.О. Патона
НАН Украины»

**Производство материалов для
дуговой сварки, наплавки и резки:**

Электроды — АНО-4, АНО-4И, АНО-6, АНО-6У, АНО-12, АНО-21, АНО-21М, АНО-21У, АНО-27, АНО-36, АНО-37, МР-3, УОНИ 13/45, УОНИ 13/55, ВН-48, АНО-ТМ, АНО-ТМ/СХ, АНО-ТМ60, АНО-ТМ70, ТМА-1У, ТМА-3У, ЦУ-5, ТМУ-21У, ОЗЛ-6, ОЗЛ-8, ЦЛ-11, ЭА-395/9, ЭА-400/10У, ЦЧ-4, Комсомолец-100, Т-590, АНР-2

Порошковые проволоки — ПП-АН1, ПП-АН3, ПП-АН7, ПП-АН19, ПП-АН19Н, ПП-АН24С, ПП-АН30, ПП-АН59, ПП-АН61, ПП-АН63, ПП-АН67, ПП-АН68М, ПП-АН69, ПП-АН70М, ПП-АНВ2У, ПП-НnX25П4Н3Т, ППС-ЭК1, ППС-ЭК2, ППР-ЭК3, ППР-ЭК4

Флюсы плавные — по ГОСТ 9087-81, а также АН-М13, АН-25, АН-72

Флюсы керамические — АНК-40, АНК-47А, АНК-57, АНК-565

Возможно изготовление других марок материалов

04112, Украина	Тел.:	(044)	456-64-95
г. Киев-112			456-63-69
ул. О. Телиги, 2	Факс:	(044)	456-64-95
			456-63-08

С 1992 г. на рынке сварочного оборудования Украины



предприятие
«Триада-Сварка»
г. Запорожье

- > Разработка и поставка автоматизированных сварочных комплексов
- > Технологическое обеспечение и полная комплектация сварочных производств
- > Ремонт сварочного оборудования, в т. ч. сложного
- > Пуско-наладочные работы
- > Широкий выбор сварочного оборудования



тел. (061) 233 1058, (0612) 34 3623,
(061) 213 2269, 220 0079 e-mail: weld@triada.zp.ua
Сервисный центр: (061) 270 2939. www.triada-weld.com.ua

ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

СпецСплав

ПРОИЗВОДСТВО:

Флюсы сварочные

Проволоки порошковые для внепечной
обработки металлургических расплавов

Проволоки порошковые для сварки, наплавки,
напыления и металлизации

Электроды наплавочные, специального назначения,
для сварки чугуна и резки

Ферросплавы и легатуры

Хром металлический

Комплексные раскислители и модификаторы

ул. Курсантская, 1
г. Днепропетровск
49051, Украина

Тел. (380562) 35-50-25
Тел./факс (38056) 37-41-912
E-mail sp@spetsplav.dp.ua

**НАВКО-
ТЕХ**

Automatic machines and robots for arc welding

**Автоматические установки и роботы
для дуговой сварки и наплавки**



УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ
ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ШВОВ

УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ
КОЛЬЦЕВЫХ ШВОВ

РОБОТОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ СВАРКИ

СВАРОЧНАЯ АППАРАТУРА



Украина, Киев
Тел.: +38 044 456-40-20
Факс: +38 044 456-83-53

<http://www.navko-teh.kiev.ua> E-mail: info@navko-teh.kiev.ua

SELMA ОАО «Электромашиностроительный завод «Фирма СЭЛМА»

Производство электросварочного оборудования

Номенклатура выпускаемого оборудования составляет более 100 наименований сварочной техники для всех видов электродуговой сварки.

- трансформаторы и выпрямители для ручной дуговой сварки
- полуавтоматы для сварки в среде защитных газов
- установки для аргодуговой сварки неплавящимся электродом
- установки воздушно-плазменной резки металла
- сварочные автоматы. Сварочные головки
- машины для контактной точечной сварки
- оборудование для механизации процесса сварки и резки
- оборудование для управления контактными сварочными машинами
- машины для автоматической плазменной резки портального типа
- машины для автоматической резки и разделки кромок под сварку труб
- дизельные сварочные агрегаты типа АДД
- машины для механической подготовки кромок под сварку

Вся продукция фирмы сертифицирована Госстандартами Украины и России. На предприятии внедрена и сертифицирована система обеспечения качества выпускаемой продукции ISO 9001-2001, TUV (Германия).

«Фирма СЭЛМА» проводит гарантийное и сервисное обслуживание оборудования, пусконаладочные работы, обучение и консультации по эксплуатации сварочного оборудования.



95000, г. Симферополь, Украина,
ул. Генерала Васильева, 32А
Отдел маркетинга и сбыта: +38 (0652) 66-85-37, 58-30-55
Факс: +38 (0652) 58-30-53
E-mail: sales@selma.crimea.ua http://www.selma.ua

ОАО «ЗАПОРОЖСТЕКЛОФЛЮС»

69035, Украина г. Запорожье, ул. Диагональная, 2
Тел.: +380 (61) 289-03-53; факс: +380 (61) 289-03-50
E-mail: market@steklo.zp.ua

ОАО «Запорожский завод сварочных флюсов и стеклоизделий» на протяжении многих лет является одним из крупнейших в Европе производителей сварочных флюсов и силикатов натрия растворимого. На сегодня мы предлагаем более 20 марок сварочных флюсов.

На заводе разработана и внедрена Система управления качеством с получением сертификатов TUV NORD SERT на соответствие требованиям стандарта DIN EN ISO 9001-2000 и научно-технического центра «СЕПРОЗ» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины на соответствие требованиям ДСТУ ISO 9001-2001.

Благодаря тесному сотрудничеству с Институтом электросварки им. Е. О. Патона ОАО «Запорожстеклофлюс» освоил производство сварочных флюсов новым методом – двойным рафинированием сплава.

Сварочные флюсы для автоматической, полуавтоматической сварки и наплавки углеродистых и низколегированных сталей: АН 348-А, АН-348-АМ, АН-348-АД, АН-348-АП, АН-47, АН-47Д, АН-47П, АН-60, ОСЦ-45, АНЦ-1А, ОСЦ-45 мелкой фракции (ГОСТ 9087-81, ТУ У 05416923.049-99, ГОСТ Р 52222-2004).

Силикат натрия растворимый (модуль от 2,0 до 3,5). Широко применяется для изготовления жидкого стекла и сварочных электродов.

МЫ ВСЕГДА ГАРАНТИРУЕМ СТАБИЛЬНОСТЬ ПОСТАВОК И САМЫЕ НИЗКИЕ ЦЕНЫ В СНГ
Наша цель — более полное удовлетворение Ваших потребностей в качественных и современных сварочных материалах.



STEIN-MEGAFIL®

МЫ НЕ ИЗОБРЕЛИ КОЛЕСО,
НО МЫ ИЗОБРЕЛИ
ПРОВОЛОКУ.



STEIN-MEGAFIL® - для решения Ваших задач в области сварки. Эта полностью бесшовная порошковая проволока с уникальными сварочными свойствами создана для удовлетворения Ваших требований к сварке. Она отличается высокой конструктивной размерной стабильностью, не скручивается, не деформируется, благодаря чему идеально подходит для прецизионной сварки. Проволока влагостойка и, следовательно, не требует повторной сушки. Кроме того, она обладает прекрасной электропроводностью и обеспечивает стабильность горения дуги и формирования жидкой ванны.

DRAHTZUG STEIN
wire & welding

Drahtzug Stein
67317 Altleiningen (Germany)
Tel: +49(0)6356 966-0 info@drahtzug.com
Fax: +49(0)6356 966-114 www.drahtzug.com

Официальный представитель в Украине
АРКСЭЛ
83017, г. Донецк, пер. Вятский, 2а
тел.: (062) 332-2650(52) info@arcsel.dn.ua
тел./факс: 382-9449, 332-2651 www.arcsel.dn.ua

ОАО "ЗОНТ"

ПРОИЗВОДСТВО:

МАШИН ФИГУРНОЙ ГАЗОКИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ "АСШ-70М";
 МАШИН ДЛЯ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ "МЕТЕОР";
 МАШИН ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ "КОМЕТА М";
 МАШИН ДЛЯ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ "МАРИНА";
 МАШИН ПЛАЗМЕННОЙ И ГАЗОКИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ С
 ЧПУ для фигурной резки ТРУБ;
 ПЕРЕНОСНЫХ ГАЗОРЕЖУЩИХ МАШИН "РАДУГА";
 НАСОСОВ, ТЕПЛООБМЕННИКОВ И ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ДЛЯ
 КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ.

ПОСТАВКА
 ИСТОЧНИКОВ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ.
 КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ И
 МОДЕРНИЗАЦИЯ
 МАШИН ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛА.



ОАО "ЗОНТ" (ТОРГОВАЯ МАРКА «АВТОГЕНМАШ»)
 65104, УКРАИНА, Г. ОДЕССА, ПР-Т. МАРШАЛА ЖУКОВА 103.

Т. + 38 (048) 717-00-50, E-MAIL: OAOZONT@ZONT.COM.UA
 715-69-40, WWW.ZONT.COM.UA
 Ф. +38 (048) 715-69-50 WWW.AUTOGENMASH.COM

Днепрометиз
 Группа предприятий «Северсталь-метиз»

ОАО "Днепрометиз" - крупнейшее предприятие
 Украины в своей отрасли, входит в международную
 группу производителей "Северсталь-метиз"

e-mail: sale@dm.severstalmetiz.com

т/ф: (0562) 34-82-24, 35-83-69, 35-15-97
 Украина, 49081, г. Днепропетровск, пр. им. газеты „Правда“, 20

ПРОВОЛОКА:
 сварочная Св-08 (А), Св-08Г2С
 Вр-1 для армирования ЖБК
 общего назначения без покрытия
 термообработанная черная
 оцинкованная
 колючая

СЕТКИ:
 плетеные
 сварные
 рифленые

ЭЛЕКТРОДЫ:
 МР-3
 АНО-4
 АНО-6
 АНО-21
 УОНИ

ГВОЗДИ
 БОЛТЫ
 ГАЙКИ
 ШАЙБЫ

www.dneprometiz.com.ua



Каховский завод
 электросварочного оборудования

74800 Украина, г. Каховка. Телефон: +38 (050530) 2-99-82, 2-10-72
market@kzeso.com www.kzeso.com



СИЛА ПРОТИВОПОЛОЖНОСТЕЙ,,,

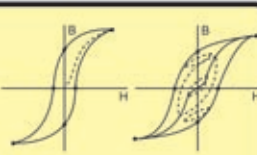


КЗЭСО

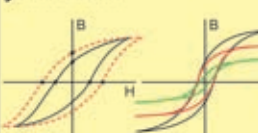
Специальные Научные Разработки **СНР**
 Научно-производственная фирма

Магнитные материаловедческие измерения

✓ С измерением характеристик петли магнитного гистерезиса на стационарных высокоточных (баллистических) установках.



✓ Оценка деградации (микрповрежденности) металлов по наиболее чувствительному магнитному параметру.



✓ Разработка и поставка магнитоизмерительных установок, комплексов, приборов:

- универсальных и специализированных;
- стационарных, настольных, портативных, автономных;
- для научных, учебных, производственных, диагностических задач;
- для входного, сдаточного, технологического контроля;
- измерения по любым национальным и зарубежным стандартам;
- быстро и точно, за минуты – объем измерений, как ранее – за часы;
- модернизируем старые установки, купим их фрагменты.

► Мировая новизна принципов и продуктивности измерений.
 ► Лучшее сочетание цена / качество.

Украина, 61121, г. Харьков, ул. Светлая, 10/16; тел./факс +38 (057) 771-65-91, 738-32-06
www.snr-nift.com | e-mail: mail@snr-nift.com
 в Москве - ООО "Магнитометрическая диагностика", +7 (499) 592-93-91, mail@mdtag.ru

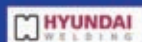
Разработка, производство, внедрение

СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Проволоки
порошковые для
сварки и наплавки,
проволоки сплошные,
электроды, флюс,
наплавочные установки



ООО «НПФ «Элна» является разработчиком и производителем порошковых проволок для сварки и наплавки, а также представителем компаний WELDING ALLOYS GROUP (Англия) и HYUNDAI WELDING Co. Ltd (Южная Корея) в Украине



ООО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА «Элна»
ул. Антоновича, 69, г. Киев, 03150, Украина
тел. (044) 200-80-25, 200-85-17, факс (044) 200-85-17
e-mail: mfo@elna.com.ua www.elna.com.ua



ЗАВОД АВТОГЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ДОНМЕТ[®]
Украина, г. Краматорск, тел./факс: (06264) 5-77-13
svarka@donmet.com.ua www.donmet.com.ua

**Все для газовой резки и сварки.
Электросварка.**

**100% гарантия от
производителя**

GYS **ТБ**
ДОНМЕТ[®]

ФИРМЕННАЯ ТОРГОВАЯ СЕТЬ

КИЕВ • ДОНЕЦК
Тел./факс (044) 404-38-72 Тел./факс (062) 381-88-93

ЗАПОРОЖЬ
Тел./факс (061) 224-11-56

ПУГАНСК • ОДЕССА
Тел./факс (0642) 71-51-65 Тел./факс (048) 785-19-65



Plasma Master Научно-производственная фирма
ПЛАЗМА-МАСТЕР ЛТД.
Лидер в Украине в области плазменно-порошковой наплавки

- Оборудование для плазменно-порошковой наплавки
- Плазмтроны для наплавки различных модификаций
- Технологические разработки в области плазменной наплавки
- Услуги по наплавке деталей машин

Ручная плазменно-порошковая наплавка - прекрасный инструмент в ремонте!

Украина, 03680, Киев
ул. Кржижановского, 3
тел./факс: +38 044 537-31-44
office@plasma-master.com.ua
www.plasma-master.com.ua