



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. Патон

Ученые ИЭС им. Е. О. Патона

С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),

В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),

Ю. С. Борисов, Г. М. Григоренко,

А. Т. Зельниченко, В. В. Кныш,

И. В. Кривцун, Ю. Н. Ланкин,

Л. М. Лобанов,

В. Д. Позняков, И. А. Рябцев,

В. Ф. Хорунов, К. А. Ющенко

Ученые университетов Украины

М. Н. Брыков, ЗНТГУ, Запорожье,

В. В. Дмитрик, НТУ «ХПИ», Харьков,

В. Ф. Квасницкий, НУК, Николаев,

В. Д. Кузнецов, НТУУ «КПИ», Киев

Зарубежные ученые

Н. П. Алешин

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ

Гуань Цяо

Ин-т авиационных технологий, Пекин, Китай

А. С. Зубченко

ОКБ «Гидропресс», Подольск, РФ

М. Зиниград

Ун-т Иудеи и Самарии, Ариэль, Израиль

В. И. Лысак

Волгоградский гос. техн. ун-т, РФ

У. Райсген

Ин-т сварки и соединений, Аахен, Германия

Я. Пилярчик

Ин-т сварки, Гливице, Польша

О. И. Стеклов

РНТСо, Москва, РФ

Г. А. Туричин

С.-Петербургский гос. политехн. ун-т, РФ

Редакторы

Т. В. Юштина, Н. А. Притула

Электронная верстка

И. Р. Наумова, А. И. Сулима, Д. И. Середа

Адрес редакции

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ

03680, Украина, Киев-150,

ул. Боженко, 11

Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277

Факс: (38044) 200 5484, 200 8277

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Учредители

Национальная академия наук Украины,

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ,

МА «Сварка» (издатель)

Свидетельство о государственной

регистрации КВ 4788 от 09.01.2001

ISSN 0005-111X

Журнал входит в перечень утвержденных

Министерством образования и науки

Украины изданий для публикации трудов

соискателей ученых степеней

За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности не несет

Цена договорная

Издается ежемесячно

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- Патон Б.Е., Калеко Д.М., Кедровский С.Н., Коваль Ю.Н., Кривцун И.В., Слепенко В.Н.* Сварка сопротивлением сплава системы медь–алюминий с эффектом памяти формы 3
- Максимова С.В., Хорунов В.Ф., Мясоед В.В.* Влияние депрес-сантов и основного металла на микроструктуру паяных швов соединений сплава на основе Ni₃Al со сплавом Инконель 718 9
- Хаскин В.Ю., Коржик В.Н., Сидорец В.Н., Бушма А.И., Ву Бойи, Ло Зие.* Повышение эффективности гибридной сварки алюминиевых сплавов 15
- Цыбулькин Г.А.* О влиянии электрической емкости в свароч-ной цепи на устойчивость режима дуговой сварки 21
- Дмитрик В.В., Соболев О.В., Погребной М.А., Глушко А.В.* Ищенко Г.И. Структурные изменения металла сварных соединений паропроводов в процессе эксплуатации 26

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- Нестеренков В.М., Кравчук Л.А., Архангельский Ю.А., Петрик И.А., Марченко Ю.А.* Электронно-лучевая сварка камеры среднего давления газотурбинного двигателя 31
- Зубченко Ю.В., Терновой Е.Г.* Разработка новых эмиссионных систем электронно-лучевых пушек для технологических работ в условиях космоса 36
- Левченко О.Г., Максимов С.Ю., Лукьяненко А.О., Лендел И.В.* Сравнительная гигиеническая оценка процесса дуговой сварки с постоянной и импульсной подачей электродной проволоки 41

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Диссертация на соискание ученой степени 47

ХРОНИКА

- 68-я Ежегодная Ассамблея Международного института сварки IIW 2015 48
- Технический семинар «TPS/Robotics — роботизация свароч-ных процессов. Новые решения от Fronius» 56
- Отчетно-выборная конференция Общества сварщиков Украины 57
- К.А.Ющенко — 80 58

Информация

- Машины для контактной стыковой сварки ленточных пил, прутков, проволок и стержней 60
- Программы профессиональной подготовки на 2016 г. 64
- Указатель статей за 2015 г. 67
- Указатель авторов 72

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

B. E. Paton

Scientists of PWI, Kyiv

S. I. Kuchuk-Yatsenko (vice-chief ed.),

V. N. Lipodaev (vice-chief ed.),

Yu. S. Borisov, G. M. Grigorenko,

A. T. Zelnichenko, V. V. Knysh,

I. V. Krivtsun, Yu. N. Lankin,

L. M. Lobanov,

V. D. Poznyakov, I. A. Ryabtsev,

V. F. Khorunov, K. A. Yushchenko

Scientists of Ukrainian Universities

M. N. Brykov, ZNTSU, Zaporozhje

V. V. Dmitrik, NTU «KhPI», Kharkov

V. F. Kvasnitskii, NUS, Nikolaev

V. D. Kuznetsov, NTUU «KPI», Kyiv

Foreign Scientists

N. P. Alyoshin

N.E. Bauman MSTU, Moscow, Russia

Guan Qiao

Beijing Aeronautical Institute, China

A. S. Zubchenko

OKB«Gidropress», Podolsk, Russia

M. Zinigrad

College of Judea & Samaria, Ariel, Israel

V. I. Lysak

Volgograd State Technical University, Russia

Ya. Pilarczyk

Welding Institute, Gliwice, Poland

U. Reisgen

Welding and Joining Institute, Aachen, Germany

O. I. Steklov

Welding Society, Moscow, Russia

G. A. Turichin

St. Petersburg State Polytechn. Univ., Russia

Editors

T. V. Yushchina, N. A. Pritula

Electron galley

I. R. Naumova, A. I. Sulima, D. I. Sereda

Address of Editorial Board:

11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine

Tel.: (38044) 200 63 02, 200 82 77

Fax: (38044) 200 54 84, 200 82 77

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,

Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine,

IA «Welding» (Publisher)

State Registration Certificate

KV 4788 of 09.01.2001

ISSN 0005-111X

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

Published monthly

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

- Paton B.E., Kaleko D.M., Kedrovsky S.N., Koval Yu.N., Krivtsun I.V., Slepchenko V.N.* Resistance welding of shape-memory alloy of copper-aluminium system 3
- Maksimova S.V., Khorunov V.F., Myasoed V.V.* Effect of depressants and base metal on microstructure of brazed welds of joints of Ni₃Al-based alloy with alloy Inconel 718 9
- Khaskin V.Yu., Korzhik V.N., Sidoretz V.N., Bushma A.I., Wu Boyi, Luo Ziyi.* Improvement of efficiency of hybrid welding of aluminium alloys 15
- Tsybulkin G.A.* About effect of electrical capacitance in welding circuit on the stability of arc welding conditions 21
- Dmitrik V.V., Sobol O.V., Pogrebnoj M.A., Glushko A.V., Ishchenko G.I.* Structural changes in welded joint metal of steam pipelines during service 26

INDUSTRIAL

- Nesterenkov V.M., Kravchuk L.A., Arkhangelsky Yu.A. Petrik I.A., Marchenko Yu.A.* Electron beam welding of medium-pressure chamber of gas turbine engine 31
- Zubchenko Yu.V., Ternovoy E.G.* Development of new emission systems of electron beam guns for technological works in space conditions 36
- Levchenko O.G., Maksimov S.Yu., Lukyanenko A.O., Lendel I.V.* Comparative hygienic evaluation of arc welding process at constant and pulsed feeding of electrode wire 41

BRIEF INFORMATION

- Thesis for scientific degree 47

NEWS

- 68th Annual Assembly of International Welding Institute
- Technical seminar «TPS/Robotics — robots for welding processes IIW 2015» 48
- New solutions from Fronius 56
- Reporting-Election Conference of Society of Welders of Ukraine 57
- K.A.Yushchenko is 80 58

Information

- Machines for flash-butt welding of band saws, rods, wires and bars 60
- Programs of professional training for 2016 64
- Index of articles for 2015 67
- Index of authors 72



УДК 621.791.763.1

СВАРКА СОПРОТИВЛЕНИЕМ СПЛАВА СИСТЕМЫ МЕДЬ-АЛЮМИНИЙ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Б.Е. ПАТОН¹, Д.М. КАЛЕКО¹, С.Н. КЕДРОВСКИЙ², Ю.Н. КОВАЛЬ², И.В. КРИВЦУН¹, В.Н. СЛЕПЧЕНКО²

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Ин-т металлофизики им. Г.В.Курдюмова НАН Украины. 03680, Киев-142, бульв. Акад. Вернадского, 36.
E-mail: metall@imp.kiev.ua

Перспективной заменой дорогостоящим сплавам с эффектом памяти формы (СЭПФ) системы Ti–Ni в крепежных изделиях, активаторах термоавтоматики и сверхупругих элементах приборов служат СЭПФ на основе системы Cu–Al. Поэтому приобрела актуальность проблема соединения последних в различных сочетаниях с подобным материалом и другими конструкционными металлами. Основным требованием к таким соединениям, кроме прочности, является сохранение функциональных характеристик, а именно, температурного диапазона восстановления формы при термоупругом мартенситном превращении. Исследовалась свариваемость сплава системы Cu–Al в виде фольги толщиной 0,05 мм, ленты толщиной 0,3 мм и проволоки диаметром 1,0 мм методами точечной и стыковой конденсаторной сварки и показано, что при импульсном сварочном нагреве в соединениях с прочностью на разрыв, соответствующей прочности основного металла, сохраняются функциональные характеристики вблизи места сварки. Металлографические исследования показали рекристаллизацию исходного крупнокристаллического металла в зоне сварочного нагрева с образованием мелкокристаллической структуры как в соединениях в твердом состоянии, так и вокруг литого ядра при точечной сварке ленты толщиной 0,3 мм. Получены удовлетворительные стыковые соединения СЭПФ и медной проволоки. Библиогр. 5, табл. 1, рис. 10.

Ключевые слова: сплавы с эффектом памяти формы, медноалюминиевые сплавы, контактная точечная сварка, контактная стыковая сварка, термоупругое мартенситное превращение.

Сплавы, характеризующиеся эффектом термоупругости, так называемые сплавы с эффектом памяти формы, находят все более широкое применение в изделиях медицинской техники (импланты, протезы, инструмент), в составе активаторов термодетекторов и в монтажных устройствах для герметичных механических соединений, например, трубопроводов.

Наибольшее применение сегодня находят сплавы на основе интерметаллического соединения NiTi почти эквиатомного состава (нитинол) с добавками легирующих элементов, расширяющих их функциональные возможности. Главным достоинством нитинола является его биоинертность и атоксичность, что критически важно при изготовлении изделий медицинской техники. В иных случаях применения используют присущую нитинолу сверхупругость, которая проявляется при температурах выше конца аустенитного превращения [1–3].

Нитинол не единственный известный сплав с эффектом памяти формы. Явление термоупругости наблюдается еще в ряде сплавов, из которых наиболее технологичны сплавы на основе Cu–Al. К достоинствам таких сплавов по сравнению с нитинолом относятся пониженная стоимость исходного материала и простота технологии их выплавки, что является важным в связи с расширением

применения СЭПФ в технике, а также более высокий, чем у нитинола, температурный интервал мартенситных превращений [3].

Свариваемость нитинола как в твердом, так и в расплавленном состоянии изучалась рядом исследователей. Анализ этих работ [4] показал, что наиболее эффективны методы соединения с импульсным нагревом, когда в зоне сварки не успевают пройти реакции изменения стехиометрического состава NiTi с выделением фаз с иной химической формулой (Ti₂Ni и TiNi₃). К таким способам относятся точечная и ударная конденсаторная сварка деталей плоского и круглого сечения с характерным размером до 1 мм.

Учитывая перспективность применения медно-алюминиевых сплавов в технике, актуальным является поиск соответствующих методов сварки деталей малого сечения из этих сплавов.

Исследования проводили с образцами из сплава системы Cu–Al, имеющими механические характеристики и температуру потери упругости более высокие, чем у двойного сплава [3].

Химический состав исследуемого сплава в исходном состоянии, мас. %: 0,162 Ni; 0,85 Co; 0,22 Fe; 3,79 Mn; 11,1 Al; 83,9 Cu.

Сварку сопротивлением сплава системы Cu–Al исследовали на образцах из фольги толщиной 50 мкм, полосы толщиной 300 мкм и проволоки

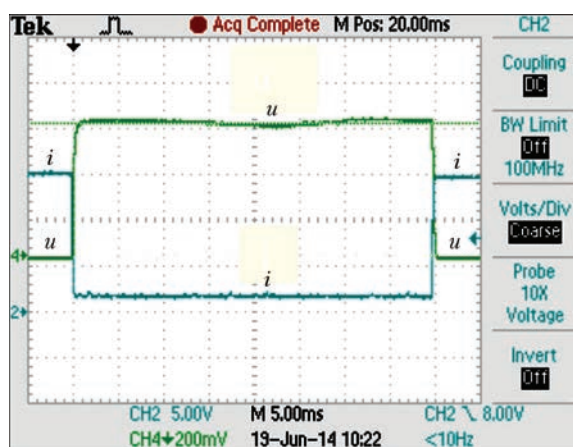


Рис. 1. Осциллограмма разрядного тока суперконденсаторов и электрического напряжения на образцах, соединяемых при стыковой сварке меди диаметром 0,8 мм и СЭПФ на основе Cu–Al диаметром 1,0 мм

диаметром 1,0 мм. Качество соединений оценивали по механической прочности, а также сравнением температур фазового перехода исходного металла и сварного соединения.

Нахлесточные соединения плоских образцов сваривали на конденсаторной машине ТКМ-17 [5]. Особое внимание, учитывая высокую тепло- и электропроводность испытуемого материала, уделялось выбору материала электрода. Эксперименты показали, что при точечной сварке фольги лучший результат получается с электродами, имеющими молибденовую вставку, ограничивающую теплоотвод от свариваемого соединения, а при сварке полосы можно использовать обычные [5] электроды из известного сплава МЗЦ.

Поверхность деталей не требовала специальной подготовки, если на ней не было окалина после прокатки.

Оптимальный режим сварки (таблица) определяли по результатам механических испытаний на растяжение образцов, изготовленных из фольги, на разрывной машине РМУ-005-01, а из полосы — на машине Р-05.

Оптимальные режимы точечной конденсаторной сварки фольги и ленты из СЭПФ на основе Cu–Al (емкость конденсаторов 200 мкФ, количество витков дросселя 140)

Образец (толщина, мм)	Напряжение зарядки конденсаторов, В	Коэффициент трансформации	Усилия сжатия, даН
Фольга (0,05)	600	200	15
Полоса (0,30)	750	150	30

Образцы стыковой контактной сварки проволоки получили на лабораторной установке с использованием разрядного тока суперконденсаторов, обеспечивающих постоянство электрических характеристик за время сварки. Как показывает осциллограмма (рис. 1), при разряде суперконденсаторов емкостью 50 Ф в течение 40 мс значение сварочного тока практически не меняется. Это делает процесс сварки разрядом суперконденсаторов подобным сварке на постоянном токе. При этом нет необходимости сглаживать искажения тока, связанные с его выпрямлением.

Переменными параметрами режима были напряжение зарядки конденсаторов (7...30 В), продолжительность разряда (2 ... 10 мс), усилия сжатия (30 ... 50 Н). Контроль значений тока и времени нагрева проводили с помощью осциллографа TDS 2004. Качество соединения определяли изгибом сварного образца (однородных соединений) и растяжением (в том числе и соединений с медной проволокой) на машине РМУ-0,05-01. Качественными считались образцы, которые при изгибе разрушались на расстоянии не менее 2...3 мм от плоскости стыка.

Микроструктуру сварных соединений исследовали на микроскопе AXIOVERT 40 MAT.

Контроль характеристических температур мартенситного превращения образцов сложного легированного сплава Cu–Al проводили измерением температурной зависимости электросопротивления.

При испытаниях прочности на растяжение образцов как из фольги, так и полосы, выполненных точечной сваркой, соединение разрушается с вырывом материала (рис. 2). Вырыв из полосы

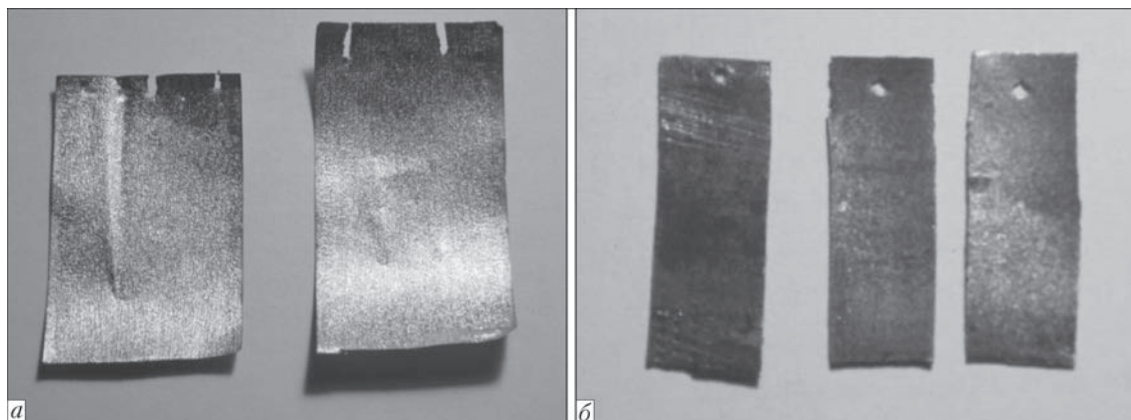


Рис. 2. Образцы, выполненные точечной конденсаторной сваркой после испытаний на разрыв: а — фольга толщиной 0,05 мм; б — полоса толщиной 0,3 мм

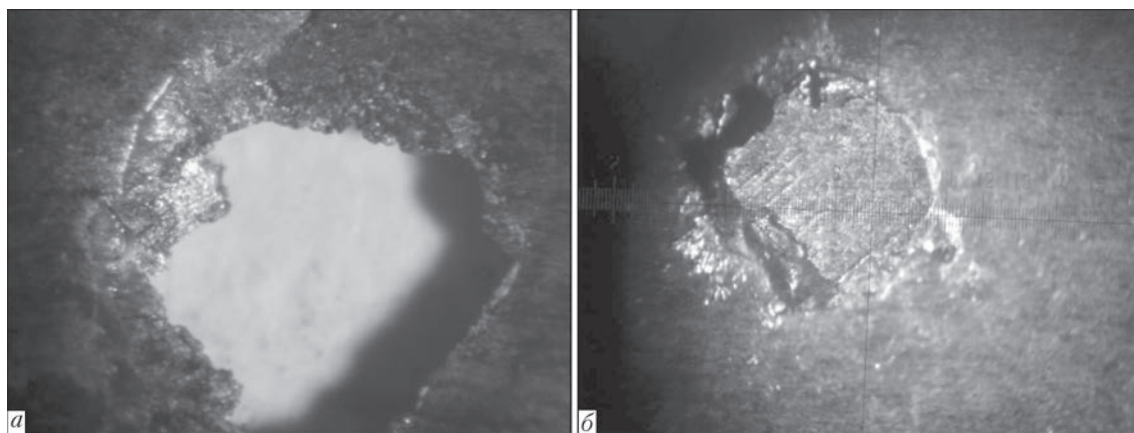


Рис. 3. Форма разрушения точечного соединения полосы толщиной 0,3 мм после нагрузки растяжением

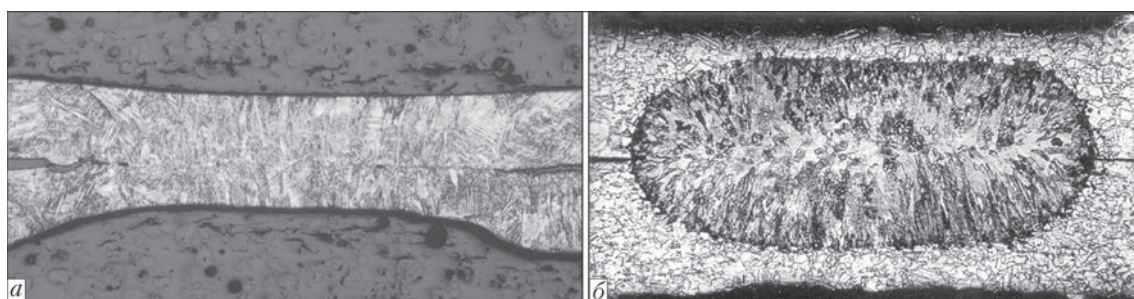


Рис. 4. Микроструктура точечного соединения фольги толщиной 0,05 мм (*а*, $\times 300$) и полосы толщиной 0,3 мм (*б*, $\times 100$)

(рис. 3) не имеет форму правильного круга, что соответствовало бы контактной поверхности электрода, но вытянут в направлении приложения нагрузки, а вырванная часть соединения коническая.

Для повышения точности измерений эксперименты на фольге шириной 25 мм проводили с различным количеством точек в соединении (от двух до пяти точек в один ряд). Средняя прочность одной точки в таких соединениях составляла 0,46 даН. Усилие разрушения точечного соединения полосы составило $80 (\pm 5)$ даН.

Металлографический анализ структуры образцов точечной сварки материала различной толщины (50 и 300 мкм) показал существенную разницу в типе образования соединения. Если при точечной сварке фольги, учитывая большую удельную нагрузку при сварке, соединение произошло в

твердом состоянии (рис. 4, *а*), то в соединении полосы образовывалось литое ядро (рис. 4, *б*).

Из сравнения структуры центральной зоны соединения и его периферии (рис. 5) видно, что металл фольги, используемой в исследовании, имел исходную крупнозернистую структуру, которая создавалась в результате отжига в процессе протяжки при изготовлении. Однако при точечной сварке в твердом состоянии прошла перекристаллизация металла в зоне нагрева и образование столбчатых кристаллитов в направлении теплоотвода.

Благодаря импульсному режиму нагрева при сварке разрядом конденсаторов, зона соединения имеет небольшую длину и структурные изменения, обнаруженные при исследовании, не влияют на функциональные свойства сплава с памятью формы.

В образцах толщиной 0,05 мм, наиболее чувствительных к нагреванию, была исследована

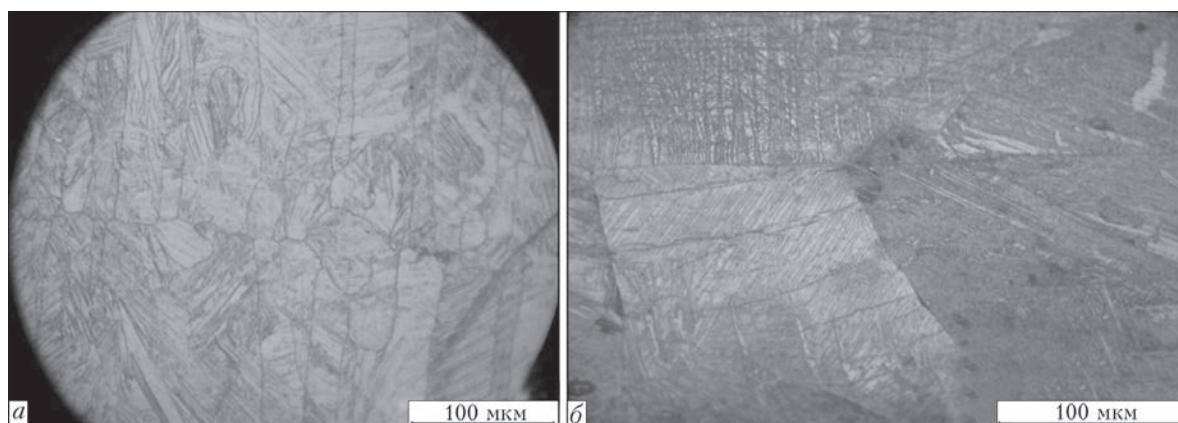


Рис. 5. Микроструктура зоны точечной сварки фольги: *а* — центральная часть; *б* — основной металл

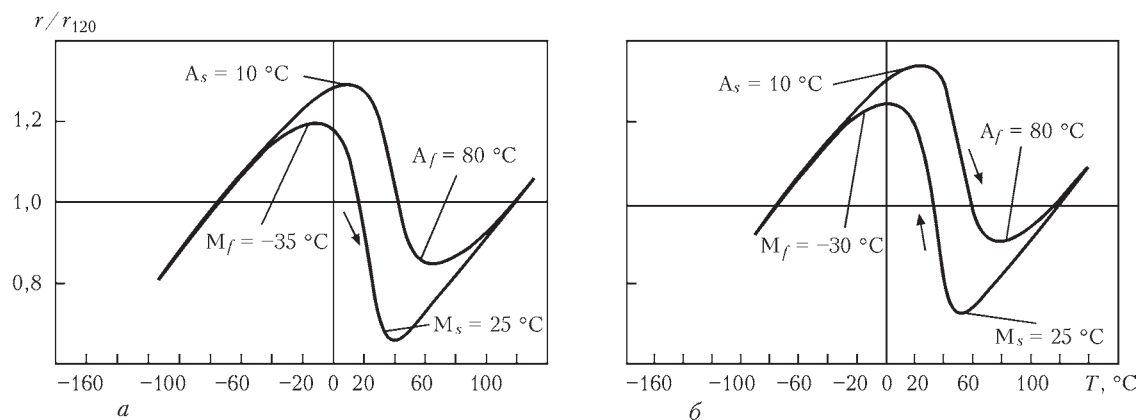


Рис. 6. Зависимость электросопротивления образцов от температуры: *a* — вне зоны термического воздействия; *б* — вблизи зоны термического воздействия сварки; r_{120} — сопротивление при 120 °C

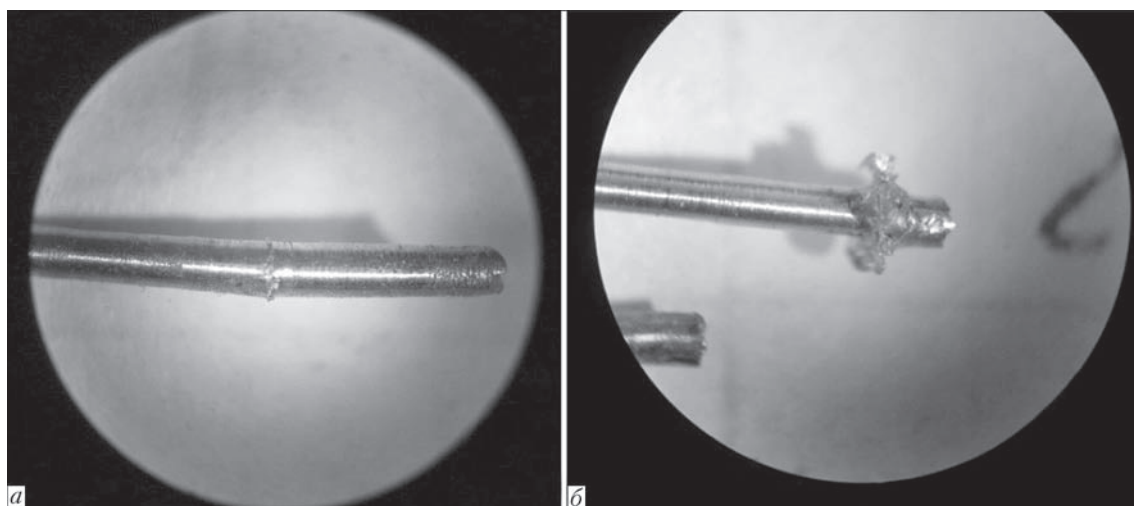


Рис. 7. Внешний вид стыковых соединений проволоки диаметром 1,0 мм: *a* — после сварки (1250 А, 4,7 мс); *б* — после испытания на изгиб (610 А, 100 мс)

зависимость электросопротивления от температуры в состоянии перед сваркой и после нее. Установлено, что в металле, который не подвергался термическому воздействию, изменение параметров мартенситного превращения не наблюдается (рис. 6, *a*). Вблизи зоны термического влияния (на расстоянии 3...5 мм) наблюдается некоторое повышение температуры конца мартенситного превра-

щения (рис. 6, *б*). Исследовать зону сварного шва на наличие и параметры мартенситного превращения не представляется возможным ввиду ее малого размера.

Внешний вид стыковых соединений проволоки диаметром 1,0 мм из сплава системы Cu–Al, сваренных на разных режимах, показан на рис. 7.

Металлографические исследования показали (рис. 8), что при стыковой сварке исследуемого сплава соединение происходит в твердом состоянии со случайным формированием общих зерен. Характерной особенностью микроструктуры вблизи линии раздела является наличие черточек, которые невозможно убрать шлифовкой. В отличие от точечной сварки (см. рис. 5), при сварке в твердом состоянии исходная структура металла не изменяется. Теплоотвод в цанговые стальные зажимы при стыковой сварке значительно меньше, чем в медные электроды точечной машины.

Следует отметить, что металлографические исследования стыковых соединений проводили на образцах, выдержавших изгиб с изломом вне стыка.

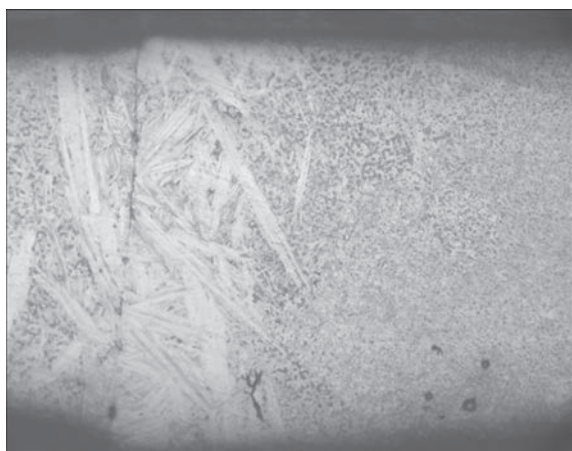


Рис. 8. Микроструктура ($\times 100$) соединения двух проволок диаметром 1,0 мм из сплава Cu–Al, полученного стыковой конденсаторной сваркой

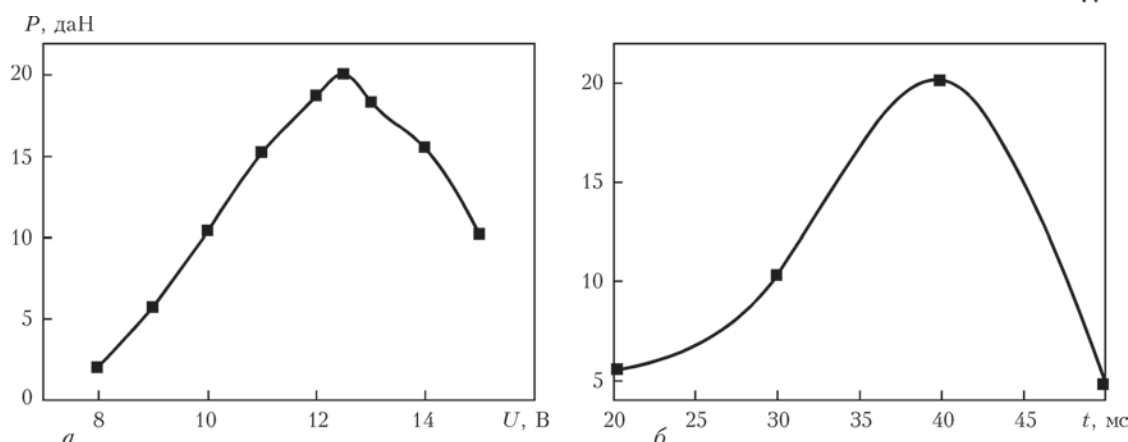


Рис. 9. Зависимость прочности стыковых соединений медной проволоки с проволокой из сложнолегированного сплава на основе Cu–Al от напряжения заряда суперконденсаторов (а, $t = 40$ мс) и времени включения сварочного тока (б, $U = 12,5$ В)

Резистометрия показала, что, как и при исследовании образцов точечных соединений ленты и фольги, в периферийной зоне сварного стыкового соединения изменение температуры мартенситного превращения не наблюдается.

Практическое значение имеют соединения функционального материала с конструкционным металлом, особенно с высокоэлектропроводными медью и алюминием.

Исследовали стыковые соединения сложнолегированного сплава на основе Cu–Al (проволока диаметром 1,0 мм) с медной проволокой (диаметр 0,8 мм). Максимальная прочность соединения, определенная испытанием на растяжение, получена при напряжении заряда суперконденсаторов 12,5 В, сварочном токе 1152 А (см. рис. 1), продолжительности разряда 40 мс, длине свободного конца медной проволоки 2 мм, а проволоки из СЭПФ на основе Cu–Al — 3 мм и усилию осадки 30 Н. При выборе длины свободного конца образцов учитывали малую продольную устойчивость меди. Интересно также отметить на осциллограмме снижение напряжения на свариваемых деталях, связанное, по нашему мнению, с увеличением площади контакта. Это происходит до 25 мс, после чего напряжение возрастает в соответствии с увеличением сопротивления свариваемых деталей при нагревании.

При исследовании варьировались время сварки и напряжение заряда конденсаторов, которое определяет значение сварочного тока. Результаты зависимости прочности соединений от переменных параметров режима представлены на рис. 9. Поскольку напряжение зарядки конденсаторов измеряется значительно точнее, чем импульсный ток разряда, в качестве аргумента было выбрано первое.

Зависимости прочности стыковых соединений от напряжения заряда и времени сварочного тока показывают наличие оптимума параметров режима. Если рост прочности при повышении напряжения зарядки конденсаторов (значения

сварочного тока) и времени разряда легко объясняется увеличением площади соединения при росте энергии, расходуемой при сварке, то снижение прочности после прохождения точки экстремума, как показало изучение сварных образцов, связано с выплавлением значительного количества материала (рис.10). Вследствие этого, при оптимальном значении второго параметра остатка твердого металла в зажимах сварочной головки было недостаточно для надежного его деформирования при осадке. Увеличение же вылета проволоки из цангового зажима приводило к потере продольной устойчивости. При повышении значений параметров режима выше приведенных на рис. 9 прочность снизилась до нуля, так как проволока полностью выплавлялась вплоть до контакта цанговых зажимов.

Особенностью стыковых соединений разнородных металлов является более интенсивный нагрев проволоки из сложнолегированного сплава на основе Cu–Al по сравнению с медной проволокой, имеющей большую электропроводность, несмотря на меньший диаметр.

В сварных образцах наблюдается утонение проволоки из сплава на основе системы Cu–Al

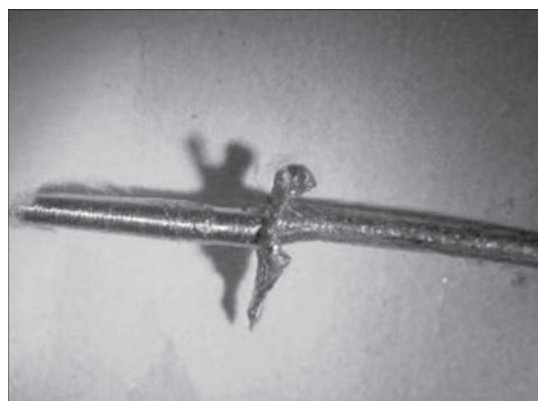


Рис. 10. Образец соединения медной проволоки диаметром 0,8 мм (справа) с проволокой из сплава на основе Cu–Al диаметром 1,0 мм, полученного стыковой конденсаторной сваркой ($I = 1152$ А, $t = 40$ мс)



(рис. 10) в результате увеличения пластичности при нагревании и сдавливания цангой пластичного металла, а также заметная осадка медной проволоки. Благодаря осадке, как показывают металлографические исследования, соединение произошло в твердой фазе с непрерывной границей. Это обеспечило прочность соединения на уровне прочности медного провода, т. е. при испытании на растяжение усилие разрушения достигло 200 Н, или около 400 МПа.

Попытки стыковой сварки алюминиевой проволоки и проволоки из сплава на основе Cu–Al не дали положительного результата. Это объясняется большой разницей термомеханических свойств материала, а именно, сохранением упругости сплава на основе Cu–Al при температуре потери упругости алюминия и связанной с этим потерей формы проволоки раньше, чем достаточно нагреется функциональный сплав.

Выводы

1. Сплавы с эффектом памяти формы системы Cu–Al, благодаря низкой стоимости, имеют перспективу технического применения в системах автоматики тепловых устройств, крепежных соединений элементов конструкций, претерпевающих значительную деформацию без механического разрушения. Этим обусловлена актуальность разработки технологии их соединения в однородном сочетании и в сочетаниях с другими конструкционными металлами.

2. Нахлесточные и стыковые соединения сложного легированного сплава с эффектом памяти формы на медноалюминиевой основе, полученные методами импульсной контактной сварки разрядом конденсаторов, не только равнопрочны с основ-

ным металлом, но и показывают практическую неизменность функциональных характеристик.

3. В зависимости от деформационных характеристик детали точечные сварные соединения исследованного сплава могут быть получены как с литым ядром, так и схватыванием в твердом состоянии. При этом поверхностные пленки (кроме окислы) не оказывают отрицательного влияния на сварные соединения.

4. Возможно получение стыковых соединений проволоки из СЭПФ системы Cu–Al с медной проволокой, что позволяет проектировать изделия с восстановлением формы нагреванием проходящим электрическим током.

5. Применение сварочной установки нового типа с бестрансформаторным разрядом суперконденсаторов для стыковой сварки проволок показало возможность точного управления тепловложением методом варьирования времени включения разрядного тока при практически постоянном его значении, задаваемом напряжением зарядки конденсаторов. Осциллографирование последовательных разрядов при постоянных установочных параметрах режима позволяет оценить отклонение от номинального значения энергии не более 0,5 Дж.

1. Коваль Ю.Н., Лободюк В.А. Деформационные и релаксационные явления при превращениях мартенситного типа. – К.: Наук. думка, 2010. – 287 с.
2. Никелид титана. Медицинский материал нового поколения / В.Э. Гюнтер, В.Н. Ходоренко, Ю.Ф. Ясенчук, Т.Л. Чекалкин и др. – Томск: Изд-во МИЦ, 2006. – 296 с.
3. Оцука К. Симида К. Эффекты памяти формы в сплавах. – М.: Наука, 1979. – 232 с.
4. Свариваемость сплавов системы Ti–Ni с эффектом памяти формы / Б. Е. Патон, Д. М. Калеко, Ю. Н. Коваль, В. М. Слепченко // Автомат. сварка. – 2006. – № 5. – С. 3–10.
5. Моравский В.Э., Ворона Д.С. Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки. – К.: Наук. думка, 1985. – 272 с.

Поступила в редакцию 01.09.2015

Испытательная лаборатория сварочных аэрозолей и средств защиты сварщиков
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

(аккредитована в соответствии с требованиями ДСТУ ISO/IEC 17025)

ПРЕДОСТАВЛЯЕТ СЛЕДУЮЩИЕ УСЛУГИ:

- ♦ сертификационные испытания защитных щитков и масок сварщиков;
- ♦ гигиеническую оценку сварочных материалов, способов сварки и родственных технологий;
- ♦ определение показателей уровней выделений вредных веществ, образующихся при сварочных процессах, с целью инвентаризации источников промышленных выбросов в атмосферу;
- ♦ определение напряженности магнитного поля, интенсивности оптического излучения и уровня шума при работе сварочного оборудования;
- ♦ подготовку раздела технических условий на сварочные материалы и технологии по требованиям безопасности и охране окружающей среды.

Адрес: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины,
03680, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11, Тел.: (044) 200–48–10



УДК 621.791.37

ВЛИЯНИЕ ДЕПРЕССАНТОВ И ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА НА МИКРОСТРУКТУРУ ПАЯНЫХ ШВОВ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА НА ОСНОВЕ Ni_3Al СО СПЛАВОМ ИНКОНЕЛЬ 718

С.В. МАКСИМОВА, В. Ф. ХОРУНОВ, В.В. МЯСОЕД

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Свойства паяных соединений обусловлены их микроструктурой. Поэтому металлографические и микрорентгеноспектральные исследования паяных соединений имеют большое значение при выборе химического состава припоя и параметров технологического режима пайки. Актуальность таких исследований возрастает при создании технологических процессов пайки соединений из материалов нового поколения, к которым относятся никелевые сплавы на основе интерметаллида γ' - Ni_3Al . В данной работе представлены результаты металлографических и микрорентгеноспектральных исследований паяных соединений жаропрочного никелевого сплава на основе интерметаллида Ni_3Al с деформируемым сплавом марки Инконель 718, полученных с помощью припоев системы Ni-Cr-Fe-B-Si и $\text{Ni-Pd-Cr-X(Ge, Co)}$. Показано влияние депрессантов — бора и кремния на формирование структуры в паяных швах. Определено влияние составляющих элементов паяемого материала на химический состав и морфологическое строение паяного шва. Установлено, что при пайке сплава на основе Ni_3Al припоем системы $\text{Ni-Pd-Cr-X(Ge, Co)}$ структура паяного шва состоит из твердого раствора на основе никеля и единичных дисперсных фаз, обогащенных алюминием типа $(\text{Pd, X})\text{Al}$, концентрация которого соответствует концентрации алюминия в основном металле. Их образование происходит благодаря диффузионным процессам на межфазной границе. В паяном шве наблюдаются однофазные участки, состоящие из твердого раствора на основе никеля. Библиогр. 12, табл. 6, рис. 7.

Ключевые слова: вакуумная пайка, жаропрочный сплав на основе Ni_3Al , микроструктура, шов, микрорентгеноспектральный анализ, твердый раствор, припой

Пайка находит широкое применение во многих отраслях промышленности благодаря возможности сохранять структуру основного металла (поскольку расплавляется только припой, который имеет более низкую температуру плавления) и возможности соединять материалы в труднодоступных местах [1–3]. В настоящее время существует большое количество припоев для высокотемпературного применения. Однако каждый паяемый материал требует индивидуального подхода при выборе состава припоя, что обусловлено его структурными особенностями, конкретными условиями эксплуатации и требуемыми механическими свойствами паяных соединений. Свойства паяных соединений определяются микроструктурой паяных швов. Поэтому большое внимание уделяется металлографическим и микрорентгеноспектральным исследованиям паяных соединений, которые обуславливают выбор химического состава припоя и параметры технологического режима пайки [4].

Актуальность таких исследований возрастает при создании технологических процессов получения паяных соединений из материалов нового поколения, к которым относятся никелевые сплавы на основе интерметаллида γ' - Ni_3Al . Интерме-

таллическое соединение Ni_3Al обладает высокой температурой плавления (1385°C), пониженной плотностью ($7,5 \text{ кг/м}^3$) и термической стабильностью структуры до температуры плавления [5, 6].

В данной работе представлены результаты металлографических и микрорентгеноспектральных исследований по изучению влияния химического состава основного металла (сплава на основе Ni_3Al) и депрессантов (бора) на структуру и морфологическое строение паяных соединений, полученных с использованием припоев систем Ni-Cr-Fe-B-Si и Ni-Pd-Cr-X . Для проведения экспериментов в качестве основного металла использовали никелевые жаропрочные сплавы на основе интерметаллида Ni_3Al в однородном и разнородном сочетании с деформируемым никелевым сплавом Инконель 718 (табл. 1).

Вакуумную пайку нахлесточных соединений образцов проводили в вакуумной печи ($1,33 \times 10^{-4}$ Па) с радиационным нагревом. Никелевый сплав

Таблица 1. Химический состав основного металла

Марка сплава	Массовая доля химических элементов, %									
	Ni	Al	Cr	Nb	Mo	Si	Ti	W	Fe	C
Ni_3Al (1)	Основа	10	4	-	-	1,5	1	3	-	-
Ni_3Al (2)	Основа	9	-	-	18	-	-	-	-	-
Инконель 718	53	0,8	19	5,5	3,3	-	0,95	-	18	0,08

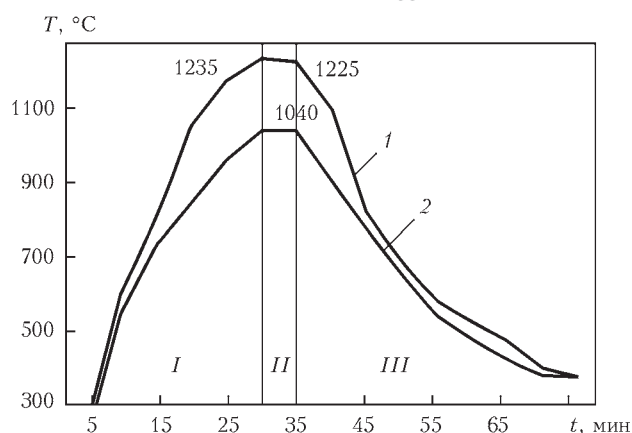


Рис. 1. Кривые термического цикла пайки образцов: 1 — палладиевым припоем; 2 — борсодержащим (I — нагрев; II — выдержка; III — охлаждение)

на основе Ni_3Al паяли с деформируемым сплавом Инконель 718 палладиевым припоем Ni-Pd-Cr-X по режиму 1, борсодержащим припоем BMF-20 (Ni-Cr-Fe-B-Si) по режиму 2 (рис. 1).

По стандартной методике изготавливали микрошлифы паяных соединений для проведения металлографических и микрорентгеноспектральных исследований с привлечением электронного растрового микроскопа TescanMira 3 LMU, оснащенного энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-max 80 mm² (с программным обеспечением INCA). Локальность микрорентгеноспектральных измерений не превышала 1 мкм. Распределение химических элементов и съемку микроструктур проводили в режиме обратно — отраженных электронов (BSI), позволяющих различать структурные составляющие по атомной массе (без химического травления).

При визуальном осмотре полученных образцов в обоих случаях наблюдалось хорошее смачивание припоями паемых металлов, затекание в капиллярные зазоры, формирование полных галтелей (рис. 2).

Металлографические исследования показали, что при использовании припоя системы Ni-Cr-Fe-B-Si в паяном шве и основном металле Инко-

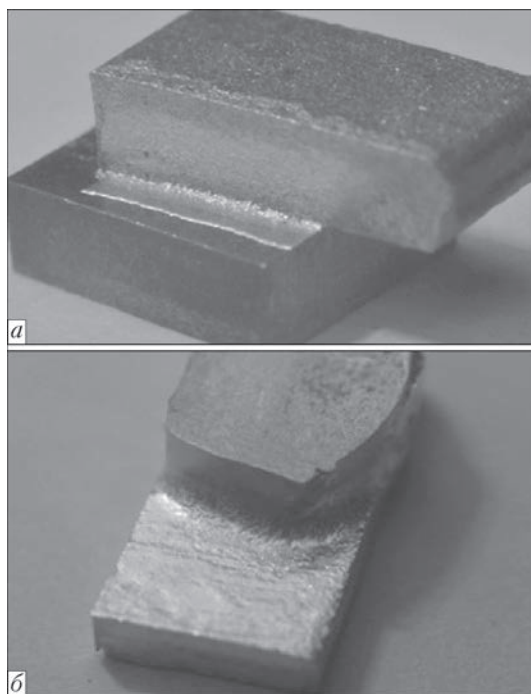


Рис. 2. Внешний вид паяных образцов Ni_3Al + Инконель 718, полученных с применением припоев на основе систем: Ni-Cr-Fe-B-Si (а); Ni-Pd-Cr-X (б)

нель 718 на фоне светлой матрицы наблюдаются игловидные частицы темной фазы (рис. 3, а-в). Исследование распределения элементного состава в локальных участках паяного соединения, проведенное с помощью микрорентгеноспектрального анализа, выявило повышенную концентрацию хрома в этих частицах (рис. 3, г; табл. 2, спектр 1, 2). Выделяются они преимущественно в зоне сплава Инконель 718 (нижний образец), прилегающей ко шву, и на межфазной границе в зоне шва.

При исследовании изменения концентрации элементов по линии сканирования, проходящей через эту частицу, наблюдается повышенное содержание бора и одновременное понижение содержания никеля, что свидетельствует об образовании фазы, содержащей бор. Это можно объяснить высоким содержанием хрома (19 %) в паяемом материале Инконель 718 по сравнению со сплавом на основе Ni_3Al (4 %), что создает возможность дополнительного поступления хрома в жидкий припой (во время пайки), и способствует активному образованию и выделению боридов хрома. На границе с никелевым сплавом на основе Ni_3Al (верхний образец) количество таких выделений незначительно (рис. 3, а, б).

Исследование химической неоднородности паяных соединений показало, что повышенная концентрация хрома (24,78...37,93 %) наблюдается в игловидных частицах в зоне паяного шва со стороны Инконель 718 и в центральной

Таблица 2. Распределение элементов в паяном шве соединения Ni_3Al + Инконель 718

№ спектра	Химические элементы, мас.%								
	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo	W
1	1,14	2,47	0,32	24,78	6,45	60,30	1,09	3,46	-
2	0,61	1,50	0,25	37,93	5,81	47,45	0,76	4,68	1,01
3	0,91	1,34	0,18	53,37	3,33	38,67	0,50	0,92	0,78
4	16,13	1,71	0,09	4,99	-	76,62	0,00	0,00	0,46
5	2,32	2,30	0,36	7,25	5,07	79,97	1,42	0,57	0,73
6	9,59	0,62	1,12	3,76	-	82,65	-	-	2,27
7	0,51	0,89	0,67	18,77	13,70	57,48	4,69	3,29	-
8	1,93	2,39	0,40	13,16	5,49	74,88	1,00	0,29	0,45
9	10,16	1,02	1,44	4,76	0,17	79,53	-	-	2,92
10	0,45	0,14	0,90	19,69	17,16	51,88	5,91	3,87	-

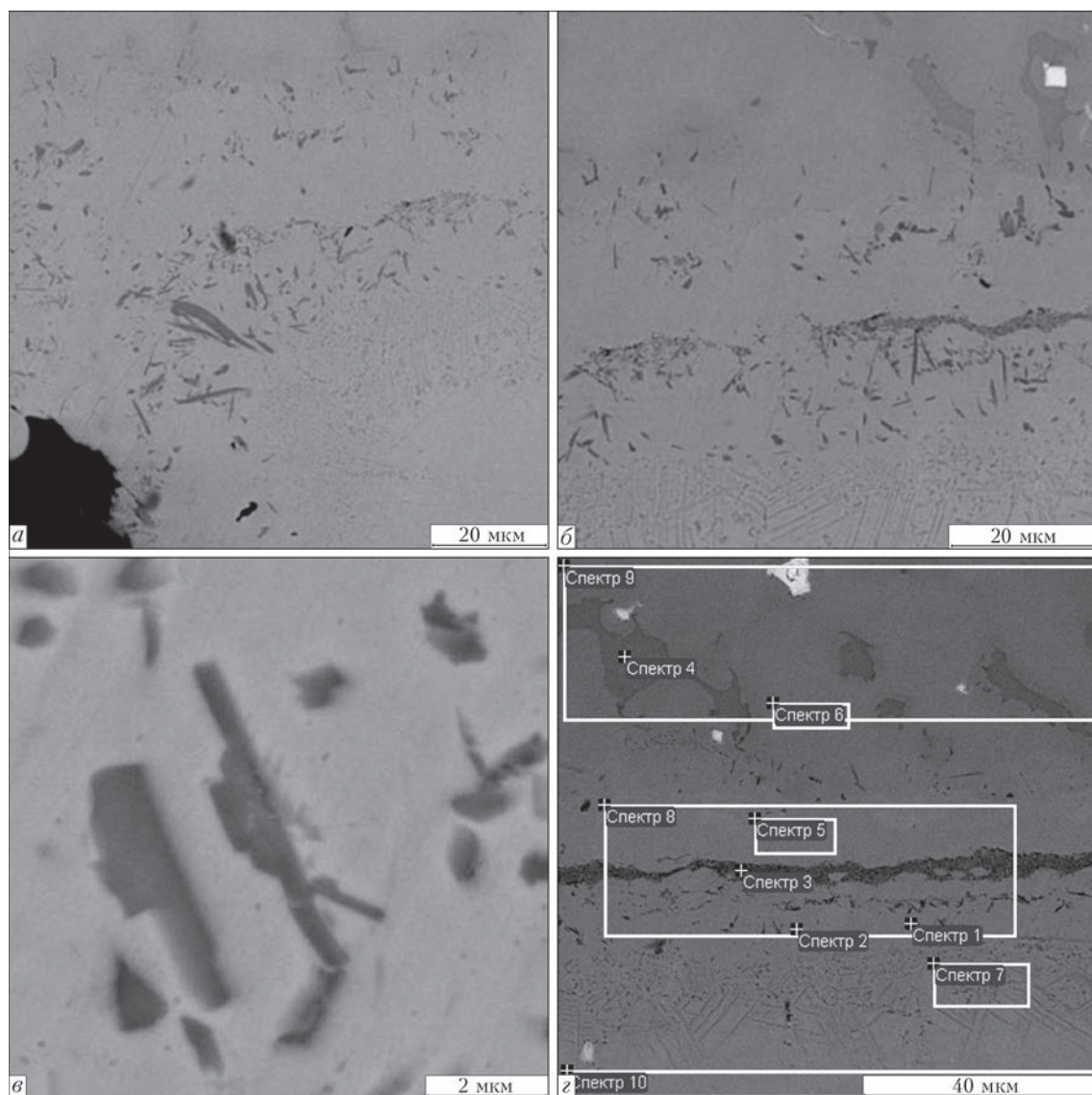


Рис. 3. Микроструктура паяного разнородного соединения Ni_3Al + Инконель 718, полученного с использованием борсодержащего припоя (Ni–Cr–Fe–B–Si): а — гальванический участок; б — паяный шов; в — бориды хрома; г — исследуемые участки

зоне шва (рис. 3, г; табл. 2). В последнем случае фаза на основе хрома выделяется в виде непрерывной полосы. Такие структурные особенности неблагоприятно влияют на свойства паяных соединений.

При пайке алюминидов никеля в однородном сочетании (по аналогичному режиму) в центральной зоне паяного шва наблюдается выделение крупных темных частиц на основе никеля и хрома, обогащенных бором (рис. 4; табл. 3).

Полученные результаты исследований показывают, что при пайке образуются два типа боридов: на основе никеля и на основе хрома. При сканировании по линии, перпендикулярно паяному шву, наблюдается повышение концентрации бора и хрома в центральной зоне шва (рис. 5) и, соответственно, понижение никеля, что хорошо согласуется с предыдущими результатами и является подтверждением наличия боридных фаз в центре шва.

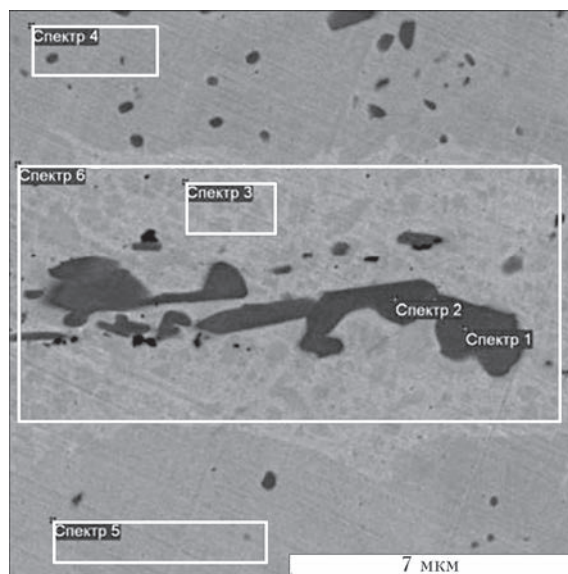


Рис. 4. Микроструктура соединения Ni_3Al в однородном сочетании, полученного с использованием борсодержащего припоя



Таблица 3. Распределение элементов в паяном соединении $\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Ni}_3\text{Al}$

№ спектра	Химические элементы, мас. %							
	B*	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	W
1	11,62	-	-	-	81,97	-	3,27	3,14
2	6,58	2,37	1,16	-	37,70	1,66	48,72	1,81
3	-	3,04	1,73	0,42	6,01	2,53	86,27	-
4	-	5,83	1,69	0,31	3,54	1,06	86,95	0,62
5	-	6,41	1,61	0,85	2,72	1,25	85,01	2,15
6	-	2,86	1,55	-	15,91	2,41	76,57	0,70

B* – определен качественно.

Аналогичное формирование паяных швов и распределение элементов наблюдается при пайке борсодержащими припоями нержавеющей стали [7, 8]. Во время пайки бор активно диффундирует из паяного шва в нержавеющую сталь и борсодержащие фазы выделяются по границам зерен основного металла. Наличие такой фазы отрицательно влияет на механические свойства и коррозионную стойкость паяных соединений. Образование легкоплавких боридных эвтектик и силицидов в паяных швах и паемом материале отрицательно влияет на длительную прочность при повышенной температуре [9].

В связи с этим дальнейшие исследования направлены на то, чтобы исключить образование хрупких фаз в паяном соединении. Для этого использовали опытный палладиевый припой на основе твердого раствора, не содержащий бор и кремний. В качестве депрессанта использовали германий, который имеет большую область растворимости в никеле по сравнению с кремнием [10]. В исходном, литом состоянии микроструктура данного припоя состоит из матрицы – твердого раствора на основе никеля и дисперсных частиц фазы на основе палладия, обогащенной германием.

Микроструктура паяных швов соединений $\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Инконель 718}$, полученных с помощью палладиевого припоя по режиму 1 (рис. 1), состоит из твердого раствора на основе никеля и дисперсной фазы на основе палладия, обогащенной алюминием до 9,71 % (рис. 6, а; табл. 4). Количество данной фазы на фоне паяного шва незначительно, выделяется она в виде единичных дисперсных частиц (островков размером до 20 мкм) в матрице твердого раствора и может выступать как вторичная упрочняющая фаза.

В твердом растворе на основе никеля выявлено в незначительных количествах составляющие элементы паемых материалов. Так, концентрация железа составляет 6,99 %, алюминия – не превышает 1,78 %, Объясняется это наличием градиента концентраций на межфазной границе, приводящей к насыщению металла шва составляющими элементами основного металла [11, 12]. Надо отметить, что гер-

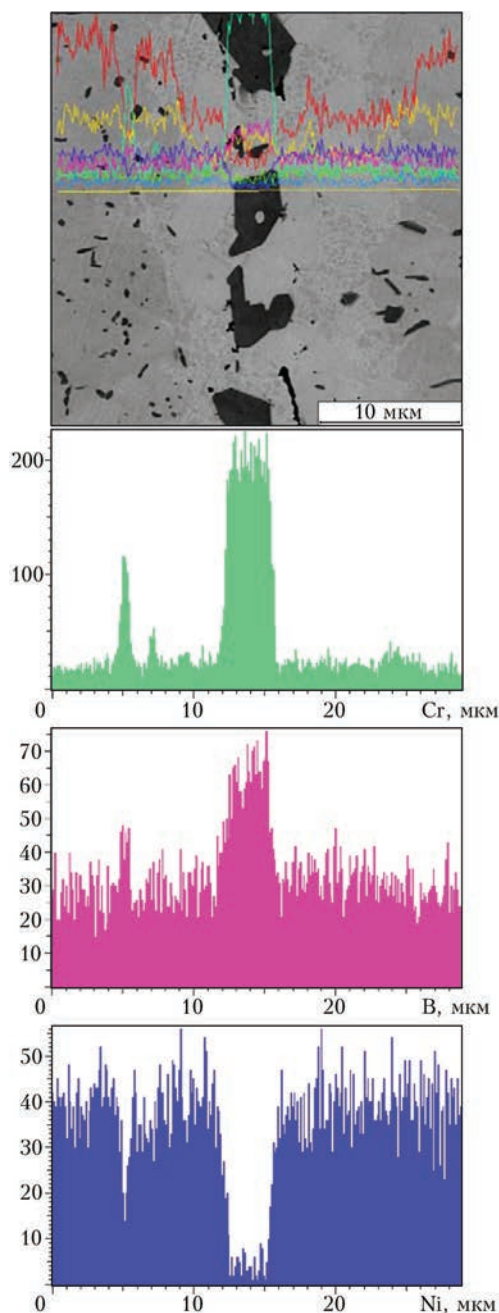


Рис. 5. Распределение составляющих элементов припоя по линии сканирования соединения $\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Ni}_3\text{Al}$ (припой, содержащий бор)

маний выявлен только в твердом растворе и его концентрация не превышает 0,54 %.

В некоторых участках шов сложно визуализировать, в качестве паяного шва служит осветленная полоса — твердый раствор на основе никеля, содержащий составляющие элементы припоя и паемого материала. В твердом растворе содержание алюминия повышается от нуля до 3,34 %, в то время как в паемом материале его количество составляет 7,16 % (рис. 6, б; табл. 5).

В галтельных участках (прямой и обратной) наблюдается аналогичное формирование структуры (как в паяном шве): твердый раствор на основе никеля и дисперсные выделения фазы на ос-

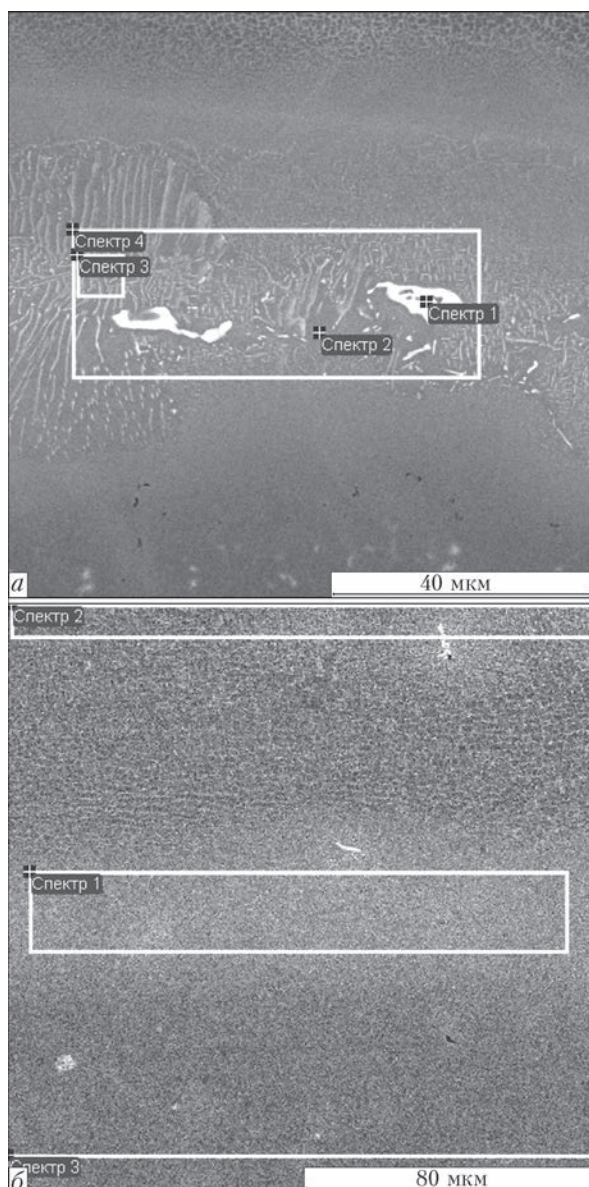


Рис. 6. Исследуемые участки паяного соединения Ni_3Al + Инконель 718, полученного с использованием палладиевого припоя: а — двухфазный паяный шов с фазой на основе палладия; б — однофазный паяный шов со структурой твердого раствора

нове палладия (рис. 6, а, б). Выявлена разница в концентрации алюминия: в палладиевой фазе в паяном шве она большая и составляет 13,10 % по сравнению с концентрацией алюминия в аналогичной фазе в галтельном участке — 9,23 % (рис. 7; табл. 6). Интенсивность и скорость роста данной фазы определяются коэффициентами диффузии для каждого элемента [11. 12]. В паяном шве большая протяженность межфазной границы, узкий зазор между паяемыми металлами создают более благоприятные условия для протекания диффузионных процессов, что способствует активному насыщению металла шва алюминием.

Известно, что прочность паяных соединений и их эксплуатационные характеристики определяются прочностью межфазной связи элементов припоя с элементами основного металла. Другими словами, если образуются прочные соединения в паяном шве, преимущественно твердые растворы, то они обеспечивают большую прочность, чем грубые боридные фазы. Следует подчеркнуть, что диффузионные слои и интерметаллидные фазы в виде сплошных полос вдоль паяного шва, которые могут снижать свойства паяных соединений, не образуются при пайке палладиевым припоем.

Установлено, что при пайке жаропрочного никелевого сплава на основе интерметаллида Ni_3Al между собой и с деформируемым никелевым сплавом марки Инконель 718 борсодержащим припоем в паяном шве и диффузионной зоне основного металла (Инконель 718) образуются бориды хрома.

При использовании припоя на базе системы Ni-Pd-Cr-X (Ge, Co) получены плотные бездефектные паяные швы. При изучении химического состава и морфологии паяных соединений выяснен интересный факт, что микроструктура паяного шва и исходного припоя отличаются не только химическим составом, но и морфологическим строением. Обусловлено это наличием

Таблица 4. Результаты микрорентгеноспектрального анализа металла шва паяного соединения Ni_3Al + Инконель 718 (палладиевый припой)

№ спектра	Химические элементы, мас. %										
	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Ge	Nb	Mo	Pd
1	9,71	-	0,29	0,62	0,38	-	6,57	-	-	-	82,43
2	0,99	0,13	0,71	13,64	6,99	1,08	53,53	0,54	4,89	4,79	12,70
3	1,78	0,14	0,60	12,57	6,42	1,11	49,19	0,39	4,63	4,41	18,76
4	2,23	0,12	0,50	12,06	6,08	1,13	48,23	0,26	4,06	4,63	20,69

Таблица 5. Распределение элементов в паяном шве (участок со структурой твердого раствора) соединения Ni_3Al + Инконель 718

№ спектра	Химические элементы, мас. %									
	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Nb	Mo	Pd
1	3,34	0,08	0,45	10,24	5,82	0,80	59,24	2,63	9,76	7,64
2	7,16	-	-	-	-	-	75,65	-	17,01	0,18
3	0,59	0,12	0,92	19,16	16,53	-	52,15	6,43	3,76	0,34



Таблица 6. Результаты микрорентгеноспектрального анализа металла шва паяного соединения Ni_3Al + Инконель 718 (галтельный участок)

№ спектра	Химические элементы, мас. %										
	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Ge	Nb	Mo	Pd
1	9,23	0,14	0,37	0,54	0,38	-	4,27	-	-	-	85,06
2	13,10	0,08	0,26	1,97	1,57	0,15	14,44	-	-	-	68,44
3	3,46	0,10	0,50	10,51	6,36	0,64	54,37	0,21	3,22	7,42	13,20
4	0,65	-	0,25	16,45	7,60	1,66	52,18	-	2,10	3,78	15,32
5	1,31	0,20	0,94	12,39	6,18	0,91	41,78	0,67	6,47	2,18	26,97

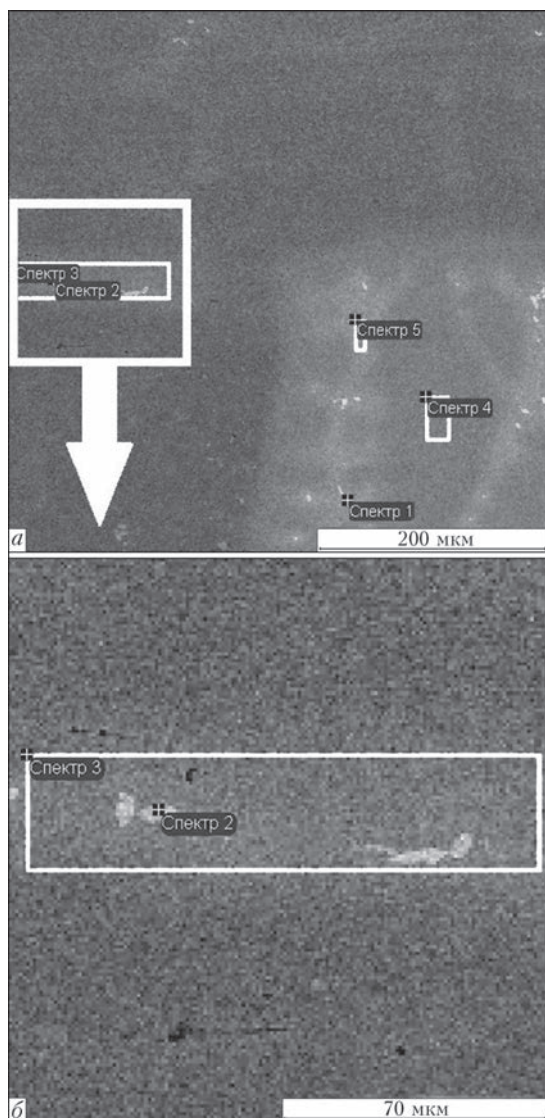


Рис. 7. Микроструктура галтельного участка паяного соединения Ni_3Al + инконель 718, полученного с использованием палладиевого припоя (а); участок шва при большем увеличении (б)

градиента концентраций на межфазной границе паяемый материал — жидкий припой, разной величиной коэффициентов диффузии отдельных элементов, неравновесными условиями кристаллизации металла паяного, приводящими к активным диффузионным процессам во время пайки. При использовании для пайки алюминид никеля палладиевого припоя, не содержащего алюми-

ний, паяный шов состоит из твердого раствора на основе никеля и единичных выделений дисперсной фазы Pd (X) Al, обогащенной алюминием (9,71...13,10 %). Морфологические особенности этой фазы могут оказывать положительное влияние на механические характеристики паяных соединений. Для изучения механизма данного процесса необходимо проведение дополнительных детальных исследований.

1. Хорунов В.Ф. Основы пайки тонкостенных конструкций из высоколегированных сталей. — Киев: Наук. думка, 2008. — 240 с.
2. Радзиевский В.Н., Ткаченко Г.Г. Высокотемпературная вакуумная пайка в компрессоростроении. — Киев: Эко-технология, 2009. — 400 с.
3. Khorunov V.F., Maksymova S.V. Brazing of superalloys and the intermetallic alloy (γ -TiAl). Advanced in brazing. Science, technology and applications / Ed. by P. Dusan Seculic, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2013. — P. 85–120.
4. Microstructural characterization of single crystal superalloy CMSX-4 brazed joints with BNi-2 and BNi-9 Filler Metals/ B. Riggs, B. Alexandrov, A. Benatar, R. Xu. — IBSC-2015, CD.
5. Гринберг Б.А., Иванов М.А. Интерметаллиды Ni_3Al : микроструктура, деформационное поведение. — Екатеринбург: УрО РАН, 2002. — 360 с.
6. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанокластерным упрочнением / Ю.Р. Колобов, Е.Н. Каблов, Э.В. Козлов и др. // Под науч. ред. Е.Н. Каблова и Ю.Р. Колобова. — М: МИСиС издательский дом, 2008. — 328 с.
7. Rabinkin A. Brazing of superalloys and the intermetallic alloy (γ -TiAl). Advanced in brazing. Science, technology and applications / Ed. by Dusan P. Seculic, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2013. — P. 121.
8. Максимова С.В. Аморфные припои для пайки нержавеющей стали и титана и структура паяных соединений // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 2007. — № 40. — С. 70–81.
9. Кратковременная прочность и микроструктура паяных соединений сплава ВЖЛ12У, полученных с использованием борсодержащего припоя с присадкой кремния / И.С. Малащенко, В.В. Куренкова, А.Ф. Белявин, В.В. Трохимченко// Современ. электрометаллургия. — 2006. — № 4. — С. 26–42.
10. Massalski T.B. Binary alloy phase diagrams, American Society for metals. (Ohio: Metals Park: ASM International: 1990, CD).
11. Maksymova S.V., Khorunov V.F. Diffusion processes and formation of structure of brazed joints on titanium aluminides / J. of Applied Physical Science International. — 2015. — 2, № 1. — P. 24–29.
12. Лариков Л.Н., Исайчев В.И. Структура и свойства металлов и сплавов. Справочник: Диффузия в металлах и сплавах / Под ред. А.И. Райченко. — Киев: Наук. думка, 1987. — 506 с.

Поступила в редакцию 13.10.2015



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНОЙ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ*

В.Ю. ХАСКИН², В.Н. КОРЖИК^{1,2}, В.Н. СИДОРЕЦ², А.И. БУШМА², ВУ БОЙИ¹, ЛО ЗИЕ¹

¹Китайско-украинский институт сварки им. Е.О. Патона (Гуандунский Генеральный Институт промышленных технологий (Гуанчжоуский научно-исследовательский институт цветных металлов)), Китай

²ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Одним из актуальных направлений современной науки и техники в области сварки металлов плавлением является создание новых лазерно-дуговых источников тепла. Учет их физических особенностей может способствовать росту производительности лазерно-дуговой сварки за счет повышения эффективного КПД, т.е. увеличения отношения мощности теплового источника, действующей на металл при сварке, к суммарной мощности электрической дуги и лазерного излучения. Одним из путей повышения эффективного КПД сварки является снижение потерь лазерной энергии, связанных с отражением излучения от свариваемой поверхности. В работе изучено влияние сопутствующего подогрева, обеспечиваемого электрической дугой, на изменение условий поглощения лазерного излучения алюминиевыми сплавами при их лазерно-дуговой сварке. На основе изучения поведения парогазового канала при гибридной сварке была сформулирована и решена задача по определению температурной зависимости коэффициента поглощения лазерного излучения алюминием в рамках модели почти свободных электронов. Сравнение полученных расчетных зависимостей поглощательной способности с имеющимися экспериментальными данными показало удовлетворительное совпадение. Для определения таких параметров режима лазерно-дуговой сварки, как мощность дуговой составляющей и расстояние между зоной действия дуги и осью лазерного пучка, решали соответствующее уравнение теплопроводности. Экспериментальная проверка предложенного подхода к повышению эффективного КПД гибридной сварки, проведенная на образцах из алюминиевого сплава АМгб, подтвердила достоверность спрогнозированных результатов. Библиогр. 12, рис. 7.

Ключевые слова: лазерно-дуговая сварка, алюминиевые сплавы, излучение CO_2 -лазера, коэффициент поглощения, сварочный ток, скорость сварки

Одной из актуальных проблем современной науки и техники в области сварки металлов плавлением является создание новых источников тепла, которые позволяют управлять концентрацией тепловой энергии, вводимой в металл в процессе сварки. Это, в конечном итоге, дает возможность обеспечить требуемые производительность сварки, качество получаемого сварного соединения, стабильность процесса и воспроизводимость его результатов. В качестве такого управляемого источника тепла для сварки металлических материалов в последние годы все чаще используется комбинированный лазерно-дуговой источник, который реализуется путем совместного теплового воздействия на свариваемый металл (в пределах общей зоны нагрева) сфокусированным лазерным пучком и электрической дугой [1].

Вместе с тем закономерности взаимного влияния составляющих лазерно-дугового источника тепла и их совместного воздействия на различные металлические материалы изучены пока недостаточно. Исследование физики процессов взаимодействия составляющих лазерно-дугово-

го источника тепловой энергии между собой и их комбинированного воздействия на свариваемый металл, разработка соответствующих математических моделей и компьютерное моделирование указанных процессов представляют собой весьма актуальные научно-технические задачи. К таким задачам относится учет физических особенностей гибридной лазерно-дуговой сварки алюминиевых сплавов, позволяющий повысить ее производительность за счет повышения эффективного КПД, т.е. увеличения отношения мощности теплового источника, действующего в металле при сварке, к суммарной мощности электрической дуги и лазерного излучения. Одним из путей повышения эффективного КПД сварки является снижение потерь лазерной энергии, связанных с отражением излучения от свариваемой поверхности.

Целью данной работы является изучение влияния сопутствующего подогрева, обеспечиваемого электрической дугой, на изменение условий поглощения лазерного излучения алюминиевыми сплавами при их лазерно-дуговой сварке, а также определение параметров режима сварки, обеспе-

* Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках программы иностранных экспертов в КНР № WQ20124400119, проекта R&D инновационной группы провинции Гуандун (КНР) № 201101C0104901263 и международного проекта Министерства науки и техники КНР № 2013DFR70160.

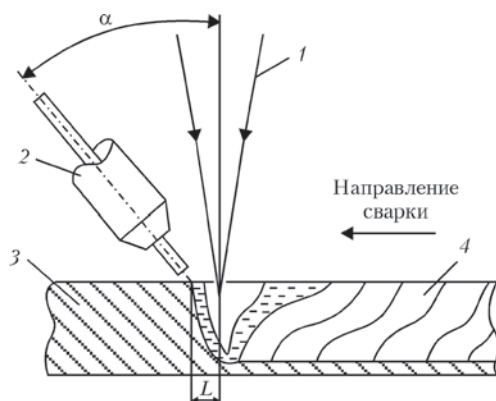


Рис. 1. Схема гибридной лазерно-дуговой сварки: 1 — сфокусированное лазерное излучение; 2 — плавящийся электрод; 3 — свариваемый образец; 4 — шов

чивающих повышение эффективного КПД за счет снижения потерь лазерной энергии. При этом учет теплового действия дуги не зависит от того, каким электродом (плавящимся или неплавящимся) она образована.

Лазерно-дуговая сварка, как и лазерная, характеризуется образованием парогазового канала проплавления в свариваемом металле. В работе [2] детально описано поведение этого канала в процессе сварки. В частности, отмечено, что на его передней стенке существует слой расплавленного металла, испытывающий постоянные «возмущения», — образование искривления в виде ступеньки, которая периодически перемещается по высоте канала. При этом удаление материала с передней стенки осуществляется послойно при перемещении ступеньки сверху вниз. Это можно объяснить увеличением слоя расплавленного металла на передней стенке, происходящим за счет перехода энергии излучения в выделяющуюся на этой стенке тепловую энергию, в сочетании с происходящими в сварочной ванне гидродинамическими процессами.

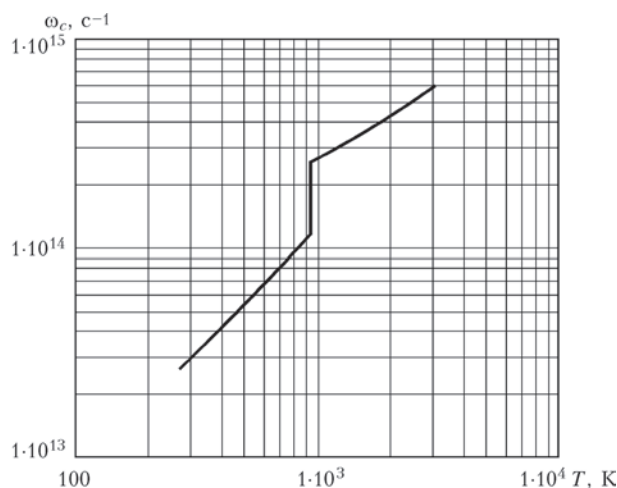


Рис. 2. Зависимость частоты релаксации $\omega_c(T)$ от температуры T для алюминия при воздействии на него излучения CO_2 -лазера ($\lambda = 10,6$ мкм)

Известно, что часть энергии излучения поглощается свариваемым металлом, а часть отражается от него. Доля поглощенного излучения тем больше, чем выше температура металла. Образовавшийся на передней стенке расплав хорошо поглощает излучение, однако за счет перемещения по ходу сварки передняя часть лазерного пучка все время попадает на слабо нагретый металл, что приводит к снижению коэффициента поглощения. Логично предположить, что локальный подогрев до определенных температур достаточно небольшого участка свариваемого металла, находящегося непосредственно перед парогазовым каналом по ходу сварки, способен существенно повысить коэффициент поглощения лазерного излучения. В случае лазерно-дуговой сварки, осуществляемой по приведенной на рис. 1 схеме, такой локальный подогрев осуществляется электрической дугой. Возникает задача достижения минимальных температур, достаточных для максимально возможного увеличения коэффициента поглощения излучения, в зависимости от скорости сварки и геометрии свариваемого изделия.

Для определения температурной зависимости коэффициента поглощения лазерного излучения металлическими материалами $A(T_s)$ будем рассматривать исследуемый металл (алюминий) в рамках модели почти свободных электронов. В этом случае, согласно формулам Друде–Зинера [3], для действительной ϵ_1 и мнимой ϵ_2 частей комплексной диэлектрической проницаемости металла на частоте лазерного излучения $\omega = 2\pi c / \lambda$, где c — скорость света, λ — длина волны излучения, имеем:

$$\epsilon_1 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \omega_c^2}, \quad (1)$$

$$\epsilon_2 \omega = 4\pi\sigma = \frac{\omega_c \omega_p^2}{\omega^2 + \omega_c^2}. \quad (2)$$

Здесь ω_p — частота плазменных колебаний свободных электронов металла; ω_c — частота, численно равная обратному времени релаксации электронов проводимости. Величина плазменной частоты определяется по формуле

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi n e N_e}{m_e^*}, \quad (3)$$

где e и m_e^* — заряд и эффективная масса электрона в металле [4].

Концентрация электронов проводимости $N_e = V/\Omega$ определяется через валентность V и атомный объем Ω . Значение валентности для алюминия принималось равным трем. Атомный объем был получен на основе экспериментальных дан-

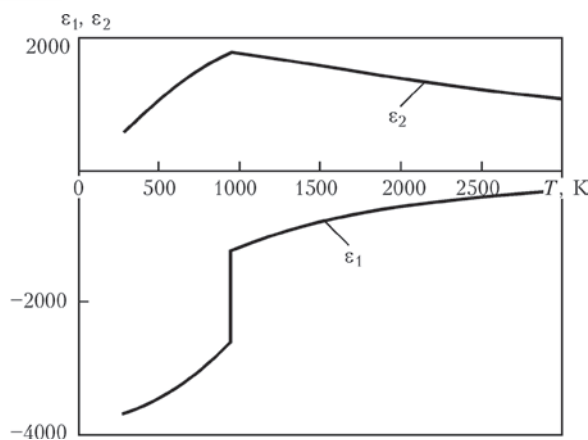


Рис. 3. Зависимости действительной ε_1 и мнимой ε_2 частей комплексной диэлектрической проницаемости алюминия от температуры T

ных по плотности алюминия, приведенных в работе [5].

В предельном случае постоянного поля, когда $\omega = 0$, высокочастотная оптическая проводимость σ превращается в статическую проводимость металла:

$$\sigma(0) = \frac{N_e e}{m_e \omega_c}. \quad (4)$$

Температурную зависимость частоты релаксации ω_c для рассматриваемых металлов в твердом состоянии учитывали с помощью следующей формулы [6]:

$$\omega_c = K' T^5 \int_0^{\theta/T} \frac{z^4 dz}{e^z - 1}, \quad (5)$$

где θ — температура Дебая; K' — константа, которая включает полное сечение рассеяния изолированного атома, массы иона, плотность ионов, волновое число Дебая, температуру Дебая и другие универсальные константы [6].

Значения ω_c и, соответственно, K' при комнатной температуре для алюминия выбирались в соответствии с данными работы [7]. Для алюминия в жидком состоянии использовали экспериментальные значения из работ [8, 9]. Полученные таким образом расчетные данные приведены на рис. 2.

Представленная на этом рисунке температурная зависимость имеет характерный разрыв при температуре плавления металла T_m . По формулам (1) и (2) с использованием (3)–(5) были построены температурные зависимости действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости для алюминия на частоте излучения CO_2 -лазера ($\lambda = 10,6$ мкм), изображенные на рис. 3 (здесь и далее температура выражена в градусах Кельвина).

Для дальнейших расчетов удобно ввести действительную n и мнимую k части комплексного показателя преломления металла на частоте лазерного излучения

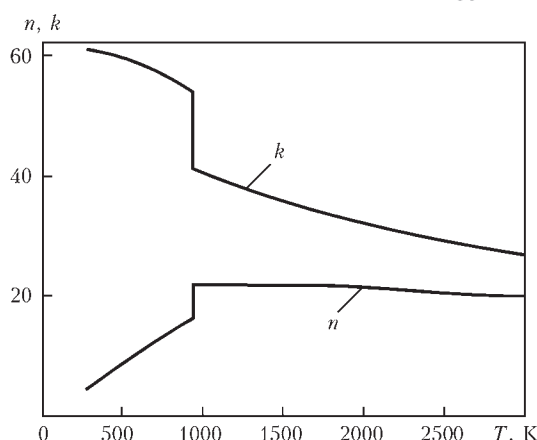


Рис. 4. Зависимости действительной n и мнимой k части комплексного показателя преломления алюминия от температуры T

$$\sqrt{\varepsilon} = \sqrt{\varepsilon_1 + i\varepsilon_2} = n + ik, \quad (6)$$

используя для этого следующие формулы:

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_1}{2}}, \quad (7)$$

$$k = \sqrt{\frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 - \varepsilon_1}{2}}. \quad (8)$$

Температурные зависимости действительной и мнимой части комплексного показателя преломления для алюминия представлены на рис. 4.

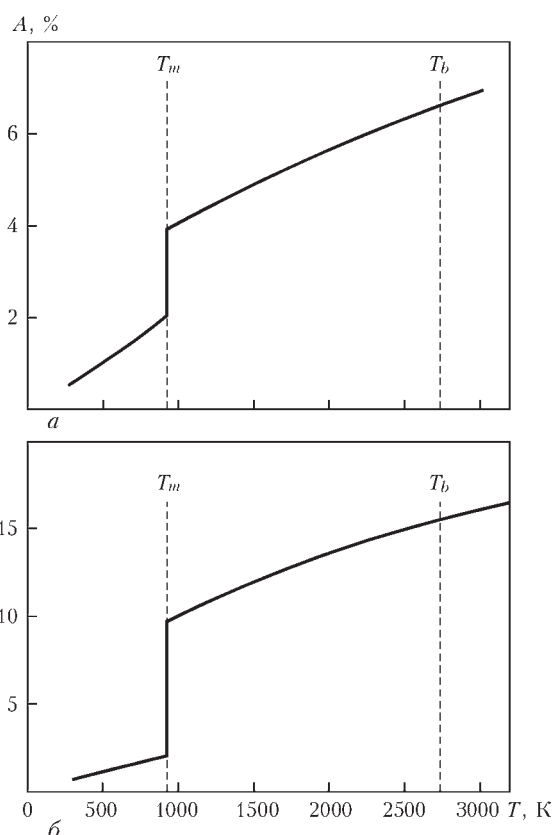


Рис. 5. Зависимости поглощательной способности A алюминия от температуры T : а — для длины волны 10,6; б — 1,06 мкм



Используя полученные значения n и k , определим коэффициент поглощения лазерного излучения, нормально падающего на плоскую поверхность металла (поглощательную способность), по известной формуле

$$A = \frac{4n}{(1+n)^2 + k^2}. \quad (9)$$

В некоторых случаях более важным параметром является коэффициент отражения (отражательная способность), которую можно определить по формуле

$$R = 1 - A = \frac{(1-n)^2 + k^2}{(1+n)^2 + k^2}. \quad (10)$$

На рис. 5, а представлены результаты расчетов температурных зависимостей коэффициента поглощения излучения CO_2 -лазера для алюминия в диапазоне температур от комнатной до температуры кипения металла T_b и выше. Аналогичные расчеты были проведены и для определения поглощательной способности алюминиевой поверхности в случае падения на нее излучения Nd:YAG-лазера ($\lambda = 1,06$ мкм). Они показали идентичность поведения обеих зависимостей с тем отличием, что абсолютные значения коэффициента поглощения излучения Nd:YAG-лазера выше, чем излучения CO_2 -лазера (рис. 5, б).

Полученные для обоих типов излучения расчетные зависимости поглощательной способности сравнивали с имеющимися экспериментальными данными [6–9], при этом совпадение было вполне удовлетворительным. Согласно зависимостям, приведенным на рис. 5, для достижения максимальных значений коэффициента поглощения поверхность свариваемого алюминиевого сплава в зоне действия лазерного излучения обеих длин волн (10,6 и 1,06 мкм) следует нагревать до температуры кипения T_b . Однако даже нагрева до температуры плавления T_m достаточно для резкого скачкообразного увеличения поглощательной способности.

Для определения таких параметров режима лазерно-дуговой сварки, как мощность Q_a дуговой составляющей и расстояние L между точкой подвода электродной проволоки и осью лазерного излучения (см. рис. 1), необходимо решить соответствующее уравнение теплопроводности. Для упрощения задачи будем рассматривать стационарный случай нагрева алюминиевой пластины толщиной δ дуговым источником, тепловой поток которого определяется по зависимости

$$Q_a = \eta IU, \quad (11)$$

где η — КПД дуги плавящегося электрода (обычно принимают $\eta = 0,8$); I — сварочный ток, А; U — напряжение на дуге, В.

Предположим, что пространственное распределение теплового потока, вводимого в образец, симметрично относительно оси, перпендикулярной его поверхности (т.е. симметрично относительно оси лазерного пучка). В связи с этим сформулируем математическую модель нагрева рассматриваемого образца в осесимметричной постановке. Уравнение теплопроводности в металле запишем в цилиндрической системе координат с учетом осевой симметрии температурного поля (при этом ось r направлена вдоль поверхности образца, а ось z направлена внутрь образца, перпендикулярно его поверхности).

$$C_m(T)\rho_m(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda_m(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_m(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (12)$$

где $C_m(T)$, $\rho_m(T)$, $\lambda_m(T)$ — эффективная теплоемкость металла (с учетом скрытой теплоты плавления), плотность и коэффициент теплопроводности, соответственно.

Краевую задачу для уравнения (12) поставим в области $0 \leq r \leq R$, $0 \leq z \leq \delta$, $t \geq 0$, где R — радиус расчетной области, δ — толщина образца. В качестве начального условия во всей области задается температура T_0 , равная температуре окружающей среды. При $r = 0$ ставится условие симметрии температурного поля:

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (13)$$

Предполагается, что за характерное время, на котором необходимо найти решение задачи, тепловое возмущение не доходит до внешних границ расчетной области, т.е. на этих границах подерживается начальная температура

$$T(r, \delta, t) = T(R, z, t) = T_0. \quad (14)$$

На поверхности образца, на которую воздействует импульсный источник тепла, ставится следующее граничное условие:

$$-\lambda_m(T)\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = Q_a. \quad (15)$$

Здесь $Q_a(r, t)$ — пространственно-временное распределение теплового потока, вводимого в металл импульсным дуговым разрядом, определяемое согласно зависимости (11) по среднему значению сварочного тока.

Максимальная температура T_c в центре дугового источника мощностью Q_a определялась по закону Ньютона–Рихмана $Q_a = \alpha(T_c - T_0)$, где α — коэффициент теплоотдачи, $[\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$, найденный экспериментально для алюминиевого сплава АМг6 ($1/\alpha = 0,55 \dots 0,60$).

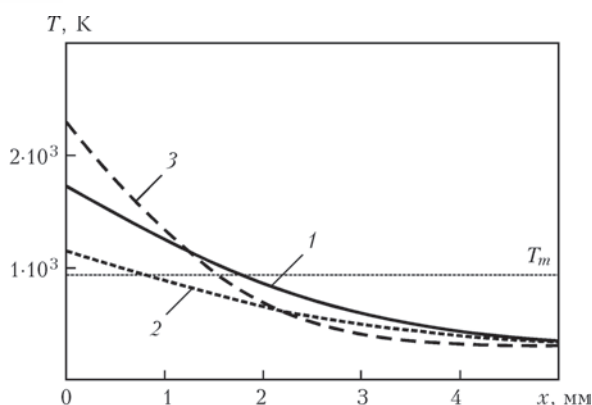


Рис. 6. Распределение температур T на поверхности алюминиевой пластины толщиной 2 мм от дугового источника по направлению сварки x : 1 — $I = 150$ А, $v_{св} = 130$ м/ч; 2 — $I = 100$ А, $v_{св} = 120$ м/ч; 3 — $I = 200$ А, $v_{св} = 300$ м/ч

Решение задачи (12)–(15) находилось численно методом Писмена–Рэкфорда [10] для алюминиевой пластины толщиной 2 мм. При проведении всех расчетов использовали теплофизические характеристики алюминиевого сплава АМг6, приведенные в работе [11]. Рассчитывали распределение температуры, создаваемой дуговым источником мощностью Q_a на поверхности алюминиевой пластины по оси x в направлении, противоположном направлению сварки. Скорость сварки $v_{св}$ учитывали при определении времени воздействия дугового источника, рассчитываемого по зависимости $\tau = d/v_{св}$, где d — размер теплового источника на поверхности свариваемой пластины (приняли $d = 2$ мм).

Были проведены расчеты для трех случаев сварки: со средними технологическими показателями ($Q_a \approx 3,1$ кВт, $I \approx 150$ А, $v_{св} = 130$ м/ч), на экономичном режиме со сравнительно невысокими скоростью и мощностью ($Q_a \approx 2,1$ кВт, $I \approx 100$ А, $v_{св} = 120$ м/ч) и высокопроизводительная ($Q_a \approx 4,1$ кВт, $I \approx 200$ А, $v_{св} = 300$ м/ч). Для этих трех случаев определили распределение температур по оси x от центра действия дугового источника энергии (рис. 6). Результаты расчетов показали, что в случае сварки со средними технологическими показателями расстояние L между точкой подвода электродной проволоки и осью лазерного излучения не должно превышать 2 мм. При сварке на экономичном режиме расстояние L должно находиться в пределах до 0,8 мм, а при высокопроизводительной сварке — до 1,5 мм. Превышение расчетных расстояний приведет к снижению поглощающей способности $A(T)$, повышению доли потерь лазерного излучения за счет его отражения от поверхности свариваемого алюминиевого сплава и, как следствие, к снижению производительности. Отметим, что дальнейшее повышение производительности гибридной сварки приводит к необходимости уменьшения расстояния L . Это, по достижении определенных параметров режи-

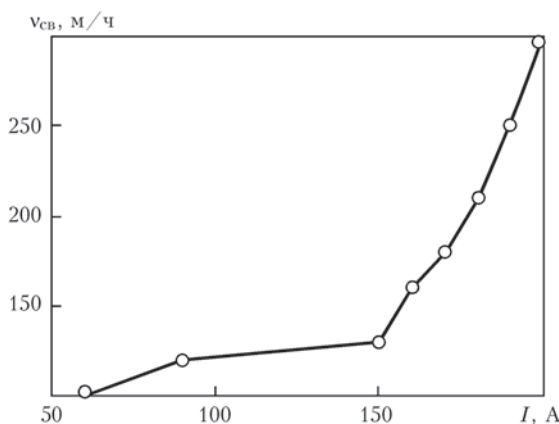


Рис. 7. Зависимость скорости $v_{св}$ лазерно-дуговой сварки сплава АМг-6 ($\delta = 2$ мм) от тока дуги I (мощность излучения CO_2 лазера 2,5 кВт)

ма, может привести к ухудшению поглощательной способности и получению непровара из-за проблематичности обеспечения условия $L < 1,0$ мм.

Экспериментальную проверку спрогнозированного подхода к повышению эффективного КПД гибридной сварки за счет выбора расстояния L между точкой подвода электродной проволоки и осью лазерного излучения проводили на образцах из алюминиевого сплава АМг6 толщиной $\delta = 2$ мм с применением электродной проволоки Св-АМг6 диаметром 1,2 мм. При этом использовали CO_2 -лазер ЛТ-104 мощностью до 10 кВт [12] и типовое оборудование Fronius TPS-2700 для сварки плавящимся электродом. Гибридную сварку проводили в среде аргона с расходами для защиты корня шва 8...10 л/мин и сварочной ванны 12...14 л/мин. При этом мощность излучения, попадающего на образец, составляла 2,5 кВт, а сварочный ток изменяли в пределах $I = 60...300$ А. Расстояние между точкой подвода электродной проволоки и осью лазерного излучения составляло $L = 1...2$ мм (в среднем 1,5 мм). Первой по ходу сварки располагали электрическую дугу, затем сфокусированное лазерное излучение. В ходе экспериментов, повышая ток I , определяли скорость сварки $v_{св}$ по критерию формирования качественного соединения. В результате была получена зависимость, приведенная на рис. 7.

Анализ характера данной зависимости позволяет утверждать следующее. До тех пор, пока мощности дугового теплового источника, действующего на поверхности свариваемого алюминиевого сплава, не стало достаточно для того, чтобы создать на этой поверхности ванну расплава, протяженность которой по оси x превысила бы величину L , производительность сварки практически не повышалась с повышением сварочного тока. При этом значительная часть мощности лазерного излучения терялась за счет отражения от поверхности сплава. Как только мощности теплового источника хватило для создания ванны расплава требуемой протяженности, имело место резкое



повышение производительности сварки, определяемое ее скоростью. По нашему мнению, оно обусловлено скачкообразным повышением поглощательной способности и, соответственно, повышением эффективного КПД сварки за счет снижения потерь лазерной энергии.

Таким образом, при гибридной лазерно-дуговой сварке алюминиевых сплавов, для повышения эффективного КПД процесса, электрическая дуга должна обеспечивать такой сопутствующий подогрев, который позволит создать ванну расплава, перекрывающую зону действия сфокусированного лазерного излучения. При этом доля поглощенного лазерного излучения скачкообразно возрастает как минимум вдвое для длины волны CO₂-лазера и примерно втрое для длины волны Nd:YAG-лазера, что положительно сказывается не только на общем энергетическом вкладе, но и на стабилизации самой электрической дуги.

1. Шелягин В.Д., Хаскин В.Ю. Тенденции развития лазерно-дуговой сварки // Автомат. сварка. – 2002. – № 6. – С. 28–33.
2. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 5. Лазерная сварка металлов: Уч. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов; Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Высш. шк., 1988. – 207 с.

3. Носков М.М. Оптические и магнитооптические свойства металлов. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. – 219 с.
4. Киселев А.И., Акашев Л.А., Кононенко В.И. Эффективная масса электронов в расплавах алюминия, цезия и бинарной системы Al–3 at. % Ce // Ж. техн. физики. – 2004. – Т. 74, Вып. 3. – С. 20–23.
5. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справочник. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
6. Ujihara K. Reflectivity of metals at high temperatures // J. of Applied Physics. – 1972. – 43, № 5. – P. 2376–2383.
7. Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared / M.A. Ordal, L.L. Long, R.J. Bell et. al. // Applied Optics. – 1983. – 22, № 7. – P. 1099–1119.
8. Miller J. Optical properties of liquid metals at high temperatures // Phil. Mag. – 1969. – Vol. 20, № 12. – P. 1115–1132.
9. Comins N.R. The Optical Properties of Liquid Metals // Ibid. – 1972. – Vol. 25, Issue 4. – P. 817–831.
10. Peacemen D.W., Rachford H.H. The Numerical solution of parabolic and elliptic differential equations // J. Soc. Ind. Appl. Math. – 1955. – Vol. 3. – P. 28–41.
11. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение). Справочник / Под общ. ред. И.Н.Фридляндера. – К.: Коминтех, 2005. – 365 с.
12. Технологический CO₂-лазер ЛТ104 мощностью 10 кВт / В.П. Гарашук, В.Д. Шелягин, О.К. Назаренко и др. // Автомат. сварка. – 1997. – № 1. – С. 36–39.

Поступила в редакцию 30.09.2015

Сварочные электроды для ответственных конструкций. – Каталог. Сумы, 2015. – 44 с.

Каталог включает описание 138 марок покрытых электродов для сварки различных марок сталей, чугуна, цветных металлов, а также электродов для наплавки:

- электроды для сварки углеродистых и низколегированных сталей (40 марок);
- электроды для сварки легированных теплоустойчивых сталей (24 марки);
- электроды для сварки высоколегированных сталей (50 марок);
- электроды для сварки чугуна и цветных металлов (10 марок);
- электроды для наплавки (14 марок).

ООО «Сумы-Электрод» как дочернее предприятие ПАО «Сумское научно-производственное объединение», является ведущим традиционным производителем сварочных электродов специального назначения в Украине.

Высокое качество сварочных электродов, их соответствие международным стандартам, обеспечивают высокий уровень и надежность оборудования, выпускаемого объединением, которое эксплуатируется в самых экстремальных условиях: на предприятиях химической промышленности, нефтегазовой отрасли, используется в магистральных газопроводах, военно-промышленном комплексе, на атомных электростанциях и т.д.

Тесное сотрудничество с ведущими научными центрами в области сварки и высокий профессионализм наших специалистов позволили в совершенстве отработать стабильную классическую технологию производства 175 марок сварочных электродов и 41 марки сварочной проволоки, на которые получен сертификат соответствия.

Сегодня предприятие оснащено швейцарским оборудованием замкнутого технологического цикла и современной лабораторно-исследовательской базой, позволяющей проводить весь комплекс исследований и испытаний в соответствии с требованиями НТД на выпускаемую продукцию. Электродное производство имеет сертификат на систему управления качеством по ДСТУ ISO 9001:2009, сертификат «Регистра Судоходства Украины», а также разрешение на поставку сварочных материалов для ГП НАЕК «ЭНЕРГОАТОМ». Наши сварочные электроды и проволока включены в основной перечень продукции аттестации системы качества Сумского НПО по ISO 9001:2008 фирмой «Бюро ВЕРИТАС».

Предприятие готово принять и выполнить любой заказ на изготовление сварочных электродов, провести полный цикл их сертификационных испытаний, обеспечить соответствие всех требований НТД и гарантировать высокое качество своей продукции. Кроме этого предприятием изготавливаются электроды по отдельно согласованным с заказчиком техническим требованиям.

E-mail: frunze@i.ua





О ВЛИЯНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ В СВАРОЧНОЙ ЦЕПИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РЕЖИМА ДУГОВОЙ СВАРКИ

Г.А. ЦЫБУЛЬКИН

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Глубокое изучение влияния различного рода дестабилизирующих факторов на устойчивость протекания сварочного процесса является одной из основных задач при его роботизации. В статье исследуется влияние емкости («паразитной» или специально введенной в сварочную цепь) на устойчивость режима дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа. Показано, что при больших и средних сварочных токах, т. е. когда рабочая точка располагается на возрастающем или неизменном участке вольт-амперной характеристики дуги, наличие емкости в сварочной цепи не влияет на устойчивость установившегося режима дуговой сварки. В случае же малых токов, когда рабочая точка располагается на падающем участке этой характеристики, обеспечение устойчивости режима дуговой сварки возможно лишь при ограниченных значениях указанной емкости. Установленные критерии в виде алгебраических неравенств позволяют сравнительно просто оценивать область значений этой емкости, внутри которой гарантируются устойчивые режимы. Результаты, изложенные в данной статье, будут полезными при разработке роботизированных сварочных технологий и соответствующего технологического оборудования. Библиогр. 17, рис. 5.

Ключевые слова: роботизированная дуговая сварка, плавящийся электрод, электрическая емкость, установившиеся режимы, устойчивость, переходные процессы

В недавно опубликованной статье [1] рассмотрено влияние емкости на процессы, протекающие в электрической дуге, питаемой от источника постоянного тока. Для изучения этих процессов авторами использовалась схема замещения электрической дуги двухполюсником, включающим в себя дифференциальное сопротивление дуги и последовательно с ним включенной малой паразитной индуктивностью, зашунтированной активным сопротивлением, а параллельно двухполюснику подключена емкость.

В несколько ином аспекте рассматривалась подобная задача в фундаментальном труде А.А. Андропова, А.А. Витта и С.Э. Хайкина «Теория колебаний» [2]. Там в качестве примера исследовалась устойчивость установившихся режимов в электрической цепи с дугой, включенной последовательно с индуктивностью и зашунтированной емкостью (см. рис. 1). Сама же дуга рассматривалась как некоторый элемент электрической цепи, статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) которой отображает основные свойства дуги и имеет, как известно [3–10], решающее значение для выбора способа ее питания и стабилизации.

В [2] получены условия асимптотической устойчивости установившихся режимов в виде следующих неравенств:

$$R + S_a > 0, \quad L + S_a RC > 0, \quad (1)$$

где $S_a = du_a/di$ — тангенс угла наклона ВАХ электрической дуги (дифференциальное сопротивление дуги) в окрестности точки, соответствующей установившемуся режиму, а смысл остальных

обозначений ясен из рисунка. Из выражений (1) непосредственно видно, что если $S_a \geq 0$, то оба неравенства будут выполнены и, следовательно, установившийся режим асимптотически устойчив при любых значениях емкости C . Если же $S_a < 0$ (падающий участок ВАХ дуги), то установившийся режим будет асимптотически устойчивым только для тех значений параметров цепи, которые удовлетворяют условиям

$$R > |S_a|, \quad C < \frac{L}{R|S_a|}. \quad (2)$$

Первое неравенство в (2) называют критерием Кауфмана [3, 8]; записывают его чаще в виде $|du_R/di| > |du_a/di|$, где u_R — падение потенциала на сопротивлении R .

Результаты, полученные в [2], относятся к случаю, когда длина электрической дуги в процессе ее горения остается неизменной (вольтова дуга). Возникает естественный вопрос: каково влияние емкости C на устойчивость процессов, протекающих в реальной сварочной цепи при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитно-

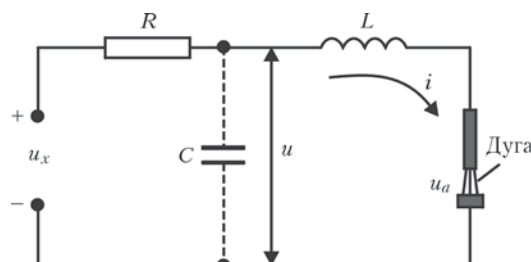


Рис. 1. Схема цепи с электрической дугой, сопротивлением R , индуктивностью L и емкостью C

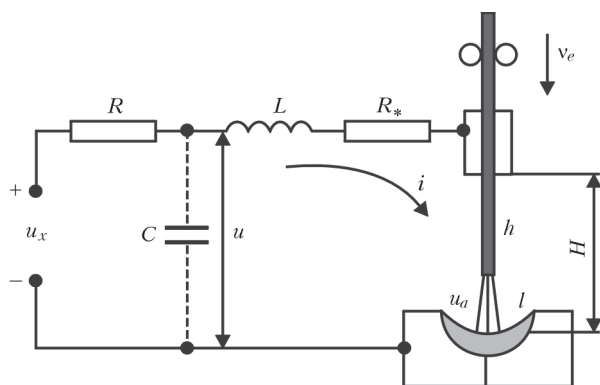


Рис. 2. Схема сварочной цепи с плавящимся электродом и емкостью C

го газа, когда длина дуги в принципе является переменной величиной? Судя по известным публикациям (см., например, [3–12] и приведенную там библиографию) этот вопрос до сих пор оставался недостаточно изученным. В силу того, что дуговая сварка плавящимся электродом в среде защитного газа является одной из доминирующих сварочных технологий, поставленный вопрос представляет практический интерес и заслуживает, на наш взгляд, детального изучения.

Рассмотрим схему сварочной цепи, изображенной на рис. 2. Она отличается от схемы на рис. 1 тем, что в ней используется плавящийся электрод, который подается в зону сварки с определенной скоростью v_e . Скорость подачи электрода $v_e = \text{const}$ и скорость его плавления $v_m = v_m(t)$ в произвольный момент времени t связаны с текущим значением вылета электрода $h = h(t)$ соотношением

$$h = h_0 + v_e t - \int_0^t v_m(t) dt, \quad (3)$$

где h_0 — начальное значение вылета электрода. Скорость плавления электрода v_m в свою очередь зависит от сварочного тока $i = i(t)$ и от теплофизических и геометрических свойств электрода. Эту зависимость часто аппроксимируют линейной функцией [5, 6, 13]

$$v_m = Mi, \quad (4)$$

где M — параметр, характеризующий указанные свойства.

Расстояние H между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны при роботизированной дуговой сварке поддерживается постоянным. Это расстояние, как видно из схемы, равно сумме текущих значений длины дуги $l = l(t)$ и вылета электрода $h = h(t)$, т. е.

$$H = l + h = \text{const}. \quad (5)$$

Соотношения (3)–(5) дополним зависимостью [12, 13]

$$u_a = u_0 + El + S_a i \quad (6)$$

и дифференциальными уравнениями

$$L \frac{di}{dt} + R_* i = u - u_a, \quad C \frac{du}{dt} = \frac{u_x - u}{R} - i, \quad (7)$$

составленными на основании рассматриваемой схемы и законов Кирхгофа.

В уравнениях (6) и (7) u_a — напряжение на дуге; u_0 — сумма приэлектродных падений напряжений; $E = du_a/dl$ — напряженность электрического поля в столбе дуги; R_* — суммарное сопротивление подводящих проводов, вылета электрода и скользящего контакта в мундштуке сварочной горелки.

Исключив переменные i , h , v_m , u , u_a из системы уравнений (3)–(7), получим одно дифференциальное уравнение относительно переменной l :

$$CL \frac{d^3 l}{dt^3} + \left(\mu CR + \frac{L}{R} \right) \frac{d^2 l}{dt^2} + (1 + \mu + CEM) \frac{dl}{dt} + \frac{EM}{R} l = \frac{M}{R} (u_x - u_0) - (1 + \mu) v_e. \quad (8)$$

Все размерные параметры, фигурирующие в этом уравнении, положительны. Безразмерный параметр μ , равный

$$\mu = \frac{R_* + S_a}{R}, \quad (9)$$

может принимать как положительное, так и отрицательное значение в зависимости от знака S_a и от соотношения между $|S_a|$ и R_* в окрестности рабочей точки. В дальнейшем будем полагать, что $|\mu| < 1$. Установившееся значение длины дуги $l_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} l(t)$, т. е. ее значение при

$$\frac{d^3 l}{dt^3} = 0, \quad \frac{d^2 l}{dt^2} = 0, \quad \frac{dl}{dt} = 0,$$

определяется согласно (8) выражением:

$$l_\infty = \frac{u_x - u_0}{E} - \frac{R(1 + \mu)}{EM} v_e, \quad (10)$$

в которое, как мы видим, не входит емкость C .

Рассмотрим теперь, каково влияние оказывает эта емкость на устойчивость режима дуговой сварки. Введем переменную $\lambda = l - l_\infty$. С учетом этой переменной и выражений (8) и (10) получим уравнение

$$CL \frac{d^3 \lambda}{dt^3} + \left(\mu CR + \frac{L}{R} \right) \frac{d^2 \lambda}{dt^2} + (1 + \mu + CEM) \frac{d\lambda}{dt} + \frac{EM}{R} \lambda = 0, \quad (11)$$

описывающее переходный процесс в сварочной цепи.

Из этого уравнения непосредственно видно, что если будут выполняться условия

$$\begin{aligned} \mu CR^2 + L &> 0, \quad 1 + \mu + CEM > 0, \\ \mu R^2 EMC^2 + \mu R^2(1 + \mu)C + L(1 + \mu) &> 0, \end{aligned} \quad (12)$$



то согласно критерию Гурвица [14] установившийся режим в рассматриваемой схеме будет асимптотически устойчив.

Рассмотрим отдельно три частных случая.

1) $S_a \leq 0$, т. е. ВАХ дуги в окрестности рабочей точки возрастает или остается неизменной (дуговая сварка на больших и средних токах). В этом случае согласно (9) $\mu > 0$. Легко убедиться, что при этом все три условия устойчивости (12) выполняются при любых значениях емкости C .

2) $S_a < 0$ и, кроме того, $|S_a| \leq R_*$. Это соответствует падающему участку ВАХ дуги (сварка на малых токах) и тому случаю, когда дифференциальное сопротивление дуги S_a по абсолютной величине меньше или равно суммарному сопротивлению подводящих проводов, вылета электрода и скользящего контакта в мундштуке сварочной горелки. В этом случае $\mu \geq 0$. Следовательно, и теперь при любых значениях емкости C выполняются все три условия устойчивости (12).

3) $S_a < 0$, но в то же время $|S_a| > R_*$. В этом случае согласно (9) $\mu < 0$, а это означает, что установившийся режим (10) будет устойчивым только тогда, когда будут, согласно (12), выполняться следующие условия:

$$C < \frac{L}{|\mu| R^2}, \quad 1 + CEM > |\mu|, \quad \frac{EM}{(1 - |\mu|)} C^2 + C < \frac{L}{|\mu| R^2}. \quad (13)$$

Рассматривая эти условия легко заметить, что при $|\mu| < 1$ второе условие выполняется всегда. Если при этом выполняется третье условие, то непременно будет выполняться и первое условие. Само же третье условие представляет собой алгебраическое неравенство второй степени относительно C . Его решение имеет вид

$$C < -a + \sqrt{a^2 + 2ab}, \quad (14)$$

где

$$a = \frac{1 - |\mu|}{2EM}, \quad b = \frac{L}{|\mu| R^2}. \quad (15)$$

Неравенство (14) дает нам область возможных значений емкости C , при которых гарантируется устойчивость режима дуговой сварки, описываемого уравнением (8) при $\mu < 0$. В некоторых случаях, например, при экспресс-анализе устойчивости, вместо (14) удобнее использовать более простое соотношение

$$C < \sqrt{ab}, \quad (16)$$

которое при $b > 4a$ также удовлетворяет третьему неравенству из (13), но ограничивает несколько меньшую область значений емкости C по сравнению с «точной» областью, определяемой соотношением (14). Заметим, что условие $b > 4a$ можно

обеспечить путем подбора нужного значения R в формулах (15), которое фактически определяет крутизну ВАХ источника питания сварочной дуги в рассматриваемой рабочей точке: $R = |du/di|$.

Итак, при сварке на малых токах, когда ВАХ дуги имеет падающий участок и при этом $|S_a| > R_*$, для обеспечения устойчивости режима дуговой сварки кроме условия $|\mu| < 1$ должно выполняться еще и условие (14) или два более простых условия: $C < \sqrt{ab}$ и $b > 4a$. В последнем случае условия устойчивости с учетом (15) и (16) можно записать в окончательном виде

$$|\mu| < 1, \quad \frac{LEM}{2| |} \quad C^2 < \frac{L(1 - |\mu|)}{2R^2 |\mu| EM}. \quad (17)$$

Первое условие из (17) при $R_* = 0$ сводится, согласно (9), к критерию Кауфмана $|S_a| < R$, т. е. является некоторым уточнением этого критерия. Второе условие задает верхнюю границу возможных углов наклона ВАХ источника питания дуги при уже выбранных остальных параметрах сварочной цепи. Третье условие ограничивает величину емкости C сверху. Условия устойчивости (17), в отличие от условий (2), связывают между собой не только параметры C, L, R, S_a но еще и параметры R_*, M и E , характеризующие электрические, теплофизические и геометрические свойства плавящегося электрода и напряженность электрического поля в столбе дуги.

Следует, однако, иметь в виду, что выполнение условий (17) обеспечивает лишь принципиальную возможность прихода системы в установившееся состояние после небольшого внешнего возмущения, но не гарантирует отсутствие негативного влияния емкости C на сам характер переходных процессов в сварочной цепи. Для получения наиболее полного представления о степени указанного влияния используем компьютерное моделирование процесса дуговой сварки. Основное внимание сосредоточим на режимах малых сварочных токов, в области которых, как известно [3–6, 8], характеристика дуги является падающей. Именно на этих режимах, согласно (17), следует ожидать существенного влияния емкости C на переходные процессы.

При моделировании будем использовать типовые значения параметров режима роботизированной дуговой сварки на малых токах [15]: $u_x = 30$ В, $i = 40$ А, $v_e = 25$ мм/с, $H = 15$ мм и реальные параметры сварочной цепи $R = 6 \cdot 10^{-2}$ Ом, $R_* = 1 \cdot 10^{-2}$ Ом, $L = 1 \cdot 10^{-3}$ Гн, $E = 2$ В/мм, $u_0 = 18$ В, $M = 0,5$ мм/(с·А). Что касается дифференциального сопротивления дуги S_a , то (из-за известных трудностей его непосредственного измерения) возьмем значение из графика вольт-амперной характеристики,



приведенного в работе [6]; оно в области малых токов ($i = 20 \dots 60$ А) примерно равно $S_a \approx -1,5 \cdot 10^{-2}$ В/А.

Задавая при моделировании диапазон возможных значений емкости C , будем исходить из следующих соображений. Любая электрическая цепь содержит так называемую «паразитную» емкость. Ее минимальное значение для сварочной цепи, согласно [6], примерно равно $C_m \approx 1 \cdot 10^{-8}$ ф. В то же время известно [1], что емкость C может быть специально введена в сварочную цепь. В таком случае желательно определить верхнюю границу значений этой емкости, выше которой переходный процесс становится неудовлетворительным с точки зрения технических требований, предъявляемых к дуговой сварке плавящимся электродом.

В качестве «возмущающего» воздействия, приводящего к возникновению переходного процесса (11) в сварочной цепи, используем, как показано на рис. 3, скачкообразное изменение расстояния $\Delta H = H_2 - H_1$ между торцом токоподводящего мунштука и свободной поверхностью сварочной ванны. Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 4, 5. На рис. 4, а изображены три графика $l = l(t)$, представляющие собой реакцию длины дуги $l(t)$ на возмущение $\Delta H = -3$ мм при $S_a = -1,5 \cdot 10^{-2}$ В/А и при различных значениях емкости C . Кривая l является графиком нескольких переходных процессов, которые практически совпадают, хотя значения емкости, при которых были получены эти графики, принадлежат широкому интервалу $0 < C \leq 0,1$ ф. Отсюда можно сделать вывод, что пока емкость C не превышает некоторой величины (в нашем случае 0,1 ф), ее влияние на переходный процесс пренебрежимо мало. И только при дальнейшем увеличении этой емкости форма кривых переходного процесса заметно изменяется (см. кривые 2 и 3), приобретая колебательный характер, причем амплитуда колебаний увеличивается по мере увеличения емкости.

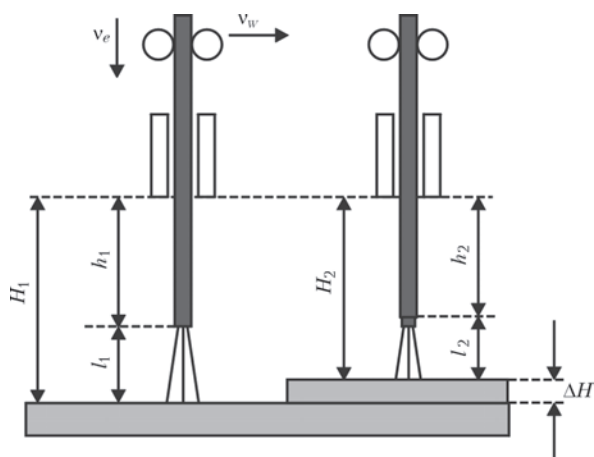


Рис. 3. Схема реализации скачкообразного возмущения ΔH (v_w — скорость движения электрода)

На рис. 4, б изображены графики $l = l(t)$, полученные при тех же значениях емкости C , что и графики на рис. 4, а. Но в отличие от них графики на рис. 4, б получены при условии $S_a > 0$. Сравнивая эти графики, приходим к выводу, что в случае, когда $S_a < 0$, влияние емкости C на переходные процессы в сварочной цепи на много большее, чем в случае, когда $S_a > 0$.

Следует обратить внимание на еще одно немаловажное обстоятельство. Для того, чтобы получить верное представление о переходных процессах, протекающих в сварочной цепи при $S_a < 0$, нужно наряду с другими ее параметрами учитывать и суммарное сопротивление R_* . Это сопротивление обычно не учитывают, считая его пренебрежимо малым. На самом же деле по порядку величины оно соизмери-

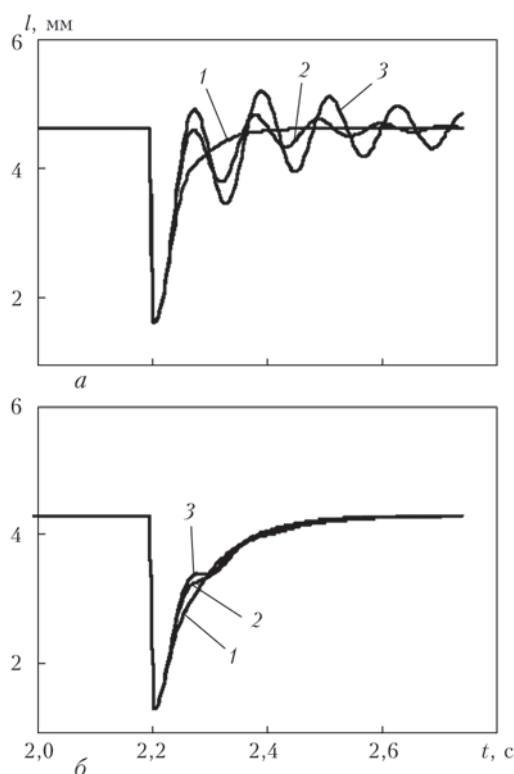


Рис. 4. Переходные процессы $l = l(t)$: а — при $S_a = -1,5 \cdot 10^{-2}$ В/А; б — при $S_a = 1,5 \cdot 10^{-2}$ В/А (l — $C \leq 0,1$ ф; 2 — $C = 0,3$ ф; 3 — $C = 0,4$ ф)

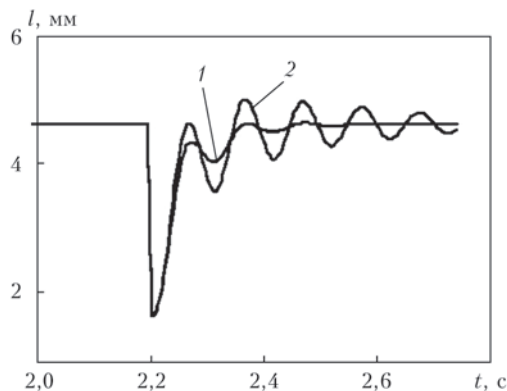


Рис. 5. Переходные процессы $l = l(t)$ при $C = 0,2$ ф и $S_a = -1,5 \cdot 10^{-2}$ В/А (l — $R_* = 1 \cdot 10^{-2}$ Ом; 2 — $R_* = 0$)



мо с абсолютным значением дифференциального сопротивления дуги S_a . Следовательно, его влияние на переходный процесс в сварочной цепи может оказаться весьма ощутимым.

Иллюстрацией к сказанному служат результаты, приведенные на рис. 5, на котором представлены графики $I = I(t)$, полученные при двух различных значениях сопротивления R_* . Кривая 1 на этом рисунке есть реакция длины дуги $l(t)$ на возмущение $\Delta H = -3$ мм, когда $R_* = 1 \cdot 10^{-2}$ Ом, а кривая 2 — когда $R_* = 0$. Из рисунка хорошо видно, что эти кривые значительно отличаются друг от друга. Отсюда непосредственно следует, что игнорируя сопротивление R_* , мы заведомо получаем неверную информацию о переходных процессах, протекающих в сварочной цепи.

На основании выше изложенного можно теперь сделать следующие выводы.

1. При больших и средних сварочных токах, когда рабочая точка располагается на возрастающем или неизменном участке вольт-амперной характеристики дуги, наличие емкости C в сварочной цепи не влияет на устойчивость режима дуговой сварки. Емкость C не влияет на устойчивость и в случае малых токов, когда рабочая точка располагается на падающем участке этой характеристики, но если при этом дифференциальное сопротивление дуги S_a по абсолютной величине меньше суммарного сопротивления подводящих проводов, вылета электрода и скользящего контакта в мундштуке сварочной горелки, т. е. если $|S_a| < R_*$.

2. В том случае, когда $|S_a| > R_*$, наличие в сварочной цепи достаточно большой емкости C может привести к потере устойчивости режима дуговой сварки. Установленные критерии в виде алгебраических неравенств (17) позволяют оценивать верхнюю границу области значений этой емкости, внутри которой гарантируются устойчивые сварочные режимы.

3. Результаты компьютерного моделирования процессов, протекающих в сварочной цепи, показывают, что малая емкость C (порядка сотых долей фарады) не оказывает заметного влияния на переходные процессы при дуговой сварке как на малых, так и на больших токах. Дальнейшее увеличение этой емкости при сварке на малых токах приводит к возникновению заметных колебаний длины дуги, которые увеличиваются по мере приближения емкости к границе устойчивости, определяемой условиями (17). Приведенные результаты моделирования подтверждают еще одно немаловажное замечание о том, что для получения верного представления о переходных процессах, протекающих в сварочной цепи, необходимо

учитывать реальные сопротивления подводящих проводов, вылета электрода и скользящего контакта в мундштуке сварочной горелки.

В заключение заметим, что в последнее время особое внимание специалистов направлено на решение одной из трудных проблем, связанных с роботизацией дуговой сварки тонкостенных изделий и конструкций [16, 17]. Очевидно, что их сварка должна производиться на малых и очень малых сварочных токах. В этой связи результаты, изложенные в данной статье, будут полезными при разработке роботизированных сварочных технологий и соответствующего технологического оборудования.

1. *Вережаго Е.Н., Костюченко В.И.* Неустойчивость режима в цепи с емкостью и электрической дугой, питаемой от источника постоянного тока // Автомат. сварка. — 2014. — № 8. — С. 44–48.
2. *Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э.* Теория колебаний. — М.: Госиздат физико-математической литературы, 1959. — 915 с.
3. *Финкельбург В., Меккер Г.* Электрические дуги и термическая плазма. — М.: Изд-во иностр. лит., 1961. — 370 с.
4. *Хренов К.К., Эсбиян Э.М.* Влияние статических характеристик дуги и источника питания на устойчивость горения и режима дуги // Свароч. производство. — 1962. — № 5. — С. 10–13.
5. *Патон Б.Е., Лебедев В.К.* Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. — М.: Машиностроение, 1966. — 359 с.
6. *Лесков Г.И.* Электрическая сварочная дуга. — М.: Машиностроение, 1970. — 335 с.
7. *Эсбиян Э.М.* Исследование электрических и технологических свойств малоамперной сварочной дуги // Сб. «Сварка специальных металлов и сплавов». — Киев: Изд-во АН УССР, 1963. — С. 137–152.
8. *Сисоян Г.А.* Электрическая дуга в электрической печи. — М.: Металлургия, 1974. — 304 с.
9. *Ионов Ю.Г.* К теории нестационарных процессов электрической дуги постоянного тока // Известия СО АН СССР. Сер. Технические наук. — 1986. — № 4. — Вып. 1. — С. 84–88.
10. *Ленивкин В.А., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н.* Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. — М.: Машиностроение, 1989. — 264 с.
11. *Ran J.* Arc welding and control theory. Proceedings of International Symposium of Japan Welding Society. — 1990. — Vol. 11 — P. 1033–1035.
12. *Судник В.А., Ерофеев В.А., Логвинов Р.В.* Исследование устойчивости процесса дуговой сварки в среде защитного газа // ТулГу. — 1999. — С. 110–120.
13. *Цыбулькин Г.А.* О влиянии малых параметров на устойчивость процесса дуговой сварки плавящимся электродом // Автомат. сварка. — 2008. — № 6. — С. 29–32.
14. *Цыбулькин Г.А.* К оценке устойчивости одного класса динамических систем // Межд. науч.-техн. журнал «Проблемы управления и информатики». — 2014. — № 3. — С. 5–11.
15. *Цыбулькин Г.А.* Адаптивное управление в дуговой сварке. — Киев: Сталь, 2014. — 171 с.
16. *Грицына А.Н.* Проблемы формирования качественных сварных соединений тонкостенных конструкций при их выполнении неадаптивными роботами // 6-я Межд. науч.-практ. конф. «Инновационные технологии в машиностроении и металлургии»: Сб. статей (10 сент. 2014). — Ростов-на-Дону: Изд-во ДГТУ, 2014. — С. 339–350.
17. *Людмирский Ю.Г.* Роботизация производства малогабаритных сварных конструкций. — Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ, 2002. — 140 с.

Поступила в редакцию 08.10.2015



СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАРОПРОВОДОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В.В. ДМИТРИК¹, О.В. СОБОЛЬ¹, М.А. ПОГРЕБНОЙ¹, А.В. ГЛУШКО¹, Г.И. ИЩЕНКО²

¹НТУ «Харьковский политехнический институт». 61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21. E-mail: svarka126@ukr.net

²ОАО «Турбоатом». г. Харьков, пр-т Московский, 199. E-mail: office@turboatom.com.ua

Продление ресурса эксплуатации паропроводов является актуальной задачей. Изучение особенностей структурного состояния металла сварных соединений длительно эксплуатируемых паропроводов позволяет оценить уровень их повреждаемости и обосновать остаточный ресурс. В работе установлено, что структурные изменения сварных соединений из сталей 15X1M1Ф и 12X1MФ обусловлены диффузионными процессами, образованием межзеренных сегрегаций, карбидными реакциями, зарождением и развитием пор ползучести. Намечены пути управления структурным состоянием металла участков ЗТВ сварных соединений, направленные на уменьшение структурной неоднородности и продления ресурса эксплуатации. Библиогр. 10, рис. 10.

Ключевые слова: теплоустойчивые стали, сварные соединения паропроводов, структура, карбиды, поры, повреждаемость, диффузия, деформация, зона термического влияния

Деградацию металла длительно эксплуатируемых паропроводов из сталей 15X1M1Ф и 12X1MФ обеспечивают проходящие в нем физико-химические процессы. Интенсивность таких процессов, вызывающих структурные изменения в металле сварных соединений, является более высокой, чем в основном металле, что обусловлено наличием исходной структурной, химической и механической неоднородности, образующейся под воздействием сварочного нагрева. Уровень неоднородности в сварных соединениях существенно выше, чем в основном металле.

В процессе дальнейшей эксплуатации паропроводов, особенно после 250000 ч наработки, химическая, структурная и механическая неоднородности металла сварных соединений получают дальнейшее развитие. На наш взгляд, неоднородность каждого вида сначала следует рассматривать отдельно для последующего изучения их общего влияния на деградацию сварных соединений.

Целью работы является изучение особенностей структурных изменений металла длительно эксплуатируемых сварных соединений из сталей 15X1M1Ф и 12X1MФ, что позволит оценить уровень их повреждаемости и уточнить остаточный ресурс.

Металл шва и участки зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений из приведенных термически упрочняемых сталей могут иметь исходную (после высокого отпуска) сорбитную, ферритно-бейнитную, ферритно-сорбитную структуры, а также другие структуры, допуска-

емые нормативной документацией [1–4]. Наибольший уровень структурной и механической неоднородности имеет участок неполной перекристаллизации металла ЗТВ, где новые продукты распада аустенита в исходной структуре представляют (в зависимости от сварочного нагрева) перлит, сорбит, троостит или даже мартенсит. Целесообразно, путем оптимизации сварочного нагрева, получать сварные соединения с возможно меньшей структурной неоднородностью. Например, ферритно-бейнитную или бейнитную структуру металла шва [5–7].

В процессе длительной эксплуатации сварных соединений в условиях ползучести (температура эксплуатации $T_s = 545 \dots 585$ °С, рабочее давление $P_s = 20 \dots 25$ МПа), их структуры с различной интенсивностью превращаются в отличающиеся по строению ферритно-карбидные смеси. Интенсивность структурных изменений, существенно зависящая от их исходного состояния, в наибольшей мере после наработки сварных соединений свыше 250000 ч проходит на участках сплавления, перегрева и неполной перекристаллизации металла ЗТВ [8, 9]. Структурные изменения обусловлены диффузионным перемещением хрома и молибдена из центральных зон кристаллов α -фазы в их приграничные зоны (объемная диффузия) и диффузионным перемещением приведенных элементов по границам зерен (зернограничная диффузия); образованием сегрегаций в приграничных зонах кристаллов; перемещением дислокаций путем скольжения и ползучести, что приводит к появлению фрагментации

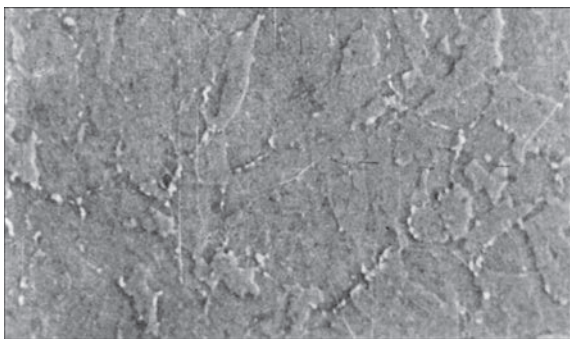


Рис. 1. Карбидные выделения в исходной структуре участка неполной перекристаллизации металла ЗТВ сварного соединения из стали 15X1M1F ($\times 2500$)

(полигонизации) зерен α -фазы; переходом хрома и молибдена из α -фазы в карбиды, а также образованием новых карбидов VC и Mo_2C ; протеканием карбидных реакций $\text{M}_3\text{C} \rightarrow \text{M}_7\text{C}_3 \rightarrow \text{M}_{23}\text{C}_6$; коагуляцией карбидных фаз I гр.; зарождением и развитием микропор ползучести, а также превращением их в макропоры и макротрещины. Каждый из приведенных процессов соответственно способствует изменению структуры металла сварных соединений, что в совокупности определяет его деградацию и снижение жаропрочности. В связи с этим, необходимо отдельное рассмотрение повреждаемости по коррозионно-усталостному механизму.

В исходной структуре сталей 15X1M1F и 12X1M1F (рис. 1) по телу зерен α -фазы и по их границам расположены карбиды I гр. M_3C (в основном), M_7C_3 и M_{23}C_6 (небольшое количество), а также II гр. — мелкодисперсные карбиды VC. Их исходная форма является округлой или игольчатой (VC).

В процессе старения самодиффузия хрома и молибдена из центральных зон зерен α -фазы в их приграничные зоны вызывает изменение сил связи между атомами. Диффузионное перемещение атомов хрома и молибдена, обусловленное градиентами их химических потенциалов, приводит к

образованию приграничных сегрегационных зон в кристаллах α -фазы [8, 9]. Наличие таких зон создает условия для прохождения карбидных реакций $\text{M}_3\text{C} \rightarrow \text{M}_7\text{C}_3 \rightarrow \text{M}_{23}\text{C}_6$, а также для коагуляции карбидов M_7C_3 и, преимущественно, M_{23}C_6 . Коагуляция карбидов по границам зерен происходит, в основном, путем коалесценции, что приводит к образованию удлиненной, с возможным наличием разветвленности, формы карбидов (рис. 2). Коагулирующие (с меньшей интенсивностью) карбиды M_7C_3 и M_{23}C_6 , которые расположены по телу зерен α -фазы, в основном, имеют форму, близкую к округлой. Карбид ванадия ($a_0 = 0,416$ нм) остается стабильным до 290000 ч эксплуатации [7]. Стабильность дисперсных карбидов ванадия является одним из факторов, определяющих ресурс данных сталей.

В процессе старения ($t_s > 270000$ ч) по границам зерен α -фазы из удлиненных карбидов M_7C_3 и M_{23}C_6 , имеющих диаметр около 0,15...0,3 мкм, образуются прерывистые цепочки (рис. 3). Приведенные карбиды имеют близкие поперечные размеры и существенно отличающиеся размеры по длине.

Можно показать, что решающее влияние на охрупчивание оказывают находящиеся на границах зерен карбиды M_7C_3 и M_{23}C_6 , имеющие удлиненную форму. Например, ударная вязкость (KCU) сварного соединения паропровода, работающего в условиях острого пара, и имеющего структуру металла, приведенную на рис. 3, составляла 31 Дж/см², а основного металла с равномерно распределенными карбидами — 74 Дж/см². Выявили, что коагуляция карбидных фаз по границам зерен способствует дальнейшему снижению ударной вязкости до значения, ниже допустимого [1–4]. В процессе длительной наработки ($t_s > 250000$ ч) диффундирующие из α -фазы элементы хрома и молибдена образуют новые карбиды (VC и Mo_2C), а также переходят в карбиды I гр., преимущественно в M_{23}C_6 . Выявили, что после наработки 270000 ч

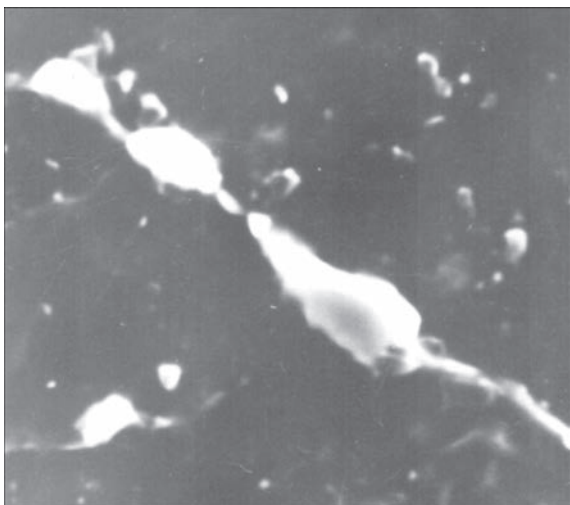


Рис. 2. Коагуляция путем коалесценции карбидов M_{23}C_6 по границам зерен α -фазы ($\times 4000$)

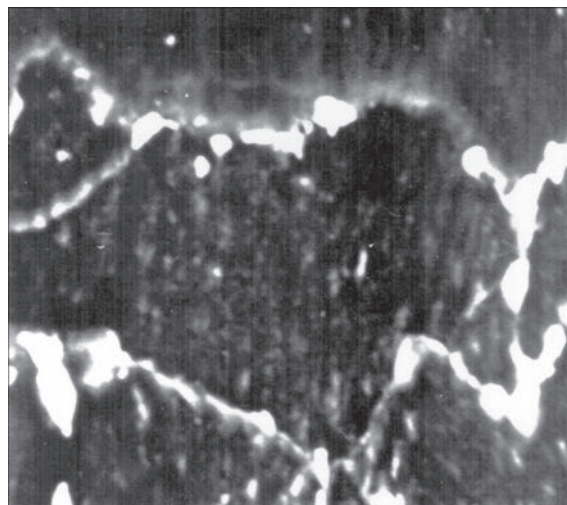


Рис. 3. Распределение карбидов M_{23}C_6 по границам зерен α -фазы ($\times 2500$)

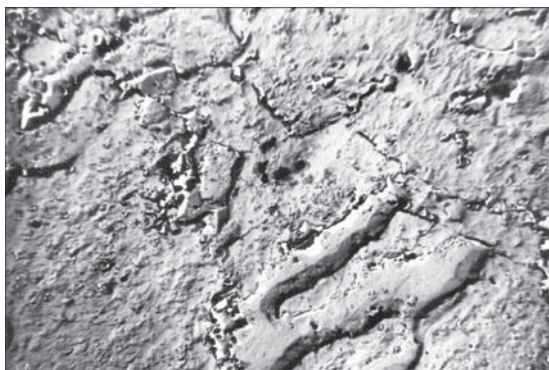


Рис. 4. Микроструктура ($\times 4500$) зерна на участке перегрева металла ЗТВ

в металле участка перегрева ЗТВ общее содержание легирующих элементов в карбидах составляло по хрому 60...65 %, молибдену — 70...75 % и ванадию — 80...82 %. Различная длина карбидов, на наш взгляд, обусловлена отличающейся скоростью достройки их решеток, что связано с уровнем сегрегации хрома и молибдена в приграничных зонах α -фазы и их диффузионным перемещением. Отличие интенсивности диффузионного перемещения характерно как для объемной, так и для зернограничной диффузии. Увеличение приграничных сегрегационных зон по ширине обеспечивается, на наш взгляд, в основном путем объемной диффузии, а их протяжность — зернограничной диффузией. В процессе длительного старения отмечается периодическое изменение направленности переходов отдельных атомов хрома и молибдена при установившемся общем направлении их диффузионного перемещения, что соответствует гантельному механизму диффузии [10], который является разновидностью вакансионного механизма. Реализация переходов рассматриваемого механизма представляется возможной только при наличии образующихся в виде гантелей вакансий.

В процессе старения увеличивается диффузионная подвижность вакансий, а также подвижность дислокаций, которые перемещаются путем скольжения и переползания.

Выявление дислокаций проводили металлографическим методом, позволяющим определять места выхода дислокаций на рабочую поверхность шлифа, а также использованием метода электронной микроскопии (на просвет), что позволило оценить количественно плотность дислокаций.

Эффект перемещения дислокаций по механизму скольжения и по механизму переползания, что приводит к частичному устранению границ зерен, отмечался и ранее [6]. Рассасывание участков границ зерен, обеспечивающее последующее укрупнение зерен, можно рассматривать как начальную стадию процесса первичной рекристаллизации. Торможение дислокаций приводит к их выстраиванию в линии, а

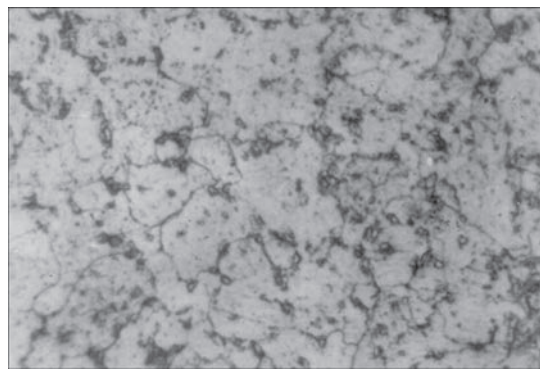


Рис. 5. Микроструктура ($\times 360$) участка неполной перекристаллизации металла ЗТВ (новые продукты распада аустенита представляют глобуляризованный перлит)

затем — в полосы, что приводит к проявлению фрагментации (полигонизации) зерен (рис. 4) и обуславливает увеличение интенсивности зарождения пор. Образующиеся новые карбидные фазы VC и Mo_2C усиливают торможение перемещающихся дислокаций, что также способствует образованию полигонального строения зерен α -фазы. Заметим, что в условиях характерного для металла паропроводов старения, одновременно с различной интенсивностью, происходит его упрочнение и разупрочнение [7].

Установлено, что наиболее высокий уровень полигонизации зерен α -фазы, а также эффект перемещения дислокаций отмечается на участке неполной перекристаллизации металла ЗТВ сварных соединений, где новые продукты распада аустенита представляют глобуляризованный перлит, расположенный в виде оторочек по границам действительных аустенитных зерен. Торможение дислокаций, перемещающихся путем скольжения, наиболее эффективно обеспечивается особо мелкодисперсными карбидами VC и в несколько меньшей мере Mo_2C и M_7C_3 , M_{23}C_6 , а также M_3C . Важно, чтобы карбиды, особенно VC, равномерно располагались по телу и границам зерен.

При массовой деформации сварных соединений паропроводов менее 1 % (наработка в услови-

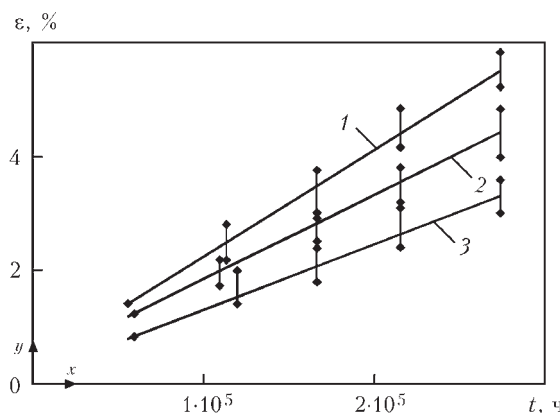


Рис. 6. Зависимость остаточной деформации от структуры новых продуктов распада аустенита участка неполной перекристаллизации металла ЗТВ: 1 — глобуляризованный перлит; 2 — сорбит; 3 — троостит

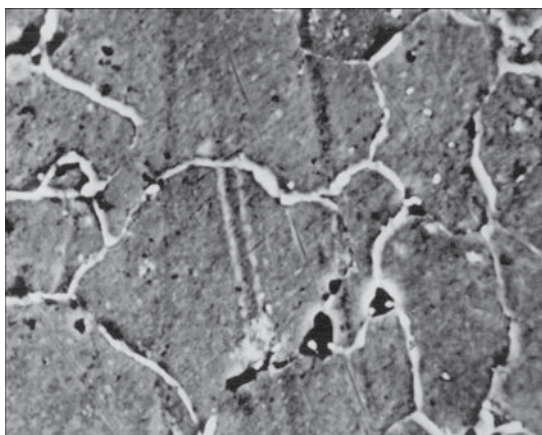


Рис. 7. Поры ползучести на границах зерен α -фазы. Нароботка сварных соединений 275000 ч ($\times 2500$)

ях ползучести около 250000 ч), участок неполной перекристаллизации металла ЗТВ (мягкая прослойка), по данным Ф.А. Хромченко [5], может деформироваться на 6...8 %. Установили [7], что применительно к наработке аналогичных сварных соединений около 276000 ч, его деформация составляет 4...5 %. Уровень деформации определяли на элементах действующих паропроводов и на образцах, испытанных на длительную прочность. На образцах, вырезанных из действующих паропроводов, изучали структуру, фрагментацию зерен α -фазы, линии и полосы скольжения, что также подтверждало уровень их деформации.

Определили, что металл шва, имеющий структуру бейнита (сплав типа 09ХМФА, основной металл – сталь марки 15Х1М1Ф), характеризуется наименьшей скоростью ползучести по сравнению с другими исходными структурными состояниями, допускаемыми нормативной документацией. Величина деформации металла шва, имеющего структуру верхнего и нижнего отпущенного бейнита, отличалась незначительно (около 7...9 %), что позволяет не учитывать его структурные различия. Выявили, что металл участка неполной перекристаллизации ЗТВ со структурой, где новые продукты распада аустенита представляют гло-

буляризованный перлит (рис. 5), деформируется в большей степени, чем металл, где новые продукты представляют сорбит, троостит или бейнит (рис. 6). Заметим, что оптимизация термических условий сварки позволяет на данном участке предотвращать образование новых продуктов распада аустенита в виде мартенсита или глобуляризованного перлита [3].

Процесс деформации сварных соединений обуславливает зарождение и развитие в их металле пор ползучести. Выявление пор проводили на шлифах, которые сначала подвергали механическому полированию, а затем электрополированию в концентрированной ортофосфорной кислоте и последующему травлению в 5%-ой HNO_3 . Приведенную обработку проводили на шлифах из стали 12Х1МФ 3...4 раза, а на шлифах из стали 15Х1М1Ф, при наличии в их структуре бейнитной составляющей, от 5 до 7 раз. В структуре участка неполной перекристаллизации металла ЗТВ, при его деформации 4...6 %, на границах контакта двух или трех зерен, где совпадают границы аустенитных зерен с границами зерен изучаемой структуры и расположены коагулирующие карбиды M_{23}C_6 , отмечается наиболее интенсивное зарождение пор (рис. 7). На границах контакта зерен, где отсутствовали коагулирующие карбиды, пор было значительно меньше. На наш взгляд, поры размером 0,03...0,07 мкм можно считать зародышевыми. Образование зародышевых пор можно считать начальной стадией повреждаемости. Поры ползучести в металле сварных соединений преимущественно образуются по границам зерен и по их телу (менее интенсивно) перпендикулярно растягивающим напряжениям. В процессе наработки сварных соединений > 250000 ч расположение пор в их структурах становится хаотическим. Следует также отметить, что на участках сплавления и неполной перекристаллизации металла ЗТВ (сварные соединения острого пара из стали 12Х1МФ, наработка > 270000 ч) интенсивность образования пор была примерно на 40...60 %

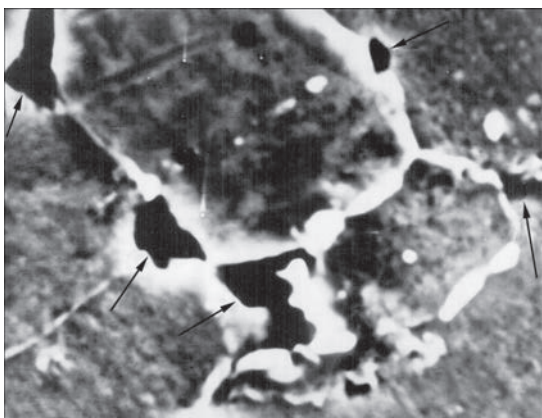


Рис. 8. Форма пор ползучести (обозначены стрелками) после наработки сварных соединений 276000 ч ($\times 3500$)

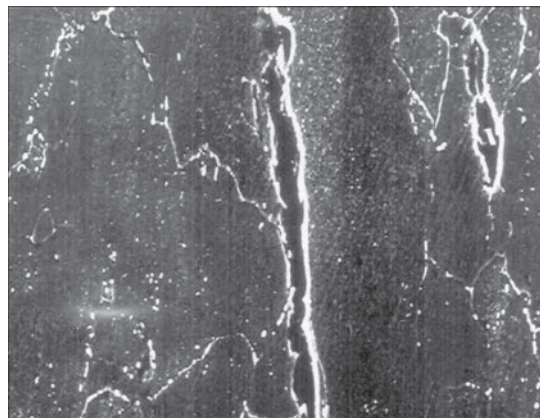


Рис. 9. Трещина ползучести в сварном соединении. Нароботка 280000 ч ($\times 2500$)

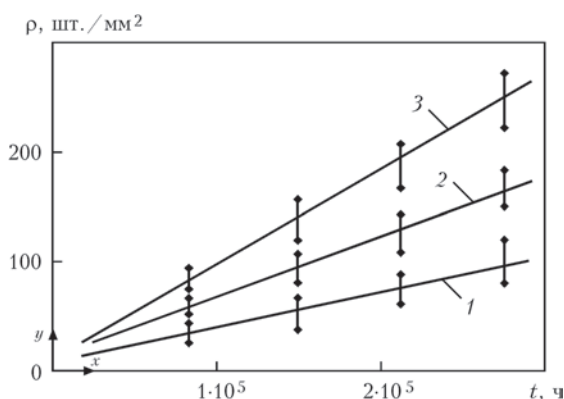


Рис. 10. Зависимость плотности пор ползучести ρ (продольный размер — 0,5...3,0 мкм), расположенных по границам зерен α -фазы, от номеров аустенитных зерен участка перегрева металла ЗТВ сварного соединения из стали 15Х1М1Ф: 1 — шестой номер; 2 — пятый; 3 — четвертый (наработка 276000 ч)

больше, чем в основном металле. На участке перегрева, соответственно, на 30 %. В процессе развития форма пор становилась разветвленной (рис. 8) и при слиянии отдельных пор образовывались трещины ползучести (рис. 9), развивающиеся по хрупкому механизму. Количество, а также интенсивность развития пор и трещин ползучести зависят от величины аустенитных зерен (рис. 10) (ГОСТ 5639–82), что характерно для участков сплавления и перегрева металла ЗТВ.

Путем испытаний на длительную прочность и ползучесть установили, что критическая степень остаточной деформации металла участка неполной перекристаллизации ЗТВ стыковых сварных соединений паропроводов из стали 15Х1М1Ф не должна превышать 1,5 %, а для стали 12Х1МФ — 2,0 % при их массовой деформации менее 1 %, а ее превышение обуславливает резкое увеличение интенсивности образования пор.

Выводы

1. Установлено, что структурные изменения металла длительно эксплуатируемых сварных соединений паропроводов из сталей 15Х1М1Ф и 12Х1МФ обусловлены диффузионными процессами; образованием сегрегаций; переходом хрома и молибдена в карбиды и образованием новых карбидов; карбидными реакциями; зарождением и развитием пор ползучести.

2. Установили, что уменьшение уровня структурной неоднородности, образующейся в условиях длительной эксплуатации сварных соединений, приводит к уменьшению интенсивности образования пор ползучести.

1. Методические указания по оценке живучести оборудования тепловых электростанций СО 153-34.17.456–2003. – М.: ОРГРЭС, 2005.
2. ОСТ 34-70-690–96. Металл паросилового оборудования электростанций. Методы металлографического анализа в условиях эксплуатации. – М.: ВТИ, 1998.
3. СО 153-34.17.-455–2003. Инструкция по продлению срока службы паропроводов из центробежнолитых труб на тепловых электростанциях. – М. СПО ОРГРЭС, 2003.
4. РД 153-34.1-17.467–2001. Экспрессный метод для оценки остаточного ресурса сварных соединений коллекторов котлов и паропроводов по структурному фактору. – М. ОРГРЭС, 2001.
5. Хромченко Ф.А. Ресурс сварных соединений паропроводов. – М.: Машиностроение, 2002. – 351 с.
6. Елпанова Н.В., Березина Т.Г. Влияние структуры на кинетику разрушения стали 12Х1МФ при ползучести // Металловедение и термич. обработка металлов. – 1989. – № 7. – С. 36–39.
7. Дмитрик В.В. Сварные соединения паропроводов. – Харьков: Майдан, 2013. – 163 с.
8. Дмитрик В.В., Барташ С.Н. Особенности деградации металла сварных соединений паропроводов ТЭС // Автомат. сварка. – 2014. – № 4. – С. 32–33.
9. Дмитрик В.В., Барташ С.Н. Особенности повреждаемости сварных соединений паропроводов по механизму ползучести // Там же. – 2010. – № 6. – С. 22–25.
10. Бутягин П.Ю. Химическая физика твердого тела. – М.: Изд-во Московского ун-та, 2006. – 265 с.

Поступила в редакцию 20.05.2015

Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Збірник наукових статей. – Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2015. – 816 с. (електронне видання <http://patonpublishinghouse.com/rus/compilations#winresurs2015>).

До збірника ввійшли статті, які підготовлені за результатами цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин», отриманими впродовж 2013–2015 рр., до реалізації якої було залучені інститути НАН України. Мета програми — розробка методологічних основ прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, створення методів, технічних засобів і технологій для оцінки технічного стану та подовження термінів експлуатації техногенно та екологічно небезпечних об'єктів.

Для наукових співробітників, інженерів, студентів старших курсів, зайнятих розробкою та експлуатацією конструкцій, споруд та машин.

Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин



ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА КАМЕРЫ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В.М. НЕСТЕРЕНКОВ¹, Л.А. КРАВЧУК¹, Ю.А. АРХАНГЕЛЬСКИЙ¹, И.А. ПЕТРИК², Ю.А. МАРЧЕНКО²

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ОАО «Мотор-Сич». 69068, г. Запорожье, пр. Моторостроителей, 15. E-mail: motor@motorsich.com

Проведены исследования по разработке технологии изготовления цельносварной наружной части переднего корпуса камеры среднего давления газотурбинного двигателя и выбраны схемы сварки наружных и внутренних стыков стоек, обеспечивающие бездефектное формирование лицевого и корневого валиков шва при сквозном проплавлении литейного титанового α -сплава ВТ5Л толщиной $\delta_m = 5 \dots 26$ мм за один проход. Система компьютерного управления процессом электронно-лучевой сварки на установке УЛ-209М позволяет выполнять в едином технологическом цикле чистку прилегающей зоны стыка от остатков загрязнений и окислов с помощью сфокусированного на поверхности металла мало-мощного электронного пучка, а также точечные, короткие и сплошные прихватки. Для установки, фиксации и вращения изделия относительно электронно-лучевой пушки предусмотрены вращатели с вертикальной и горизонтальной осями вращения. В программах для электронно-лучевой сварки, представленных в виде таблиц, задаются значения координат точек каждого отрезка пути, куда необходимо переместиться, значения токов сварки и фокусировки, амплитуды технологических разверток, а также скорость перемещения на данном отрезке. При постоянной скорости сварки $v_{св} = 12$ мм/с величины тока сварки I_n и тока фокусировки I_f в переходных местах изменения рабочего расстояния и толщины свариваемых кромок меняли по линейному закону, что обеспечивало формирование лицевого и корневого валиков сварного шва без подрезов и занижений по всей длине стыка. Библиогр. 15, рис. 7.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, электронный пучок, сквозное проплавление, лицевой и корневой валики шва, переменная толщина, схема сварки, пористость, макроструктура, компьютерное управление, видеоконтрольное устройство, программа сварки

Разработки конструктивных решений и технологических процессов в производстве газотурбинных двигателей (ГТД) в авиационной промышленности показали, что повышение технологичности конструкций, коэффициента использования металла, снижение трудоемкости и энергоемкости изделий возможны путем применения сварных конструкций.

Известно, что электронно-лучевая сварка широко применяется в отечественной и зарубежной авиационной и космической промышленности при производстве элементов авиационных двигателей [1–4].

В настоящей работе приведены последовательность и содержание технологических операций изготовления цельносварной наружной части переднего корпуса камеры среднего давления (КСД), состоящего из стоек и лопаток, способом электронно-лучевой сварки (ЭЛС). В соответствии с техническими требованиями, лопатки и стойки из литейного титанового сплава ВТ5Л после сборки в жестком сборочно-сварочном приспособлении должны быть сварены между собой по внутренним и наружным бандажным полкам с обеспечением требуемого взаимного расположения лопаток и стоек относительно оси двигателя (рис. 1). Количество лопаток и стоек — 34 шт., суммарное количество сварных швов по внутреннему и на-

ружному диаметру — 68 шт., наружный диаметр переднего корпуса КСД 1200 мм в сборочно-сварочном приспособлении не превышает 1390 мм. Процесс ЭЛС должен обеспечивать полный провар кромок переменного сечения по всей длине стыка с гарантированным формированием лицевого и корневого валиков шва без подрезов и занижений, а также защиту пера лопатки и прилегающих поверхностей от повреждения электронным пучком.

Материалом для лопаток и стоек выбран литейный среднепрочный α -сплав ВТ5Л, химический состав которого согласно ГОСТ 19807–74 включает, мас. %: 4,3...6,2 Al; $\geq 0,8$ Mo. Регламен-

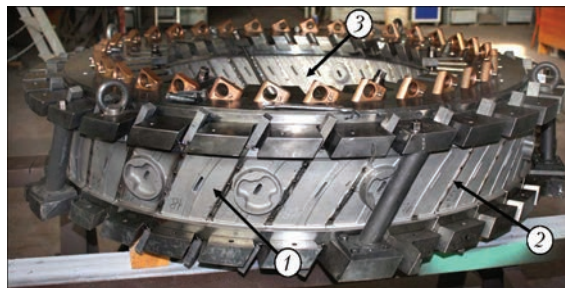


Рис. 1. Внешний вид наружной части переднего корпуса КСД в сборочно-сварочном приспособлении: 1 — стойки; 2 — наружные стыки между стойками; 3 — внутренние стыки между стойками



тированные примеси имеют следующее содержание, мас. %: 0,20 [O₂]; 0,05[N₂]; 0,015[H₂]. Сплав ВТ5Л применяется для деталей, работающих длительно при температуре до 350 °С, и упрочняющей термообработке не подвергается.

Первоначальную отработку режимов ЭЛС сплава ВТ5Л на пластинах различной толщины размером 100×250 мм осуществляли на установке УЛ-209М конструкции Института электросварки им. Е.О. Патона с компьютерным управлением всеми параметрами и системами. Эта установка укомплектована энергетическим комплексом на базе ЭЛА-60/60 и электронно-лучевой пушкой, перемещаемой внутри вакуумной камеры по линейным координатам X , Y , Z , а также поворачиваемой вокруг оси Y – Y по координате VG на угол 0...90°. При ускоряющем напряжении $U_{\text{уск}} = 60$ кВ электронно-лучевая пушка с металлическим вольфрамовым катодом диаметром 3 мм обеспечивает диапазон тока электронного пучка $I_{\text{п}} = 0...500$ мА и выполнение технологических разверток пучка в процессе ЭЛС (круг, эллипс, штрих, треугольник) с амплитудой 0...5 мм. Точность позиционирования электронно-лучевой пушки по координатам составила не менее 0,1 мм.

Фокусировка электронного пучка на поверхности свариваемых пластин, совмещение электронного пучка со стыком, визуализация процесса ЭЛС при выполнении чистки околошовной зоны маломощным остросфокусированным электронным пучком и коротких прихваток осуществлялись автоматически по программе с помощью системы «РАСТР» во вторично-эмиссионном изображении [5], которая обеспечивала точность совмещения не менее 0,1 мм и увеличение объекта наблюдения в 5 раз. Контроль фокусировки по четкости изображения на мониторе системы «РАСТР» проверяли визуально по яркости свечения круговой развертки электронного пучка диаметром $d_{\text{круг}} \approx 5$ мм с током пучка $I_{\text{п}} \approx 10$ мА на медной пластине. Расхождение сравниваемых значений тока фокусировки при рабочем расстоянии от среза пушки до пластины $l_{\text{раб}} = 250$ мм составило ± 1 мА на уровне $I_{\text{ф}} = 620$ мА, что вполне приемлемо для практического применения.

Разработанное компьютерное управление установкой УЛ-209М позволяет реализовать программное управление ЭЛС путем последовательного выполнения следующих процессов [5]:

- построение трехмерного виртуального представления обстановки внутри вакуумной камеры;
- выбор с помощью созданного виртуального представления начальной траектории стыка;
- обучение системы перемещений для следования вдоль траектории стыка.

В программах для ЭЛС, представленных в виде таблиц, задаются значения координат точек каждого отрезка пути, куда необходимо переместиться, значения токов сварки и фокусировки, амплитуды технологических разверток, а также скорость перемещения на данном отрезке.

Для установки, фиксации и вращения наружной части переднего корпуса КСД относительно электронно-лучевой пушки в составе установки УЛ-209М предусмотрены вращатели с вертикальной и горизонтальной осями вращения. Диаметр планшайбы на обоих вращателях составляет 1200 мм.

Выбор взаимного расположения электронного пучка и стыка при сварке сплава ВТ5Л толщиной в диапазоне $\delta_{\text{м}} = 5...26$ мм со сквозным проплавлением за один проход и бездефектное формирование лицевого и корневого валиков шва является отправной точкой исследований. Принцип бездефектности ответственных конструкций из титановых сплавов в авиационной и космической промышленности подразумевает получение качественных сварных соединений, формируемых при ЭЛС, без пор и подрезов по обеим сторонам шва. Упомянутые дефекты недопустимы, поскольку приводят к снижению работоспособности сварных соединений. Устранение подрезов на установке УЛ-209М может быть достигнуто повторным косметическим проходом, а также выбором схемы ЭЛС горизонтальным электронным пучком с перемещением электронной пушки вниз по координате Z – Z [6]. Горизонтальное расположение сварочной ванны облегчает дегазацию жидкого металла и его рафинирование, что, в свою очередь, снижает пористость металла шва и требования к чистоте свариваемого металла.

Выбор оптимального значения скорости сварки определяется, с одной стороны, условием минимальной интенсивности гидродинамических возмущений в сварочной ванне [7], с другой, условием минимальной ширины шва для снижения деформаций, повышения трещиностойкости, сохранения легкоиспаряющихся легирующих элементов в металле шва. Если первое условие требует уменьшения скорости сварки, то второе – ее повышения. Уточнение величины скорости сварки для конкретных сплавов и толщин с целью получения формирования качественного сварного соединения играет первостепенную роль при разработке технологии сварки. Применительно к установке УЛ-209М с учетом переменной толщины свариваемых кромок из титанового сплава ВТ5Л в диапазоне $\delta_{\text{м}} = 5...26$ мм, а также обеспечения тока электронного пучка $I_{\text{п}} = 0...500$ мА, скорость сварки была выбрана неизменной по всей длине стыка и составила $v_{\text{св}} = 12$ мм/с.

Воспроизводимость качественных швов может быть обеспечена множеством аппаратных разработок, гарантирующих стабилизацию и повторяемость геометрии электронного пучка [8–10]. Узкие и глубокие швы с параллельными стенками литой зоны получают благодаря использованию электронного пучка с малыми ($\leq 5 \times 10^{-2}$ рад) углами сходимости [10, 11], развертке его по круговой или эллиптической траектории [8, 9, 12]. Нами была применена круговая развертка, которая обеспечивала воспроизводимость формирования сварных швов при наклонном стыке между стойками относительно направления перемещения электронно-лучевой пушки сверху вниз по координате Z-Z.

Основной дефект металла шва при ЭЛС титана и его сплавов — пористость. Для предупреждения пор необходимо обеспечить удаление с поверхности свариваемых кромок адсорбированной влаги и жировых пленок, а также создать условия для максимальной дегазации сварочной ванны. В едином технологическом цикле ЭЛС на установке УЛ-209М может быть произведена чистка прилегающей зоны стыка от остатков загрязнений и окислов с помощью сфокусированного на поверхности металла электронного пучка. В режиме $U_{\text{уск}} = 60$ кВ, $I_{\text{п}} \approx 10$ МА, $v_{\text{св}} = 10$ мм/с, $d_{\text{круг}} \approx 10$ мм выполняется проход по всей длине стыка [5].

При ЭЛС титана и его сплавов для получения качественных швов требуется точная сборка изделия под сварку и строгое соблюдение допустимых размеров зазора между свариваемыми кромками деталей. Как показано в работе [13], при толщине свариваемых стыков $\delta_{\text{м}} = 5$ мм допустимая величина зазора не должна превышать 0,07 мм, а при $\delta_{\text{м}} = 26$ мм — 0,17 мм.

Перед созданием программ ЭЛС внутренних и наружных стыков на стойках из литейного титанового сплава ВТ5Л были выполнены замеры толщины свариваемых кромок по длине стыка сложного контура. Установили, что имеют место несколько характерных толщин разной длины: для геометрии торцевой поверхности наружного стыка — 5, 14, 17 мм; для геометрии торцевой поверхности внутреннего стыка — 5, 17, 19, 26 мм. При отработке режимов ЭЛС наружных стыков стоек горизонтальным электронным пучком по схеме сверху вниз, скорости сварки $v_{\text{св}} = 12$ мм/с, рабочем расстоянии $l_{\text{раб}} = 250$ мм, без локальной развертки пучка ($d_{\text{круг}}^{\text{раб}} = 0$ мм) и с круговой разверткой пучка ($d_{\text{круг}} = 1,2$ мм) были выполнены сквозные проплавления на плоских образцах с формированием лицевого и корневого валиков шва за один проход. Для бездефектного формирования корневого валика шва значение тока электронного пучка устанавливали в диапазоне $I_{\text{п}} = (1,75 \dots 2,0) I_0$, где I_0 — ток пучка, при котором

появляются первые признаки сквозного проплавления [14].

Проведенный металлографический анализ сварных соединений сплава ВТ5Л со сквозным проплавлением плоских образцов позволил выявить некоторые особенности. Как показано на рис. 2, формирование лицевого и корневого валиков шва на всех имеющихся толщинах происходит регулярно по всей длине без подрезов; при необходимости лицевой валик шва заглаживается повторным косметическим проходом. Начиная с толщины свариваемых кромок $\delta_{\text{м}} = 14$ мм сварной шов формируется практически с параллельными стенками литой зоны в случае применения круговой развертки электронного пучка амплитудой $d_{\text{круг}} = 1,2$ мм, а ширина шва в корневой части колеблется в диапазоне 2,4...2,6 мм. Такие результаты по геометрии проплавления позволяют заключить, что уход сварочного электронного пучка от стыка на величину 0,1 мм не скажется на качестве сварного шва.

Полученные данные по сварке плоских образцов горизонтальным электронным пучком были применены при разработке программы сварки наружных стыков на стойках-образцах из литейного титанового сплава ВТ5Л, конфигурация стыка которых в месте сварки соответствует серийным деталям. В программе при постоянной скорости сварки $v_{\text{св}} = 12$ мм/с величины тока сварки $I_{\text{п}}$ и тока фокусировки $I_{\text{ф}}$ в переходных местах изменения рабочего расстояния и толщины свариваемых

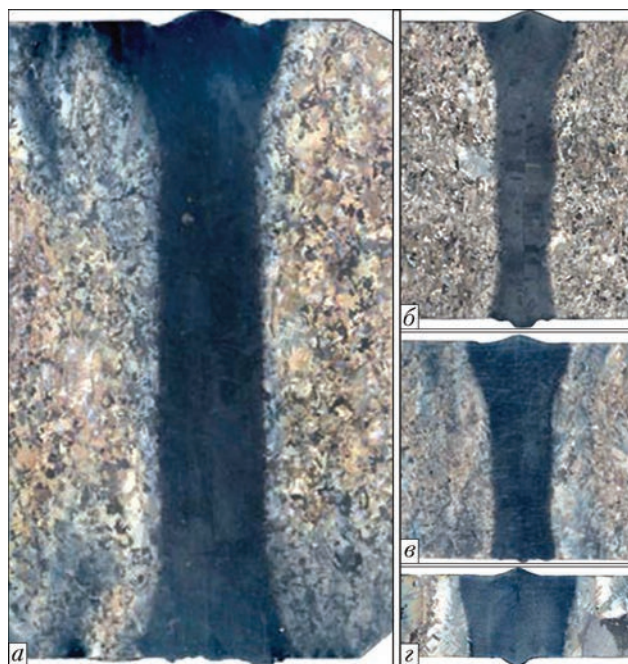


Рис. 2. Макроструктура сварных соединений литейного титанового сплава ВТ5Л различной толщины и формирование лицевого и корневого валиков шва при ЭЛС со сквозным проплавлением наружных стыков стоек горизонтальным электронным пучком: а — $\delta_{\text{м}} = 26$ мм; б — $\delta_{\text{м}} = 17$ мм; в — $\delta_{\text{м}} = 14$ мм; г — $\delta_{\text{м}} = 5$ мм



Рис. 3. Внешний вид лицевого и корневого валиков шва на стойках-образцах при ЭЛС наружных и внутренних стыков: $U_{\text{вск}} = 60 \text{ кВ}$, $v_{\text{св}} = 12 \text{ мм/с}$, $l_{\text{раб}} = 250 \text{ мм}$



Рис. 4. Внешний вид наружной части переднего корпуса КСД, установленного на вращатель с вертикальной осью вращения для ЭЛС наружных стыков стоек

ных кромок изменяли по линейному закону [15]. Как показано на рис. 3, сварной шов формируется без дефектов по всей длине стыка, а корневой валик шва может быть использован для контроля качества сварки. Система компьютерного управления процессом ЭЛС на установке УЛ-209М позволяет выполнять в едином технологическом цикле также точечные, короткие и сплошные прихватки. Точечные прихватки на стыке выводной планки и стойки производятся с целью исключения образования кратеров.

Следует отметить, что все сварные образцы и макеты изделий из сплава ВТ5Л со сквозным проплавлением горизонтальным электронным пучком прошли рентгеновский контроль. Дефектов в виде пустот, пор, подрезов и несплавлений не обнаружено.

После установки выводных планок из титанового сплава ВТ5Л на внутренних и наружных стыках стоек с помощью аргонодуговой сварки (АДС) разместили наружную часть переднего корпуса КСД на планшайбе вращателя соосно с вертикальной осью вращения (см. рис. 4), выставили электронно-лучевую пушку в горизонтальное положение ($VG = 0^\circ$) на расстоянии от изделия $l_{\text{раб}} = 250$ мм, перемести-

	X	Y	Z	W	hw	lf	F	Pl	R	Arc	Clk	VG	A	B
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	608.00	n/a	n/a				0.00	n/a	n/a
2	0.00	8.00	13.60	0.00	0.00	608.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
3	0.00	17.16	31.76	0.00	200.00	608.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
4	0.00	23.16	42.96	0.00	200.00	608.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
5	0.00	28.00	52.16	0.00	200.00	608.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
6	0.00	31.08	58.20	0.00	200.00	608.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
7	0.00	34.84	65.08	0.00	65.00	624.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
8	0.00	43.92	82.28	0.00	65.00	624.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
9	0.00	54.52	101.88	0.00	65.00	624.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
10	0.00	64.36	120.28	0.00	65.00	624.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
11	0.00	70.00	131.08	0.00	65.00	624.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
12	0.00	76.48	143.08	0.00	65.00	623.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
13	0.00	82.92	155.48	0.00	65.00	623.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
14	0.00	91.80	172.28	0.00	65.00	623.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
15	0.00	99.84	187.48	0.00	65.00	622.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
16	0.00	102.04	191.24	0.00	65.00	622.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
17	0.00	103.76	194.92	0.00	240.00	598.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
18	0.00	110.88	208.12	0.00	240.00	598.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
19	0.00	118.92	223.40	0.00	240.00	598.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
20	0.00	124.52	237.40	0.00	240.00	598.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
21	0.00	129.32	246.20	0.00	0.00	598.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0
22	0.00	134.92	256.20	0.00	0.00	597.00	12.00	n/a				0.00	0.0	0.0

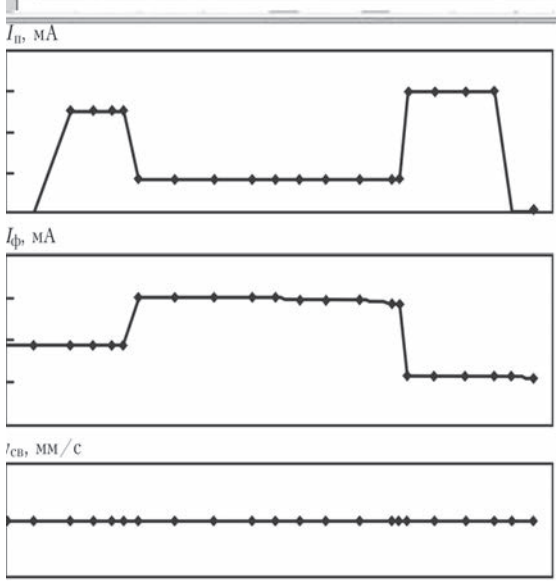


Рис. 5. Программа ЭЛС наружных стыков стоек с компьютерным управлением перемещениями по координатам Y и Z , а также токами сварки $I_{\text{п}}$ и фокусировки $I_{\text{ф}}$, скоростью сварки $v_{\text{св}}$

ли ось пушки на один из 34-х стыков, обнулили значение координаты вращателя W и подготовили установку УЛ-209М к выполнению ЭЛС наружных стыков стоек по программе.

Получив рабочий вакуум в сварочной камере и электронно-лучевой пушке, составили с помощью видеоконтрольной системы «РАСТР» новую программу ЭЛС на первом стыке стойки при перемещении пушки сверху вниз по координате Z - Z или откорректировали программу ЭЛС на стойках-образцах. Осуществили проверочный проход электронно-лучевой пушки по программе и, в случае попадания электронного пучка по стыку на всей длине, выполнили режим СВАРКА (см. рис. 5). Циклограмма изменений токов сварки и фокусировки с привязкой к характерным точкам приведена на рис. 6. После поворота переднего корпуса КСД на 180° по координате вращателя W выполнили ЭЛС стыка стойки с противоположной сто-

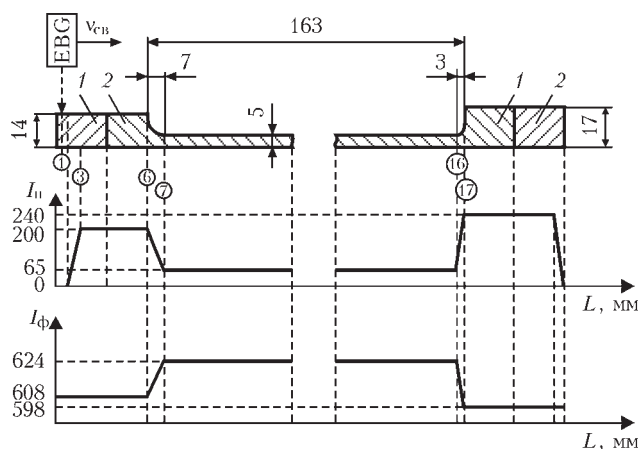


Рис. 6. Циклограмма изменений токов сварки I_n и фокусировки I_f при ЭЛС наружных стыков стоек: 1 — выводные планки; 2 — стойка; EBG — электронно-лучевая пушка; (1), (3), (6), (7), (16), (17) — номера строк в таблице программы ЭЛС



Рис. 7. Внешний вид наружной части переднего корпуса КСД, установленного на вращателе с горизонтальной осью вращения для ЭЛС внутренних стыков стоек. Электронно-лучевая пушка установлена под углом $\angle G = 35^\circ$

роны. Приведенная последовательность операций ЭЛС выполняется до последнего стыка на стойках.

После сварки наружных стыков стоек горизонтальным электронным пучком на вращателе с вертикальной осью вращения приступили к подготовке технологического процесса ЭЛС внутренних стыков. Рабочим вариантом оказался переход на вращатель с горизонтальной осью вращения, наклоном электронно-лучевой пушки от вертикали на угол $\angle G = 35^\circ$ и перемещением пушки по координате $X-X$ вдоль продольной оси вакуумной камеры (рис. 7). Рабочее расстояние от среза пушки до изделия составило $l_{\text{раб}} = 330$ мм. Необходимо отметить, что последовательность операций

ЭЛС внутренних стыков по сравнению со сваркой наружных стыков не изменилась, а величину тока электронного пучка I_n изменять не пришлось.

Таким образом, предложенная технология изготовления цельносварного корпуса КСД и выбранные схемы сварки наружных и внутренних стыков стоек обеспечивают бездефектное формирование лицевого и корневого валиков шва при сквозном проплавлении литейного титанового сплава ВТ5Л толщиной $\delta_m = 5 \dots 26$ мм за один проход.

1. *Электронно-лучевая сварка многосекционного рабочего колеса ГТД из титанового сплава* / В.Н. Павленко, Ю.Т. Руднев, В.В. Баринев и др. // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. по электронно-лучевой сварке в машиностроении. — Николаев, 1989. — С. 13–14.
2. *Гейкин В.А., Поклад В.А.* Сварные соединения в авиационных двигателях // Технология металлов. — 2001. — № 1. — С. 9–14.
3. *Остаточные напряжения в сварных элементах роторных конструкций газотурбинных двигателей, выполненных ЭЛС* / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, Б.А. Задерий и др. // Мат. конф. по электронно-лучевой сварке. — Сборн. 2. — М.: ЦРДЗ, 1993. — С. 57–61.
4. *Imamura T.* Current states and trend of applicable material technology for aero space structure // J. of Japan Institute of light metals. — 1999. — 1, № 7. — P. 302–309.
5. *Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия* / Б.Е. Патон, О.К. Назаренко, В.М. Нестеренков и др. // Автомат. сварка. — 2004. — № 5. — С. 3–7.
6. *Кравчук Л.А.* Устранение подрезов при ЭЛС со сквозным и несквозным проплавлением // Там же. — 2010. — № 6. — С. 26–29.
7. *Нестеренков В.М.* Особенности капиллярных волн в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке металлов большой толщины // Там же. — 2003. — № 4. — С. 8–13.
8. *Электронно-лучевая сварка* / О.К. Назаренко, А.А. Кайдалов, С.Н. Ковбасенко и др. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
9. *Blakely P.Y., Sanderson A.* The origin and effect of magnetic fields in electron beam welding // Welding J. — 1984. — № 1. — P. 42–49.
10. *Фритс Д.* Электронно-лучевая сварка сегодня // Меж. конф. по электронно-лучевым технологиям «ЭЛТ-88». — Варна, 31 мая–4 июня, 1988 г. — С. 1048–1063.
11. *Sayegh G.* State of the art of high energy density beam welding: Houdremont lecture. — Tokyo: IIW, 1986. — 41 p.
12. *Effects of welding parameters and prevention of defects in deep penetration EBW of heavy section steel* / T.Shida, H.Kita, H.Okamura, Y.Kawada. — IIW-IV-239–78.
13. *Stocker G.* Erfahrungen beim Elektronenstrahl-schweißen dickwandiger Bauteile aus der Titanlegierung Ti6Al4V gegliht // Schweis. und Schneid. — 1974. — № 3. — S. 91–93.
14. *Нудельман Я.Б., Задерий Б.А.* Формирование швов при электронно-лучевой сварке сплавов титана толщиной до 25 мм // Автомат. сварка. — 1988. — № 5. — С. 29–30.
15. *Anderl P., Scheffels W.* Process control for electron beam welding // Weld. world. — 1992. — № 5-6. — P. 138–144.

Поступила в редакцию 13.07.2015



РАЗРАБОТКА НОВЫХ ЭМИССИОННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ПУШЕК ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ КОСМОСА¹

Ю.В. ЗУБЧЕНКО, Е.Г. ТЕРНОВОЙ

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В отличие от ранее применявшихся в космических пушках диодных эмиссионных систем с прямонакальным катодом при разработке новой системы была принята за основу триодная эмиссионная система с подогревом катода электронной бомбардировкой. Новая эмиссионная система рассчитана с применением методики, основанной на одновременном решении задач анализа и синтеза с использованием аппарата траекторного анализа электронных пучков. Предлагаемая эмиссионная система рассчитана для двух вариантов – для ручного и автоматизированного типов электронно-лучевых инструментов. В каждом из рассчитанных вариантов формируется электронный пучок с фазовой характеристикой, близкой к линейной, что обеспечивает высокую удельную мощность пучка в месте сварки (до 9 кВт/мм²) при общей мощности пучка до 2,5 кВт и, как результат, позволяет выполнять сварку и резку алюминиевых и титановых сплавов, а также нержавеющей сталей толщиной до 5 мм в непрерывном и импульсном режимах в условиях открытого космоса. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 7.

Ключевые слова: эмиссионная система, электронный пучок, триодная система, кроссовер, фокальная плоскость, траекторный анализ, первеанс, рабочее расстояние, ручной и автоматизированный инструмент, сварка, резка, пайка, нагрев, алюминиевые и титановые сплавы, нержавеющие стали

В настоящее время в Институте электросварки им. Е.О. Патона проводятся работы по созданию нового поколения электронно-лучевого инструмента для выполнения монтажных и ремонтно-восстановительных работ в открытом космосе [1]. Создаваемый инструмент предусматривает два варианта исполнения — ручной и автоматизированный в составе робота или прецизионного манипулятора.

Задачей настоящей работы является разработка эмиссионных систем электронно-лучевой пушки для двух вариантов создаваемого инструмента, обеспечивающих повышение общей (до 2, 5 кВт) и удельной (до 9 кВт/мм²) мощности пучка в непрерывном и импульсном режимах работы, а также увеличения эксплуатационной надежности аппаратуры.

В отличие от ранее применявшихся электронно-лучевых пушек с диодными эмиссионными системами и прямонакальными катодами [2–5] для работы в условиях космоса, такая постановка задачи диктует необходимость использования триодной эмиссионной системы, в которой катод подогревается электронной бомбардировкой и работает в режиме ограничения тока эмиссии пространственным зарядом электронного пучка, а мощность пучка изменяется подачей отрицатель-

ного относительно катода регулируемого потенциала на модулирующий (фокусирующий) электрод при неизменном ускоряющем напряжении и постоянной температуре катода.

Рассмотрим основные общие и отличительные особенности формирования пучков в пушках для ручного и автоматизированного вариантов.

Максимально достижимая плотность тока в кроссовере (минимальном сечении пучка, формируемого только эмиссионной системой, т.е. электростатической частью электронно-оптической системы пушки), обусловленная только тепловыми скоростями электронов, оценивается по зависимости Ленгмюра, которая для параксиальных пучков приводится к виду [6]:

$$j_{\text{крос.}} = j_{\text{к}} \frac{eU_{\text{уск.}}}{kT_{\text{к}}} \gamma_1^2, \quad (1)$$

где $T_{\text{к}}$ — абсолютная температура катода, К; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ — заряд электрона, Кл; k — постоянная Больцмана; $j_{\text{к}}$ — плотность тока эмиссии, А/мм²; γ_1 — угол сходимости пучка в кроссовере, рад; $U_{\text{уск.}}$ — ускоряющее напряжение, В.

Проанализируем пути возможного увеличения плотности тока в кроссовере применительно к условиям работы пушек в космосе.

¹Впервые работы по синтезированию эмиссионных систем мощных электронно-лучевых сварочных пушек проводились в отд. 57 ИЭС под руководством чл.-корр. НАНУ О.К. Назаренко сотрудниками отдела канд. техн. наук К.С. Акопьянцем, Ю.В. Зубченко, В.Е. Локшиным.

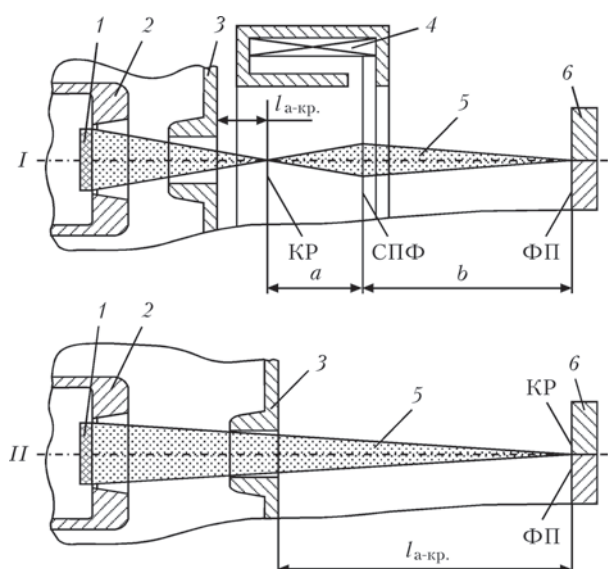


Рис.1. Схемы эмиссионных систем пушек для электронно-лучевой сварки в космосе: I — для автоматизированного варианта; II — для ручного варианта. 1 — катод; 2 — фокусирующий электрод; 3 — анод; 4 — электромагнитная фокусирующая линза; 5 — электронный пучок; 6 — свариваемое изделие; КР — кроссовер; СПФ — средняя плоскость фокусирующей линзы; ФП — фокальная плоскость; $l_{а-кр}$ — расстояние анод-кроссовер; a — расстояние вдоль оси системы КР-СПФ; b — расстояние вдоль оси системы СПФ-ФП

Понижение рабочей температуры катода T_k и увеличение плотности тока эмиссии с катода j_k практически невозможно, т. к. в связи с тяжелыми условиями работы катодов в сварочных пушках выбор материалов катодов для них весьма ограничен (тантал, вольфрам, гексаборид лантана).

Повышение ускоряющего напряжения $U_{уск}$ выше 10 кВ также недопустимо в связи с опасностью рентгеновского облучения оператора. Увеличение угла сходимости γ_1 для повышения плотности тока в кроссовере эффективно, но практически применимо только в пушках для автоматизированного варианта, где окончательная фокусировка пучка на свариваемом изделии осуществляется дополнительной электромагнитной линзой, переносящей изображение кроссовера в фокальную плоскость (рис. 1, I). В пушках для ручного варианта целесообразно обеспечивать условия, при которых окончательная фокусировка пучка на изделии производится только эмиссионной системой, т. е. кроссовер пучка располагают в фокальной плоскости (рис. 1, II). В этом случае увеличение угла сходимости γ_1 связано с уменьшением рабочего расстояния пушки (от анода до изделия), что ограничивает зону прямой видимости сварочной ванны, а также способствует повышению вероятности пробоев при сварке или пайке материалов с высокой упругостью пара и снижению электрической прочности изолирующих промежутков пушки.

Таким образом, ни одно из условий прямого повышения плотности тока в кроссовере, приве-

денное в выражении (1), не может быть использовано для ручного варианта пушки. В автоматизированном варианте, наоборот, целесообразно и эффективно увеличение угла сходимости пучка в кроссовере, т. к. в этом случае эмиссионная система должна формировать короткофокусный электронный пучок, сходящийся в кроссовере перед электромагнитной линзой.

Необходимо отметить, что выражение (1) справедливо только для идеализированных условий формирования пучка в эмиссионной системе (отсутствие aberrаций, отсутствие влияния пространственного заряда пучка, равномерность напряженности поля у катода, постоянство плотности тока эмиссии по поверхности катода и др.). Только при этих условиях, вследствие того, что тепловые скорости электронов распределены по закону Максвелла, распределение плотности тока в кроссовере подчиняется нормальному закону Гаусса, и радиус кроссовера принимает минимально возможную величину. Поэтому для повышения плотности тока в кроссовере эффективными являются меры по дальнейшему совершенствованию конструкции и параметров эмиссионных систем в направлении обеспечения близких к идеальным условий формирования электронных пучков.

Анализ условий формирования пучков в эмиссионных системах проводился с использованием аппарата траекторного анализа из пакета прикладных программ ЭРА, предназначенных для автоматизации электронно-оптических расчетов [7]. Согласно этому аппарату пучок представляется в виде конечного числа тонких коаксиальных трубок тока, которые изображаются на продольном сечении пучка соответствующим числом траекторий. Учет сферических aberrаций анализируемой эмиссионной системы удобно производить путем построения фазовой характеристики формируемого в этой системе пучка по результатам траекторного анализа. Фазовая характеристика пучка представляет собой построенную для какого-либо поперечного сечения пучка зависимость угла наклона траекторий r'_i от их радиальной координаты r_i . Плоскость переменных $r' \dots r$ называется фазовой плоскостью [8]. Если не учитываются тепловые скорости электронов и эмиссионная система не обладает сферической aberrацией, фазовая характеристика пучка в такой системе линейна, наклон траекторий r'_i пропорционален радиусам их расположения r_i , т. е.

$$r'_1/r_1 = r'_2/r_2 = \dots = r'_n/r_n = \text{const} = c,$$

где c — наклон фазовой характеристики.

Только в этом идеальном случае все траектории сходящегося после катода пучка пересекутся в кроссовере в одной точке, при этом радиус кроссовера $r^* = 0$, а фазовая характеристика выража-

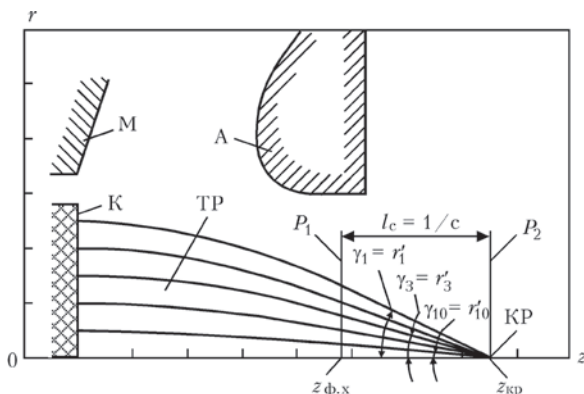


Рис. 2. Картина электронных траекторий идеально сформированного пучка: К — катод; М — модулирующий (фокусирующий) электрод; А — анод; ТР — траектории электронов; r — радиальная координата; z — продольная координата эмиссионной системы (ось системы); КР — кроссовер пучка; $z_{кр}$ — координата z плоскости P_2 (положения кроссовера); $z_{ф.х.}$ — координата плоскости P_1 , в которой строится фазовая характеристика пучка; $\gamma_1... \gamma_{10}$ — углы наклона траекторий к оси z (для паракиального пучка $\gamma \approx \text{tg} \gamma \approx r'$); c — наклон фазовой характеристики пучка в плоскости P_1

ется линейной зависимостью $r' = cr$, где величина $1/c = l_c$ — расстояние от плоскости $z_{ф.х.}$, в которой определяется фазовая характеристика, до плоскости расположения кроссовера $z_{кр}$. (рис. 2). В общем случае с учетом знака величины «с» получаем зависимость:

$$z_{кр.} = z_{ф.х.} - 1/c,$$

где $c < 0$ и $l_c = 1/c < 0$ при $z_{ф.х.} < z_{кр.}$; $c > 0$ и $l_c = 1/c > 0$ при $z_{ф.х.} > z_{кр.}$.

В общем случае из-за сферических аберраций эмиссионных систем реальные электронные пучки в той или иной степени неламинарны, а их фазовые характеристики, соответственно, нелинейны. Нелинейная фазовая характеристика в каком-либо сечении пучка может быть представлена в виде:

$$r' = cr + \varepsilon(r),$$

где c — средний наклон фазовой характеристики; $\varepsilon(r)$ — отклонение фазовой характеристики от линейной (рис. 3).

Анализ фазовых характеристик пучков можно существенно упростить при помощи метода фазового параллелограмма [9], который строится на фазовой плоскости $r'...r$ таким образом, чтобы включить рассматриваемую фазовую характеристику в его минимальную площадь (рис. 3).

Согласно теории Лиувилля [8] фазовый параллелограмм, построенный для любого сечения $z_{ф.х.}$ в заанодном пространстве, отсекает на оси r отрезок, равный диаметру кроссовера $2r^*$. Конечные размеры кроссовера, равные $2r^*$, обусловлены нелинейностью фазовой характеристики, т.е. конечной величиной $\varepsilon_{\max}$ отклонения фазовой характеристики

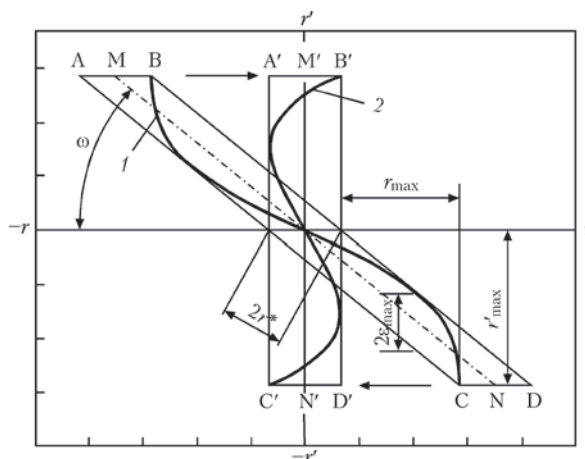


Рис. 3. Построение фазового параллелограмма: 1 — фазовая характеристика для сечения пучка в области перед кроссовером; 2 — то же в кроссовере; стрелками отмечены направления деформации параллелограмма при перемещении исследуемого сечения пучка к кроссоверу; A, B, C, D, M, N, A'—D', M', N' — точки построения параллелограммов; ω — угол наклона средней линии фазового параллелограмма к оси r ; $2\varepsilon_{\max}$ — максимальное отклонение фазовой характеристики от линейной; $2r^*$ — диаметр пучка в кроссовере; $r_{\max}$ — радиус крайней траектории; $r'_{\max}$ — угол наклона крайней траектории

от линейной. Из построения параллелограмма получаем соотношения:

$$r^* = \varepsilon_{\max}/c; \quad c = r'_{\max}/(r_{\max} + r^*).$$

При использовании только метода анализа (метода проб и ошибок) и аппарата траекторного анализа построение новой эмиссионной системы превращается в весьма трудоемкий и длительный процесс. В связи с этим при построении этих систем нами была использована методика, основанная на одновременном решении задач анализа и синтеза [10]. Конечной целью расчета является достижение фазовой характеристики пучка, близкой к линейной, формирование электронного пучка с заданными значениями его угла сходимости и первеанса при заданных конструктивно-техноло-

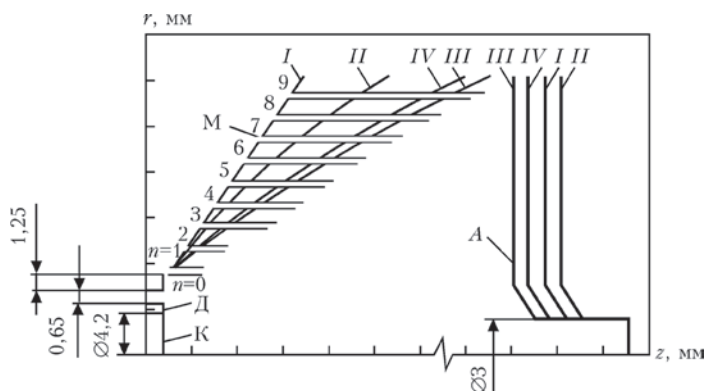


Рис. 4. Построение эмиссионной системы электронно-лучевой сварочной пушки методами траекторного анализа и синтеза: К — катод; Д — держатель катода; М — модулирующий (фокусирующий) электрод; А — анод; I—IV — последовательные шаги приближения к искомой форме электродов; $n = 0, 1, 2, \dots, 9$ — участки, на которые разбивается контур фокусирующего электрода

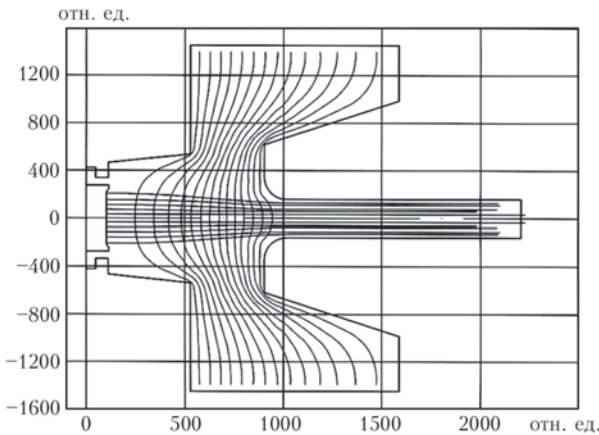


Рис. 5. Траекторный анализ оптимизированной эмиссионной системы (пушка для ручной сварки): $U_m = -100$ В, $I_n = 250$ мА
гических ограничениях на геометрию электродов. В методике используется предпосылка, что фокусирующий электрод при расчете можно заменить составным, на каждый участок которого подаются такие потенциалы, что их совместное действие приводит к формированию электронного пучка с заданными свойствами.

Искомая эмиссионная система строится поэтапно путем последовательных приближений в соответствии с приведенным в методике алгоритмом. Признаком завершения сходящегося процесса построения искомой эмиссионной системы является близкое расположение получающихся контуров фокусирующего электрода и анода после четырех-пяти этапов расчета. Так, например, при расчете эмиссионной системы пушки для ручного инструмента процесс сошелся на четвертом этапе (рис. 4). Полученный расчетный контур фокусирующего электрода аппроксимируем комплексом простых для изготовления поверхностей (конических, закруглений кромок и т. п.), удаляем от анода периферийную часть фокусирующего электрода для увеличения электрической прочности ускоряющего промежутка. В завершение производим траекторный анализ аппроксимированной эмиссионной системы (получаем ток

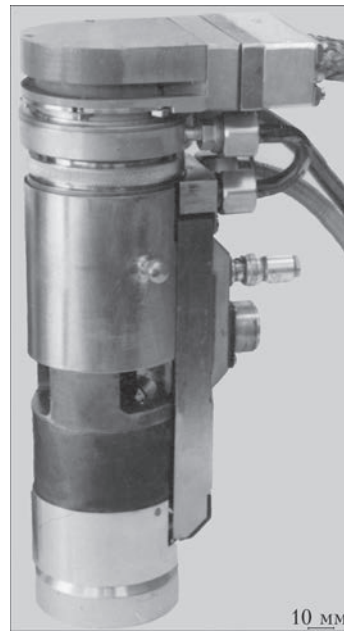


Рис. 7. Электронно-лучевая сварочная пушка, используемая для экспериментальной проверки оптимизированной эмиссионной системы

пучка $I_n = 250$ мА при запирающем напряжении $U_m = -100$ В (рис. 5). Строим фазовый параллелограмм для определения окончательных параметров этой системы (рис. 6).

Так, например, длина отрезка по оси r , отсекаемая наклонными сторонами параллелограмма, представляет собой диаметр пучка в кроссовере, $2r^* = 0,6$ мм. По наклону средней линии параллелограмма оцениваем положение кроссовера на оси системы относительно катода:

$$c = \frac{r'_{\max}}{r_{\max}} = \frac{-1,3 \cdot 10^{-2}}{1,1} = -1,18 \cdot 10^{-2} \left[\frac{1}{\text{мм}} \right];$$

$$l_c = \frac{1}{c} = -\frac{1}{1,18 \cdot 10^{-2}} = -85 \text{ [мм]}.$$

Учитывая, что фазовый параллелограмм строился для сечения с координатой $z_{\text{ф.х.}} = 19$ мм (расстояние от катода по оси z), получим координату $z_{\text{кр.}}$ (от

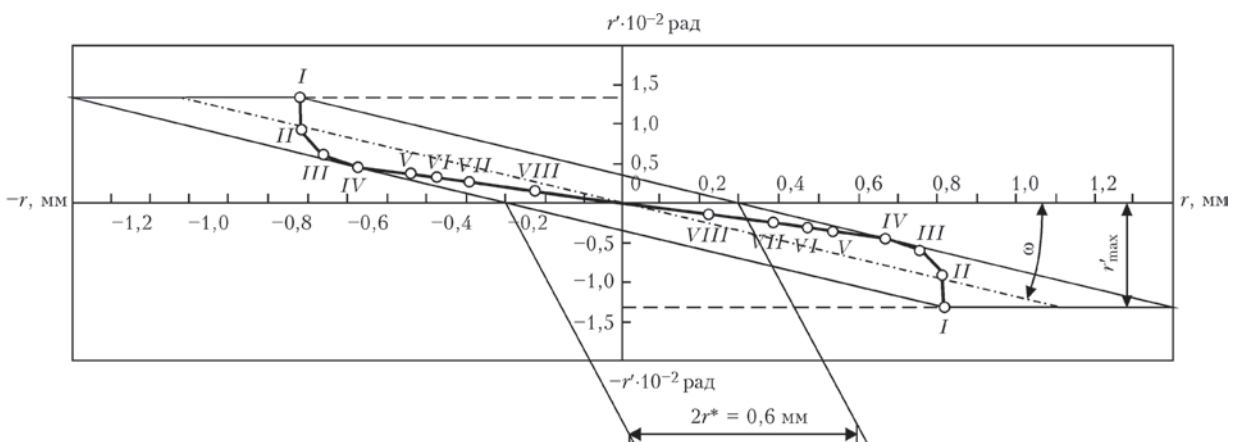


Рис. 6. Фазовый параллелограмм, построенный по результатам траекторного анализа оптимизированной эмиссионной системы для продольной координаты $z_{\text{ф.х.}} = 19$ мм (пушка для ручной сварки)



Параметры эмиссионных систем для ручной и автоматизированной пушек, полученных в результате расчета

Параметр	Эмиссионная система пушки для ручной сварки		Эмиссионная система пушки для автоматизированной сварки	
	Заданное значение	Полученное значение	Заданное значение	Полученное значение
Первеанс, $A/B^{3/2}$	$\geq 0,2 \cdot 10^{-6}$	$0,2 \cdot 10^{-6}$	$0,2 \cdot 10^{-6}$	$0,25 \cdot 10^{-6}$
Мощность пучка, кВт	$\geq 2,0$	2,5	$\geq 2,0$	2,5
Плотность мощности в кроссовере, кВт/мм ²	$\geq 6,0$	7,1	$\geq 7,5$	8,8
Половинный угол сходимости пучка в кроссовере, рад	$\leq 2 \cdot 10^{-2}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$	$\geq 10^{-1}$	$10,3 \cdot 10^{-2}$
Расстояние анод–кроссовер, мм	≥ 70	85	≤ 15	12,7

катода): $z_{кр.} = z_{ф.х.} - 1/c = 19 + 85 = 104$ мм. С учетом принятого при расчете положения входного отверстия в анод $z_a = 9$ мм и высоты анода ~ 10 мм, получаем рабочее расстояние пушки $l_{раб.} = 85$ мм (от выхода пучка из анода до места сварки). Половинный угол сходимости пучка, оцениваемый по крайней траектории, равен $\sim 1,3 \cdot 10^{-2}$ рад.

При разработке эмиссионных систем для ручного и автоматизированного вариантов пушек в качестве общих для обоих вариантов конструктивно-технологических параметров были заданы следующие (рис. 4):

- плоский катод диаметром 4,2 мм;
- кольцевая поверхность в держателе катода шириной 0,05...0,1 мм;
- кольцевой зазор между держателем катода и стенкой отверстия в фокусирующем электроде шириной 0,65 мм;
- наличие плоской кольцевой поверхности в центре фокусирующего электрода шириной 1,25 мм;
- плоский анод с притупленными кромками центрального отверстия диаметром 3 мм.

Задаваемые и полученные в результате расчета параметры эмиссионных систем для ручной и автоматизированной пушек представлены в таблице.

Полученные расчетные результаты экспериментально проверялись на вакуумной установке ОБ1469М при работе пушки ПЛ101М (рис. 7), в которую были установлены разработанные эмиссионные системы для ручной и автоматизированной сварки. При работе пушки было получено соответствие по току пучка (при запирающем напряжении $U_m = -100$ В) — не хуже 10 %, по углу сходимости пучка — не хуже 5...7 %, по положению фокальной плоскости пучка — не хуже 15 % (оценивалось по проплавлению тонких $\delta = 1,0$ мм наклонных пластин из нержавеющей стали). Глубина проплавления на образцах из титанового сплава ВТ1-0 и алюминиевого сплава 1201 при рабочем расстоянии 75 мм в ручном варианте сборки пушки (без фокусирующей линзы) достигала 5,0 мм при мощности в пучке 2,0 кВт и скорости сварки 25 м/ч. При использовании дополнительной электромагнитной фокусирующей линзы и эмиссионной системы для автоматизированной

сварки и прочих равных условиях глубина проплавления достигала 6,0 мм.

Таким образом, разработанные методами траекторного анализа и синтеза эмиссионные системы формируют электронные пучки, достаточные для осуществления электронно-лучевой сварки металлов толщиной до 4...5 мм и могут быть применены в новой конструкции электронной пушки для ручной и автоматизированной сварки в космосе.

Авторы выражают глубокую благодарность чл.-корр. НАНУ В.М. Нестеренкову, канд. техн. наук В.Е. Локишину, вед. инж. В.А. Матвейчуку за полезные критические замечания по изложению материала статьи.

1. Терновой Е.Г., Шулым В.Ф., Ланкин Ю.Н. Ремонт фрагментов корпуса международной космической станции с применением электронно-лучевой сварки // Сварка и родственные технологии — настоящее и будущее. Тез. стэнд. докл. — Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. — Киев, 2013. — 222 с.
2. Патон Б.Е., Кубасов В.Н. Эксперимент по сварке металлов в космосе // Автомат. сварка. — 1970. — № 5. — С. 7–12.
3. Особенности аппаратуры и процессов электронно-лучевой сварки и резки в условиях космоса / Б.Е. Патон, О.К. Назаренко, В.И. Чалов и др. // Там же. — 1971. — № 3. — С. 3–8.
4. Космос: технологии, материаловедение, конструкции: Сб. науч. тр. / Под ред. Б.Е. Патона. — Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2000. — 528 с.
5. Бондарев А.А., Терновой Е.Г. Особенности формирования швов и свойства соединений алюминиевых и магниевых сплавов в условиях, имитирующих космические // Автомат. сварка. — 2010. — № 11. — С. 22–27.
6. Langmuir D.B. Theoretical limitations of cathod-ray tubes // Proc. IRE. — 1973. — № 25. — P. 977–991.
7. Пакет программы ЭРА для автоматизации электронно-оптических расчетов / Н.И. Горбенко, В.П. Ильин, Г.С. Попова, В.М. Свешников // Численные методы решения задач электронной оптики. — Новосибирск, 1979. — С. 31–60.
8. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные и ионные пучки. — Л: Энергия, 1972. — 212 с.
9. Влияние нелинейности фазовой характеристики на фокусировку электронного пучка в сварочных пушках / С.И. Молоковский, К.С. Акопянц, Ю.В. Зубченко и др. // Автомат. сварка. — 1979. — № 9. — С. 14–17.
10. Акопянц К.С., Зубченко Ю.В. Методика расчета электронно-оптической системы сварочной пушки // Там же. — 1979. — № 11. — С. 33–36.

Поступила в редакцию 16.04.2015



УДК 621.791.75:614.8

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССА ДУГОВОЙ СВАРКИ С ПОСТОЯННОЙ И ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧЕЙ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ

О.Г. ЛЕВЧЕНКО, С.Ю. МАКСИМОВ, А.О. ЛУКЬЯНЕНКО, И.В. ЛЕНДЕЛ

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проблему улучшения санитарно-гигиенических характеристик в зоне сварки решают путем разработки и оборудования рабочего места сварщика местной вытяжной, комплектации сварочных головок и держателей для механизированной сварки соплами специальной конструкции, позволяющими осуществлять отсос сварочного аэрозоля, или применения защитной маски с системой принудительной подачи очищенного воздуха. Все это дополнительно усложняет и повышает стоимость сварочного оборудования, поэтому проводятся исследования, направленные на изучение влияния энергетических параметров (тока и напряжения) процесса сварки на объемы выделения сварочных аэрозолей и их вредных составляющих. Гигиенические характеристики процесса дуговой сварки в защитных газах при постоянной подаче электродной проволоки с использованием схем управления электрическими параметрами серийных источников сварочного тока, а также импульсным управлением электрическими параметрами сварочной дуги для обеспечения переноса электродного металла хорошо изучены и представлены в технической литературе. Возможности влияния процесса сварки с импульсной подачей электродной проволоки на гигиенические характеристики изучены недостаточно. Поэтому в данной работе приведены результаты сравнительной гигиенической оценки дуговой сварки с импульсной и постоянной подачей электродной проволоки различных марок. Показаны преимущества и возможности уменьшения выделений вредных веществ в воздух рабочей зоны за счет применения сварки с импульсной подачей проволоки и выбора соответствующих параметров режимов ее подачи. Библиогр. 14, рис. 3.

Ключевые слова: дуговая сварка, механизированное оборудование, электродная проволока, импульсная подача, гигиенические характеристики, уменьшение выделений аэрозолей

Одним из путей улучшения санитарно-гигиенических характеристик дуговой сварки является применение импульсных источников питания, позволяющих снижать избыточную энергию дуги, управлять переносом электродного металла, снижать его разбрызгивание, уменьшая таким образом выделение в воздух рабочей зоны вредных веществ в составе сварочного аэрозоля (СА) [1–3]. В последнее время для дуговой сварки в защитных газах все более широкое распространение получило сварочное оборудование нового вида — автоматы и полуавтоматы с импульсной подачей электродной проволоки [4]. Так, на основе компьютеризованного вентильного быстродействующего безредукторного электропривода с полностью управляемыми параметрами импульсного движения электродной проволоки (величины скоростей в импульсе и реверсе, времени действия импульсов и пауз, частоты импульсов, величины скважности) можно повышать качество сварных соединений, управлять геометрическими параметрами сварного шва, снижать энерго- и ресурсозатраты на процесс сварки и, предположительно, снижать выделение вредных веществ в воздух рабочей зоны. Последнее остается весьма актуальной задачей при решении проблемы защиты сварщика и окружающей среды от неизбежных

вредных выделений СА, особенно при применении легированных электродных проволок [5–7].

Целью настоящей работы является определение возможностей влияния способа дуговой сварки с управляемой импульсной подачей электродной проволоки на гигиенические характеристики процесса сварки и выбор режимов, обеспечивающих снижение выделений вредных веществ.

Для поиска путей снижения выделений вредных веществ, загрязняющих воздух производственной среды при механизированной сварке, проведены исследования влияния импульсной подачи электродной проволоки и режима сварки на показатели выделения СА, образующихся при выполнении процесса в смеси защитных газов (82 % Ar + 18 % CO₂) проволоками сплошного сечения марок Св-08Г2С, Св-01Х19Н18Г10АМ4 (ЭП-690) диаметром 1,2 мм и в CO₂ порошковой проволокой Велтек-Н320 диаметром 1,6 мм, содержащей хром, никель, марганец, фториды и другие компоненты. Исследовали зависимости интенсивности образования СА и их основных токсических компонентов от режима сварки с импульсной подачей электродной проволоки. Применяли сварку с импульсной подачей электродной проволоки и (для сравнения) с непрерывной подачей проволок сплошного сечения на режиме 160 А и 21...22 В и порошковой проволо-



ки на режиме 230 А и 26...27 В. В исследованиях частота импульсов f подачи электродной проволоки принимала значения 20, 40, 60 Гц и скважность импульсов s — 2, 3, 5 ед. Постоянная подача электродной проволоки задавалась частотой 1 Гц при скважности 1 ед [8]. Защитные газы выбирали по рекомендациям производителей электродной проволоки, а режимы сварки — из рекомендуемых диапазонов тока и напряжения в зависимости от типа электродной проволоки и ее диаметра [9].

Определение гигиенических показателей выделений СА выполнялось в соответствии со стандартом [10]. Исследования интенсивности выделения СА проводились методом «полного улавливания». Для определения химического состава СА пользовались методами санитарно-химического анализа [11].

Сварка проволокой Св-08Г2С в смеси Ar + CO₂. Результаты исследований (рис. 1, а) показали, что при сварке с постоянной подачей электродной проволоки Св-08Г2С наблюдается максимальная интенсивность образования СА. При применении всех других режимов сварки с импульсной подачей она уменьшается в 1,2...2 раза.

Исследование зависимостей интенсивности образования СА от частоты и скважности импульсов при сварке проволокой Св-08Г2С в смеси защитных газов Ar + CO₂ (рис. 1, а) определило, что они имеют сложный вид. Так, при сварке на частоте импульсов 20 Гц интенсивность образования СА уменьшается с ростом скважности импульсов, на частоте 40 Гц, наоборот, увеличивается, а на частоте 60 Гц данная зависимость неоднозначна.

Сложный вид полученных зависимостей можно объяснить следующим образом. Известно, что при сварке с постоянной подачей электродной проволоки в защитном газе уровень выделений СА определяется не только мощностью дуги, но и характером переноса электродного металла [12]. При этом зависимость интенсивности образова-

ния СА от сварочного тока носит экстремальный характер: сначала увеличивается, потом снижается, имеет максимум, соответствующий наибольшему разбрызгиванию электродного металла, и минимум, характерный для мелкокапельного переноса без коротких замыканий с погружением дуги в основной металл [13]. В свою очередь известно [14], что при импульсной подаче электродной проволоки в зависимости от шага подачи возможны три варианта переноса электродного металла:

- шаг подачи равен или несколько больше длины дуги, и капля окунается в ванну во время движения электрода;
- шаг подачи несколько меньше длины дуги, и капля электродного металла, не оторвавшись, входит в контакт со сварочной ванной уже после торможения под действием сил инерции;
- шаг подачи меньше длины дуги, и капля отрывается под действием сил инерции и пролетает дуговой промежуток без короткого замыкания.

Поэтому вид диаграммы (рис. 1, а) зависит от того, какой участок зависимости интенсивности образования СА от сварочного тока и имеющегося варианта переноса электродного металла в данный момент рассматривается.

Как известно, сварка модулированным импульсным током позволяет снизить интенсивность выделения СА (по сравнению со сваркой непрерывным током) без снижения производительности и коэффициента расплавления [1, 3]. Уменьшение общей мощности дуги за счет пауз при применении импульсного тока снижает избыток энергии, имеющий место при сварке непрерывным током и идущий на испарение расплавляемых материалов. Интенсивность образования СА снижается с уменьшением токов в импульсе, паузе, длительности импульса и с увеличением длительности паузы. Механизированная сварка импульсным током позволяет снизить интенсивность выделения СА

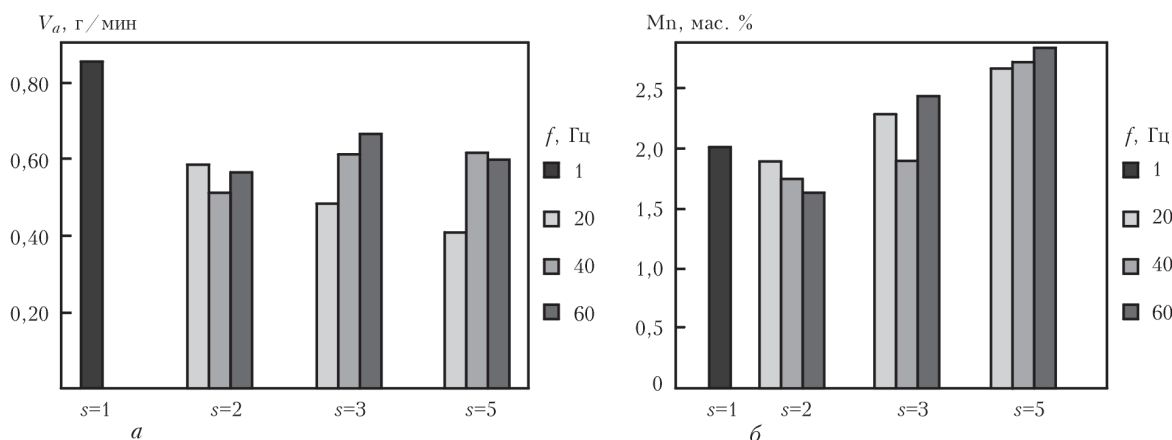


Рис. 1. Показатели выделений СА при сварке проволокой Св-08Г2С на среднем токе 160 А и напряжении 21...22 В с постоянной подачей электродной проволоки ($f=1$ Гц, $s=1$ ед.); с импульсной подачей проволоки ($f=20, 40, 60$ Гц, $s=2, 3, 5$): а — интенсивность образования СА (V_a); б — содержание марганца в составе СА (в мас. %)

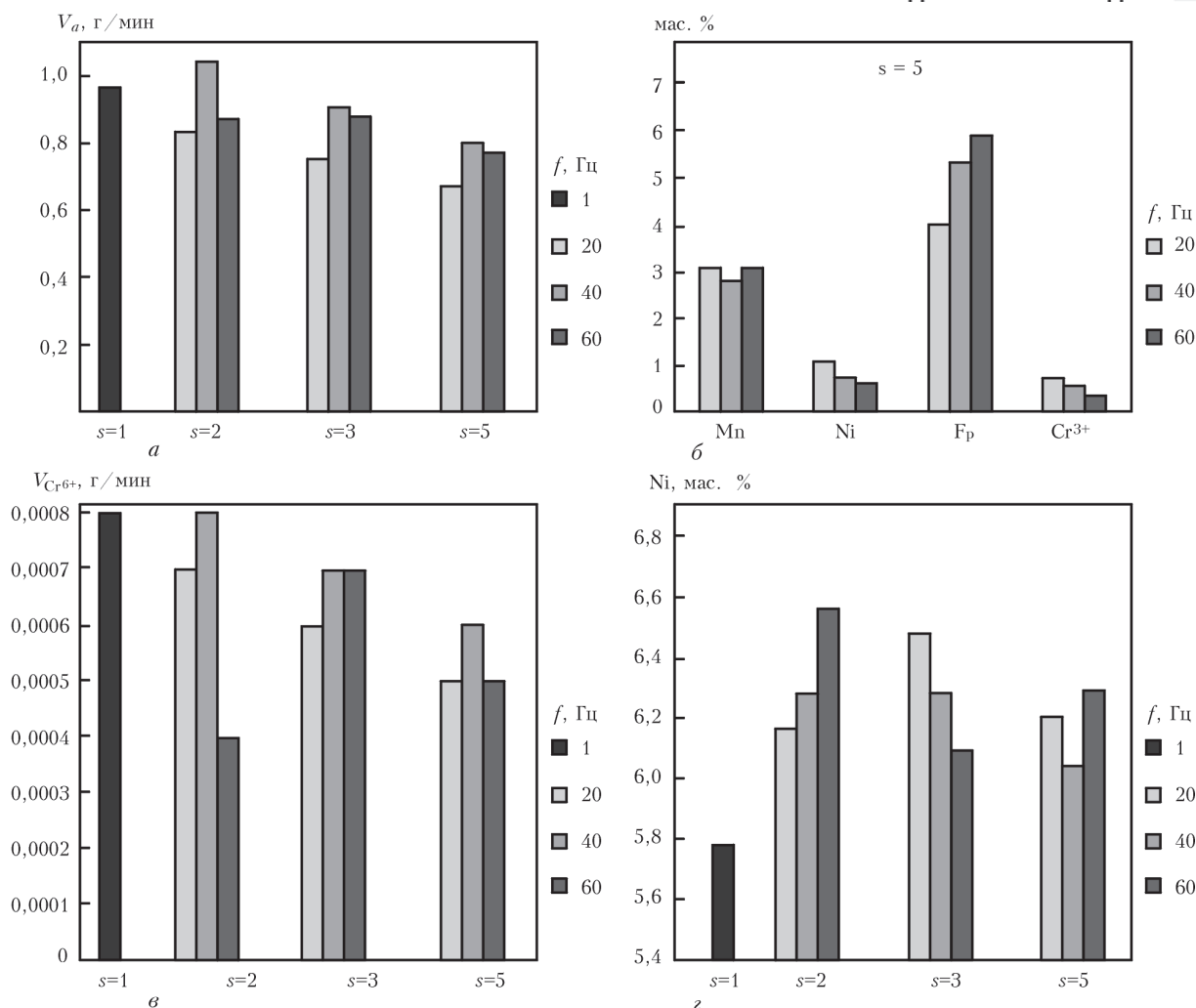


Рис. 2. Показатели выделений СА при сварке проволокой ЭП-690, полученные на среднем токе 160 А и напряжении 21...22 В с постоянной подачей электродной проволоки ($f=1$ Гц, $s=1$ ед.); с импульсной подачей проволоки ($f=20, 40, 60$ Гц, $s=2, 3, 5$ ед.): а — интенсивность выделения СА V_a ; б — массовая доля Mn, Cr³⁺, Fp и Ni в составе СА (для $s=5$ ед.); в — интенсивность образования шестивалентного хрома $V_{\text{Cr}^{6+}}$; г — массовая доля никеля в составе СА

по сравнению с традиционной механизированной дуговой сваркой вследствие уменьшения количества тепла, выделяемого в зоне сварки.

Кроме того, применение сварки импульсным током позволяет значительно снизить выделение марганца в составе СА [12] путем обеспечения процесса с управляемыми принудительными короткими замыканиями, увеличения частоты замыканий, уменьшения длины дуги и размера капли. Снижать содержание марганца в СА можно регулированием частоты импульсов тока, способствующих лучшему отрыву капли от электрода и увеличению частоты их перехода в ванну. Результаты исследований, полученные в данной работе, хорошо согласуются с результатами других работ по вопросу механизированной сварки модулированным импульсным током [2, 3, 12, 14].

Результаты сравнительных исследований содержания токсичного марганца в СА, образующихся при сварке проволокой Св-08Г2С с постоянной и импульсной подачей (рис. 1, б) показывают, что минимальное его содержание име-

ет место при импульсной подаче электродной проволоки на режимах $f=20, 40, 60$ Гц, $s=2$ ед. Остальные режимы сварки $f=20, 40, 60$ Гц, $s=3$ и 5 ед. приводят к некоторому повышению содержания марганца в составе СА по сравнению со сваркой с непрерывной подачей проволоки.

Исследование зависимостей содержания марганца в составе СА (рис. 1, б) и интенсивности его выделения от частоты и скважности импульсов подачи электродной проволоки показали, что увеличение скважности импульсов способствует повышению концентрации марганца в СА и интенсивности его выделения, влияние частоты импульсов — неоднозначно. При сварке с импульсной подачей электродной проволоки с частотой импульсов 40...60 Гц уменьшение величины скважности импульса с 5 до 2 ед. дает возможность снизить содержание токсичного марганца в составе СА и интенсивность его выделения почти в 2 раза.

Таким образом, результаты исследований зависимости интенсивности выделения марганца, как ведущего токсичного компонента при сварке проволо-



кой Св-08Г2С, позволяют выбрать режимы сварки, которые обеспечивают минимальное поступление марганца в воздух рабочей зоны. Это режим сварки с импульсной подачей электродной проволоки с частотой 40...60 Гц и скважностью 2 ед.

Сварка проволокой ЭП-690 в смеси Ag + CO₂. При применении для сварки проволоки ЭП-690 с ее импульсной подачей интенсивность образования СА ниже, чем во время сварочного процесса с постоянной подачей проволоки, кроме режима $f = 40$ Гц, $s = 2$ ед. (рис. 2, а). Использование проволоки ЭП-690 приводит к выделению в воздух рабочей зоны таких вредных компонентов как марганец, трехвалентный хром, никель (рис. 2, б), а также шестивалентный хром. В составе СА наиболее высокое содержание имеет марганец, меньшее — трехвалентный хром, никель и минимальное — шестивалентный хром. В данном случае наиболее токсичным компонентом СА является шестивалентный хром, результаты исследований интенсивности выделений которого приведены на рис. 2, в. Из указанного рисунка следует, что при сварке с импульсной подачей электродной проволоки (кроме режима $f = 40$ Гц, $s = 2$ ед.) интенсивность выделения шестивалентного хрома более низкая, чем при постоянной подаче проволоки. Максимальная интенсивность выделения шестивалентного хрома отмечается на режиме сварки с частотой 40 Гц и скважностью 2 ед. по сравнению с остальными режимами сварки с импульсной и постоянной подачей проволоки. Наиболее приемлемым режимом, обеспечивающим минимальное выделение шестивалентного хрома (в 2 раза меньше, чем при сварке с постоянной подачей проволоки), является режим с импульсной подачей проволоки с частотой 60 Гц и скважностью 2 ед.

Что касается никеля (второго по величине токсичности канцерогенного компонента СА), то по результатам исследований (рис. 2, г) видно, что его содержание в СА при сварке проволокой ЭП-690 наоборот имеет минимальное значение на режиме с постоянной подачей проволоки по сравнению со сваркой с импульсной подачей проволоки на всех исследованных режимах. Результаты исследований зависимости интенсивности выделения никеля от режима сварки с импульсной подачей проволоки показали, что она минимальна на режиме с частотой 20 Гц и скважностью 5 ед., а максимальна — на режиме с частотой 40 Гц и скважностью 2 ед. Это рекомендуется учитывать при выборе оптимального режима сварки, когда ведется учет интенсивности выделения в воздух рабочей зоны всех компонентов СА. При этом следует помнить, что по величине предельно допустимой концентрации (ПДК) токсичность шестивалентного хрома в 5 раз выше, чем токсичность

никеля и многократно превышает ПДК других компонентов в составе СА.

Сварка порошковой проволокой Велтек-Н320 в CO₂. При сварке порошковой проволокой Велтек-Н320, в состав которой кроме упомянутых выше компонентов также входят фториды, применение импульсного режима в большинстве случаев позволяет улучшить гигиенические характеристики по сравнению со сваркой с постоянной подачей проволоки, особенно на режимах с частотой 20 Гц при любой скважности (рис. 3, а).

Результаты исследований зависимостей интенсивности образования СА от частоты и скважности импульсов (рис. 3, а) показали, что при скважности 2, 3 и 5 ед. при частоте 20 Гц она имеет минимальное значение, далее на частоте 40 Гц достигает максимума и затем снижается до 60 Гц, за исключением режима со скважностью 2 ед., где после частоты импульсов 40 Гц, интенсивность образования СА продолжает расти. Определение химического состава СА (рис. 3, б) показало, что в нем в наибольшем количестве содержатся фториды нерастворимые (61,4 %), за ними следуют фториды растворимые (18,0 %), далее — марганец (13,9 %), никель (5,0 %) и в наименьшем количестве содержится трехвалентный хром (3,4 %). Что примечательно, шестивалентный хром в данном случае отсутствует. Минимальное содержание токсичного марганца в составе СА было при сварке с импульсной подачей проволоки на режиме $f = 40$ Гц, $s = 2$ ед. и максимальное — при сварке с постоянной подачей (рис. 3, в).

Исследования зависимостей интенсивности выделения марганца от частоты и скважности импульсов показали, что они также имеют сложный характер: на частотах импульсов 20 и 60 Гц имеют практически одинаковые значения; на частоте 40 Гц при скважности 5 ед. интенсивность выделения марганца имеет максимальное значение, а при скважности 2 ед. — минимальное. Последнее подтверждают ранее полученные данные [2] о том, что сварка импульсным током позволяет снизить содержание марганца в СА за счет управления переносом электродного металла.

Определение выделений растворимых фторидов (2 класс опасности) показывает, что его максимальное содержание было в СА, образующихся при сварке с импульсной подачей проволоки на режимах с частотой 40 и 60 Гц и скважностью 2, 3 и 5 ед.; более низкое — при сварке с постоянной подачей проволоки и с импульсной подачей на частоте 20 Гц и скважностях 2, 3, 5 ед. (рис. 3, г). Исследования зависимостей интенсивности образования растворимого фтора от частоты и скважности импульсов показали, что при сварке со скважностью 3 и 5 ед. на частотах от 20 до

40 Гц она возрастает, а от 40 до 60 Гц снижается, за исключением скважности 2 ед., где интенсивность образования растворимого фтора постоянно растет. Фтор нерастворимый (3 класс опасности) в максимальном количестве присутствует в СА в случае сварки с постоянной подачей электродной

проволоки и в значительно меньших количествах при сварке с импульсной подачей проволоки на всех режимах (рис. 3, д).

Исследование содержания никеля (1 класс опасности) в СА (рис. 3, е), как ведущего токсичного компонента в данном случае, показало, что

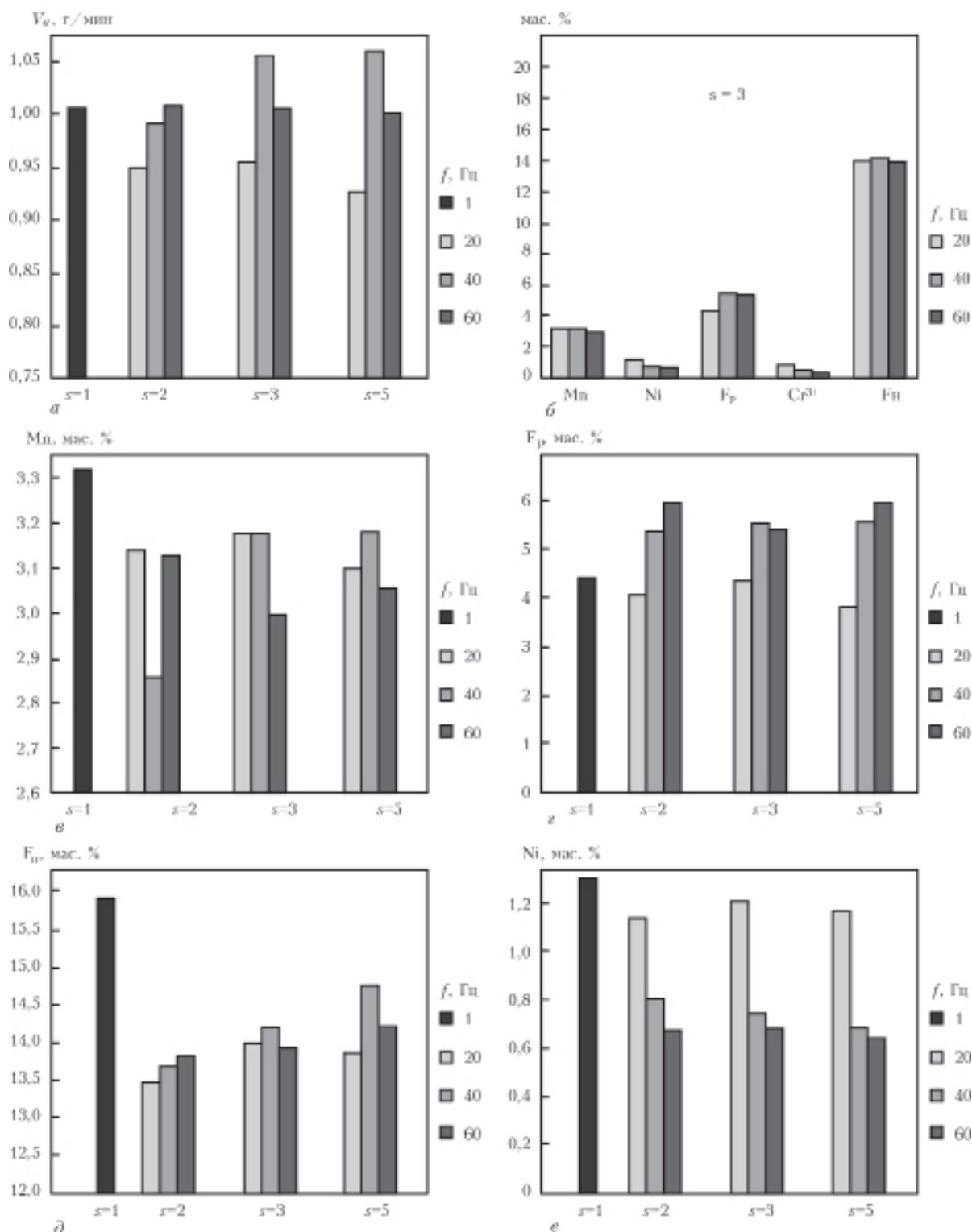


Рис. 3. Показатели выделений СА при сварке проволокой Велтек-Н320, полученные на среднем токе 230 А и напряжении 26...27 В с постоянной подачей электродной проволоки ($f=1$ Гц, $s=1$ ед.); с импульсной подачей проволоки ($f=20, 40, 60$ Гц, $s=2, 3, 5$ ед.): а — интенсивность образования СА (V_a); б — массовая доля вредных веществ в составе СА (при скважности 3 ед.); в — массовая доля Mn в составе СА; г — массовая доля растворимого фтора F_p в СА; д — массовая доля нерастворимого фтора F_n в СА; е — массовая доля Ni в СА



его минимальное количество было при сварке с импульсной подачей порошковой проволоки на режимах с частотой 40 и 60 Гц и скважностью 2, 3 и 5 ед., а максимальное — при сварке с постоянной подачей проволоки, а также на режимах с импульсной подачей проволоки с частотой 20 Гц и скважностях 2, 3, 5 ед. Зависимости интенсивности выделения никеля от частоты импульсов снижаются с ее увеличением. Поэтому в данном случае (при отсутствии шестивалентного хрома в СА) при выборе режимов сварки, обеспечивающих минимальное воздействие СА на организм сварщика, следует ориентироваться на никель.

Таким образом, по полученным данным установлено, что интенсивность образования СА, количество выделяемых примесей и их массовая доля в составе СА весьма чувствительны к изменению напряжения в пределах $\pm 1,5 \dots 2$ В, которое происходит при импульсной подаче электродной проволоки. Она зависит от вида переноса электродного металла, типа электродной проволоки и уровня ее легирования. Применение импульсной подачи электродной проволоки позволяет управлять не только размером расплавленной капли через шаг подачи, но также задавать тип переноса электродного металла. Так, при использовании порошковой проволоки Велтек-Н320 на режимах с частотой 40 и 60 Гц и скважностью 2, 3 и 5 ед. наблюдался струйный перенос с частой модуляцией длины дуги и, как следствие, ее напряжения, что в итоге привело к уменьшению содержания паров никеля (наиболее низкое выделение никеля обеспечивается на режимах с импульсной подачей проволоки при частоте 40 и 60 Гц). Переход к крупнокапельному переносу с короткими замыканиями при частоте импульсов 20 Гц не изменил существенно уровень содержания никеля по сравнению с постоянной подачей электродной проволоки, зато повлиял на скорость образования СА и содержания в нем паров других соединений. В случае же со сплошной электродной проволокой ЭП-690 возможность ее импульсной подачи влияет на тип переноса электродного металла и позволяет на скважности 5 ед. и частоте 20 Гц получать стабильный процесс с короткими замыканиями, что в итоге положительно сказывается на интенсивности образования СА и уменьшении интенсивности выделения шестивалентного хрома примерно в 2 раза. Такие же закономерности, связанные с влиянием параметров импульсной подачи электродной проволоки на объем капли, длительность ее пребывания на торце электродной проволоки, длительность перехода капли в сварочную ванну, наблюдаются и в случае сварки электродной проволокой Св-08Г2С. При сварке с импульсной подачей электродной проволо-

ки Св-08Г2С в смеси защитных газов $\text{Ar} + \text{CO}_2$ интенсивность выделения СА уменьшается от 1,2 до 2 раз по сравнению со сваркой с непрерывной подачей проволоки.

Из всего выше сказанного следует, что сварка с управляемой импульсной подачей электродной проволоки улучшает гигиенические характеристики этого процесса по сравнению со сваркой с непрерывной подачей и до некоторой степени дает возможность управлять ими при точной настройке параметров импульсной подачи электродной проволоки и всего комплекса сварочного оборудования. Полученные результаты исследований рекомендуются использовать при выборе режимов сварки с управляемой импульсной подачей электродной проволоки.

1. *Интенсивность образования аэрозолей при ручной сварке модулированным током* / А.П. Головатюк, В.С. Сидорук, О.Г. Левченко и др. // Автомат. сварка. — 1985. — № 2. — С. 39–40.
2. *Левченко О.Г.* Образование аэрозолей при сварке в CO_2 модулированным током // Там же. — 2000. — № 8. — С. 48–50.
3. *Harvey R. Castner.* Gas metal arc welding using pulsed fume generation current. WELDING RESEARCH SUPPLEMENT. — February, 1995. — P. 59–68.
4. *Лебедев В.А.* Особенности управления процессом сварки плавящимся электродом с импульсной подачей электродной проволоки // Сварка и Диагностика. — 2014. — № 1. — С. 16–18.
5. *Winifred G. Palmer, James C. Eaton.* Effects of welding on health, XIII // American Welding Society. — 2007. — International Standard Book Number: 978-0-87171-067-3.
6. *James M. Antonini.* Health effects of welding // Critical reviews in toxicology. — 2003. — 33(1). — P. 61–103.
7. *ANSI Z49.1-2005.* «Safety in welding, cutting and allied processes», Section E5.4 pg 12. American Welding Society, 550 N. W. LeJeune Road, Miami, FL, 2005.
8. *Лебедев В.А., Лендел И.В.* Управление импульсным движением электродной проволоки при механизированной сварке за счет изменения шага подачи // Заготовительные производства в машиностроении. — 2013. — № 3. — С. 10–14.
9. *Потапьевский А.Г., Сараев Ю.Н., Чинахов Д.А.* Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего: монография; Юргинский технологический ин-т. — Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2012. — 208 с.
10. *ДСТУ ISO 15011-1:2008.* Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Лабораторний метод відбирання аерозолів і газів, утворюваних під час дугового зварювання. Частина 1. Визначення рівня виділень і відбір проб для аналізу мікрочастинок аерозолів. — [Чинний від 2008-08-15]. — Київ: Держспоживстандарт України, 2011. — 8 с.
11. *Методические указания по определению вредных веществ в сварочном аэрозоле (твердая фаза и газы): Методические рекомендации № 4945-88.* — М.: Минздрав СССР, 1990. — 150 с.
12. *Левченко О.Г.* Влияние состава защитного газа и режимов сварки на валовые выделения сварочного аэрозоля // Автомат. сварка. — 1986. — № 1. — С. 73–74.
13. *Воропай Н.М. Бенидзе З.Д.* Бучинский В.Н. Особенности процесса сварки в CO_2 с импульсной подачей электродной проволоки // Там же. — 1989. — № 2. — С. 23–26, 36.
14. *Левченко О.Г.* Влияние технологических режимов сварки в CO_2 конструкционных сталей на выделение аэрозоля // Там же. — 1992. — № 9-10. — С. 31–33.

Поступила в редакцию 06.07.2015



ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ



Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.

Крикент И.В. (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины) защитил 2 декабря 2015 г. докторскую диссертацию на тему «Математическое моделирование физических процессов при сварке неплавящимся электродом и дуговой обработке металла».

Диссертация посвящена разработке научно-технических основ повышения эффективности дугового нагрева металлов путем выявления новых закономерностей протекания физических процессов в системе «дуга–металл» с помощью самосогласованных математических моделей; поиску новых способов воздействия на дугу с тугоплавким катодом, обеспечивающих повышение ее проплавляющей способности и производительности сварки неплавящимся электродом.

Разработана замкнутая математическая модель физических процессов в плазме сварочной дуги и в нагреваемом металле при сварке неплавящимся электродом и дуговой обработке металла. Модель предусматривает согласованное описание процессов переноса энергии, вещества и заряда в системе «дуга–металл». Предложены экономичные алгоритмы численного расчета характеристик системы «дуга–металл» методом конечных разностей. Разработано программное обеспечение, которое позволяет проводить массовый вычислительный эксперимент на персональных компьютерах. Проведенная верификация модели подтверждает ее адекватность и достоверность результатов моделирования.

Определены распределенные и интегральные характеристики анодной области стационарной аргоновой дуги с тугоплавким катодом в диапазоне сварочного тока 50...350 А. Установлено, что анодное падение потенциала существенным образом влияет на энергетический баланс дугового разряда и характеристики его теплового и электрического взаимодействия с металлом анода. Показано, что повышение проплавляющей способности дуги при сварке неплавящимся электродом с высокочастотной модуляцией тока импульсами асимметричной формы обусловлено контрагированием токопроводящего канала дуги на переднем фронте импульса высокой крутизны.

Установлено, что максимальное содержание доли паров металла достигается на некотором расстоянии от поверхности анода, испаряющегося в диффузионном режиме. Это объясняется различными скоростями диффузии атомов и ионов пара

и высокой скоростью ионизации-рекомбинации частиц пара в неоднородном температурном поле прианодной плазмы. Диффузия металлического пара в дуговую плазму приводит к формированию в прианодной зоне течения, направленного против газодинамического потока в столбе дуги, что приводит к снижению температуры плазмы на границе с анодным слоем. При этом под воздействием паров металла максимум плотности теплового потока в анод уменьшается и смещается от центра анодного пятна к его периферии. Для увеличения эффективности дугового нагрева свариваемого металла рекомендовано выбирать параметры режима сварки таким образом, чтобы максимальная температура расплава не превышала 2700 К.

Установлено, что причиной синергетической активации проплавляющей способности гибридной (ТИГ + CO₂-лазер) сварки является эффект контракции электрического тока в прианодной дуговой плазме. Этот эффект обусловлен неоднородным распределением анодного падения потенциала вдоль поверхности анода при нагреве плазмы лазерным излучением. Показано, что воздействие электромагнитных сил Лоренца на гидродинамическую обстановку в сварочной ванне способствует увеличению глубины проплавления металла и тем больше, чем меньше размер токового пятна дуги на поверхности анода.

Такая особенность действия силы Лоренца является причиной повышенной проплавляющей способности дуги при А-ТИГ сварке, высокочастотной импульсной сварке неплавящимся электродом и гибридной сварке (ТИГ + CO₂-лазер). Методом вычислительного эксперимента исследованы процессы энерго-, массо- и электропереноса в системе «дуга–свариваемое изделие». Установлено, что экспериментальные данные о распределениях плотности тока и плотности теплового потока в анод, полученные методом разрезного «холодного» анода, дают искаженные представления о характере и величине этих характеристик в реальных условиях дуговой сварки.

Рекомендовано для наиболее эффективного обогрева металлической ванны и интенсификации перемещения металла в ковше УКП за счет электромагнитных сил использовать электрические дуги с большим током и минимальной длиной. На основании результатов численных экспериментов, проведенных с помощью самосогласованной математической модели, дано объяснение физических эффектов, которые наблюдаются при сварке модулированным током и гибридной лазерно-дуговой сварке. Разработаны рекомендации по повышению эффективности дугового нагрева металлов. Предложены способы воздействия на дугу с тугоплавким катодом, позволяющие повысить ее проплавляющую способность.



68-я Ежегодная Ассамблея МЕЖДУНАРОДНОГО ИНСТИТУТА СВАРКИ IIW 2015 Хельсинки, Финляндия

Окруженный с трех сторон морем и известный, как «Жемчужина Балтийского моря», Хельсинки, столица Финляндии, тепло приветствовал 885 человек из разных стран со всего мира на 68-й Ежегодной Ассамблее и Международной конференции Международного института сварки (МИС) с 28 июня по 3 июля 2015 г.

Эта уже третья Ежегодная Ассамблея МИС, проведенная в Финляндии, которая была организована Сварочным обществом Финляндии (СОФ) является членом МИС с 1949 г.). 96 финских делегатов приняли участие в этом мероприятии, представляющим замечательную возможность встретиться с коллегами, внести свой вклад и научиться у представителей международного сварочного сообщества.

Почти рекордное количество участников Ассамблеи и конференции приехало из 54 стран. Наибольшими делегациями были представлены Германия, Япония и Республика Корея. Концентрация внимания МИС на молодых специалистах была подтверждена присутствием и участием более 80 «будущих лидеров» мировой сварочной отрасли.

Специальные встречи и мероприятия во время проведения Ассамблеи включали Семинар по аддитивному производству, семинар по мониторингу состояния конструкций и семинар по созданию национальных организаций по сварке (все это обсуждается более подробно ниже). На таких мероприятиях, как правило организованных совместно рядом комиссий МИС, основное внимание уделяется инновациям и взаимному обогащению идеями и знаниями, которые являются отличительной чертой МИС и имеют неоценимое значение для сварочного сообщества во всем мире.

Генеральная Ассамблея МИС

Состав МИС к настоящему времени вырос до внушительного количества (59 стран). Это стало известным во время Генеральной Ассамблеи, состоявшейся 28-го июня, когда были утверждены заявки от Алжира, Анголы и Камеруна. Расширение услуг, например, таких, как внедрение Программы квалификации и сертификации МИС, а также поддержка сварочных обществ может дать значительные позитивные результаты для таких развивающихся стран.

Страны могут быть представлены в МИС более чем одним обществом-членом. Так, Нацио-

нальное агентство контроля сварки (НАКС) было принято Ассамблеей в качестве второго общества-члена от России.

Обновление Совета директоров

Поскольку срок полномочий проф. Yoshinori Hirate (Япония) и проф. Др.-инж. Boyoung Lee (Республика Корея) в качестве Директоров были успешно завершены, Генеральная Ассамблея утвердила вновь назначенных директоров проф. Fumiyoshi Minami (Япония), проф. Americo Scotti (Бразилия) и проф. Yixiong Wu (КНР).

Обновление Технического управляющего совета

Председателем технического управляющего совета (ТУС) является др. Luca Costa (Италия). Срок полномочий двух членов ТУС, др. Solomon Edibiri (Нигерия) и др. Zhen Sun (Сингапур) закончился и Ассамблея утвердила новые назначения: г-на Stephan Egerland (Австрия) и проф. Patricio Mendez (Канада) на следующие три года.

Церемония открытия

Выдающийся «Финляндия Холл», созданный всемирно известным финским архитектором Алвара Аалто и заверченный в 1971 г., стал местом официального открытия Ежегодной Ассамблеи МИС в 2015 г. Гости подъезжали под музыку легендарного финского композитора Яна Сибелиуса, исполненную в честь 150-летия со дня его рождения.

Ведущий вечера, Marti Vännäs, разогрел публику своим остроумием и принесшей ему международную награду магией, прежде чем перейти к его более формальной роли – приветствия всех присутствующих и представления членов Совета директоров МИС.

Затем, г-н Ismo Meuronen, председатель местного Организационного комитета и президент СОФ поприветствовал всех в Хельсинки и высоко оценил работу организаторов мероприятия, технических советников и секретариата мероприятия – «Confedent International Oy», а г-н Goran Monefors, управляющий директор Северного отделения спонсоров мероприятия компании «Voestalpine Böhler Welding» — добавил свое приветствие и пожелания успешного проведения Ассамблеи.

68-я ежегодная Ассамблея МИС затем была официально открыта проф. Gary Marquis, президентом МИС и деканом Инженерной школы уни-



Президент МИС Проф. Marquis (справа) и генеральный директор д-р Мауег (слева) вручили знак признания проф. Hirata (в центре) по случаю завершения срока его полномочий как члена Совета директоров МИС



Дискуссия с проф. Marquis



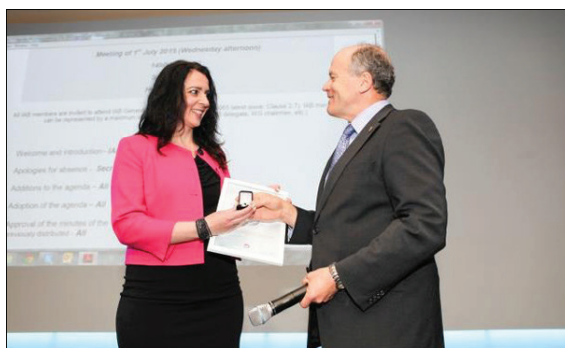
Приветствие НАКС, второго общества-члена в МИС от России



Вручение медали Walter Edström проф. Я. Пилярчику, Польша (справа)



Проф. Mendez (справа) поздравляет г-на Levert с его назначением в Технический управляющий совет (ТУС)



Значок за посещение 10 Ассамблей был вручен г-же Viera Whalen (Словакия) Президентом МИС, проф. Gary Marquis



Во время вечера молодых профессионалов



Вручение премии за региональную деятельность проф. П. Даржанову (слева) и др.-инж. М. Белоеву (справа), Болгария



Г-н Davis (на фото слева) и проф. Park (фото справа) получили почетные награды за 10-летнее участие в Ассамблеях и в деятельности по стандартизации в МИС



Др. Luca Costa (слева), Председатель Технического управляющего совета вручил г-ну Robert Shaw (США) награду за выполнение обязанностей Председателя



Слева направо: Др. Luca Costa (председатель ТМВ) в 2015 г. со стипендиатами МИС 2015 г. — проф. др.-инж Cetin Morris Sonsino, проф. Chitoshi Miki, д-р Thomas Siewert, проф др. Takashi Miyata и Проф. Pingsha Don



Слева: г-н Geoff Crittenden и г-н John Burnett, Исполнительный директор и президент WTIA (Австралия), получили флаг МИС от г-на Jouko Kampala и г-на Jouko Lassila, Исполнительного директора Уполномоченного национального органа и исполнительного директора СОФ (Финляндия)



Приветственное слово от спонсора Гала Банкета компании Kemppi Оу, представленной г-ном Frederic Lanz и миссис Teresa Kemppi-Vasama



Г-н Goran Monefors поприветствовал участников от имени компании-спонсора Voestalpine Böhler Welding



Заключительное слово от г-на Gismo Metronome, Президента Сварочного общества Финляндии



верситета Аалто, Финляндии. На сцене к нему присоединилась др. Cécile Mayer, главный исполнительный директор МИС, для вручения ежегодных наград МИС.

Награды МИС

Каждый год МИС воздает должное тем, кто самоотверженно работал или продемонстрировал превосходство в своей области. Во время церемонии награждения чествовали тех, кто внес значительный вклад в технологию сварки и получения соединений, либо благодаря своим последним выдающимся техническим достижениям, либо благодаря выдающимся профессиональным достижениям и исключительному вкладу в работу МИС, промышленность, образование или региональные и/или международные стандарты.

Были объявлены следующие премии МИС 2015 г.:

Премия Henry Granjon

Категория А: Технологии получения

соединений и изготовления др.-инж. André Hälsig
(Германия)

Категория В: Поведение и

свариваемость материалов др. Eun-Joon Chun (Япония)

Категория С: Проектиро-

вание и целостность конструкций др. Philipp Schempp
(Германия)

Категория D:

Темы, связанные с человеком др. Liu Yukang (США)

Самая лучшая статья

в ж. «Welding in the world»

Премия 2014 др. Elin Marianne Westin
(Австрия)

Премия Yoshiaki Arata проф., почет. др. Einar Halmøy
(Норвегия)

Медаль Walter Edström проф. д-р-инж. J. P. Pilarczyk
(Польша)

Премия Arthur Smith проф. Luisa Countinho
(Португалия)

Медаль Thomas др. H Glenn Ziegenfuss (США)

Премия Halil Kaya Gedik проф. Др. Stephen Liu (США)

Премии за региональную

деятельность др.-инж. Marin Georgiev Beloev
(Болгария),
др. Petar Ivanov Darjanov
(Болгария)

После церемонии гости наслаждались финскими деликатесами в ресторане в Finlandia Hall, любуясь поразительной светлой летней ночью и видом на залив через широкие окна зала.

Рабочие органы МИС

Технические комиссии, специальные комитеты, исследовательские группы и другие рабочие органы провели встречи во время Ежегодной асамблеи, на которой присутствовали делегаты, эксперты и наблюдателей из стран-членов МИС.

Комиссии МИС и технические рабочие группы работают как «мозговые центры» и драйверы технического прогресса для ученых, инженеров и

других специалистов, участвующих в исследованиях, разработке и применении технологий соединения материалов.

Встречи в Хельсинки способствовали обмену мнениями экспертов и взаимодействию инженеров, ученых из ведущих университетов и научно-исследовательских институтов всего мира, а также исследовательского персонала и руководителей верхнего эшелона ведущих мировых компаний.

Заседания Международного Разрешительного Совета (MPC) и его рабочих групп способствовали разработке и осуществлению Программы квалификации и сертификации МИС, в то время как другие группы работали в таких областях, как стандартизация, научные исследования и сотрудничество, региональная деятельность и обеспечение контактов.

Специальные мероприятия

Семинар по сварке/получению соединений и аддитивному производству. Быстрое глобальное движение к аддитивным производственным (АП) технологиям было освещено представителями ряда стран — от США, Финляндии и Германии до Японии и КНР — представившими технические документы на семинаре во вторник, организованным совместно Комиссиями I (Аддитивное производство, наплавка и термическая резка), IV (Высокоэнергетические лучевые процессы) и XII (процессы дуговой сварки и производственные системы) и Исследовательской группой 12 (Физика сварки).

Аддитивное производство (АП) металлических изделий — это, по существу, сварочный процесс, в котором материал добавляется в виде последовательных слоев, чтобы создать деталь с нуля. Сплавы металлов с высокими характеристиками, такие как титан, кобальт и никель, а также нержавеющая и углеродистая стали — все они могут использоваться, и АП делает возможным производство деталей и устройств, которые невозможно изготовить с использованием традиционных технологий. Производство различных конструкций не требует никаких изменений (в оборудовании), что делает жизнеспособным ограниченное производство, в том числе изготовление разовых изделий и конструкций, с использованием данных 3D сканирования.

При АП используется меньше сырья и энергии, чем при традиционных методах, таких как производство заготовок и обработки с использованием ЧПУ, потому что почти готовая форма изделия достигается путем наращивания подаваемого материала с нуля, вместо того, чтобы вырезать его из заготовки большего размера. Некоторые станки по существу работают как сварочные установки с компьютерным управлением, где подаваемая проволока



или порошок расплавляются с помощью плазменной дуги, электронного пучка или лазера.

Доклады на семинаре, на котором присутствовали 149 человек из 31 разных стран, были посвящены рассмотрению последних разработок в области моделирования и оптимизации размерной точности, а также новых достижений в области процессов АП, материалов и их применений в промышленности.

Семинар по мониторингу технического состояния конструкций

Мониторинг технического состояния конструкций (МТСК) включает установку датчиков, или массивов датчиков на разработанной конструкции для ее периодического контроля с целью определения ее деградации под влиянием рабочей среды. Датчики обеспечивают неразрушающие измерения для получения информации о критических свойствах конструкции такой, как результаты измерения толщины стенки для обнаружения коррозии, мониторинг возникновения или роста трещин для сварных швов, подверженных растрескиванию, мониторинг вибрации конструкции, которая подвержена усталости, и измерения напряжений для конструкций, где необходимо контролировать либо пиковые нагрузки, либо результаты детального измерения напряжений. Эти данные затем анализируются статистически для определения текущего состояния конструкции, чтобы оценить ее остаточный ресурс, и чтобы можно было принять решения для последующего технического обслуживания.

Комиссии V (Неразрушающий контроль и обеспечение качества сварных изделий), XI (Сосуды давления, котлы и трубопроводы), XIII (Усталость сварных изделий и конструкций) и XV (Проектирование, анализ и изготовление сварных конструкций) провели совместный семинар по этому важному вопросу. Многие страны и отрасли промышленности по всему миру вынуждены управлять старением инфраструктуры и изучают пути продления срока службы в рамках экономических ограничений и требований обеспечения общественной и экологической безопасности. Присутствие более 60 представителей из 17 стран продемонстрировало важность этого форума и знаний, которыми обменялись участники.

Представленные доклады были посвящены разработке датчиков, в том числе датчиков из макроволоконных композитов для обнаружения трещин и оптических решеток Брэгга для дефектоскопии. Также обсуждалось использование сварных швов в конструкции датчиков МТСК и моделирования для определения вероятности обнаружения (дефектов) для различных конфигураций датчиков МТСК. Был представлен новый способ использования естественных резонансов в конструкции, как для небольших компонентов

с использованием изгибных режимов колебаний, так и для больших конструкций, где были рассмотрены колебания в корпусе контейнеровоза. Были также доклады по конкретным применениям, описывающие применение МТСК для компонентов промышленного оборудования, опорного «корсета» ядерного котла и коррозионного мониторинга.

МТСК — это многопрофильная область, которая быстро меняется в связи с технологическими достижениями, и в которой в настоящее время нет хорошо организованной стандартизации. Это важная область для МИС, поскольку все сварные или другим образом соединенные конструкции требуют мониторинга, чтобы продлить срок их службы и обеспечить непрерывную безопасную работу. МТСК представляет интерес для ряда Комиссий МИС и является темой, которой МИС по-прежнему будет заниматься путем проведения семинаров и через совместную деятельность Комиссий.

Семинар по созданию Национального органа по сварке

Шестидесят шесть человек приняли участие в семинаре, организованном Комиссией XIV по образованию и подготовки кадров и посвященном рассмотрению сложных задач в отраслях, использующих сварку и технологии получения соединений и различные инициативы по всему миру для решения этих задач.

Были рассмотрены стратегии МИС по международному сотрудничеству, такие как публикации Белой Книги МИС и проекта МИС «Улучшение глобального качества жизни путем оптимального использования сварочной технологии», а презентации и демонстрации были посвящены основным элементам, необходимым стране для создания национального органа по сварке, таким, как: образование, подготовка, получение навыков и карьерные дорожки, аттестация и сертификация, передача технологии, исследования и разработки, а также национальные и международные сети.

На первом заседании, председатель комиссии г-н **Chris Smallbone** (Австралия) представил обзор Белой книги МИС и объяснил, что в ней содержится много примеров из опыта (разных) стран по созданию различных аспектов национального органа по сварке. Один проект Рабочей группы C-XIV посвящен таким аспектам, как образование, обучение, повышение квалификации и сертификация, и он представил 11 возможных программ, реализацию которых страна может рассмотреть, чтобы способствовать созданию своих органов по сварке.

Затем **проф. Dorin Dehelean** (Румыния) представил конкретные примеры, а др. **Arun Bhaduri** (Индия) доложил о последних семинарах в поддержку проектов по созданию национального органа по сварке в странах-членах МИС в Юго-Вос-



точной Европе и Индии, остановившись на общих темах и проблемах.

На заседании 2, презентация **г-жи Ivonne Olgers** (Нидерланды), организатора проекта Рабочей группы C-XIV по цифровому обучению, проиллюстрировала прогресс и инновации в этой области. Он предназначен для того, чтобы связываться с компаниями по всему миру, чтобы включить их продукты и услуги, касающиеся цифрового обучения, в проект.

В презентациях на заседании 3 под председательством **г-на Jorge Huete** (Испания), организатора проекта Комиссии по моделированию, были рассмотрены самые последние инновации со всего мира, по сварке в виртуальной реальности и моделированию, и подчеркнуто их значение в совершенствовании традиционных методов подготовки по сварке. Внедрение такой технологии моделирования организациями, занимающимися обучением и компаниями стремительно растет в связи с экономией расходных сварочных и основных материалов, преимуществами с точки зрения охраны труда, обратной связи в реальном времени с несколькими студентами, оборудования для постоянного мониторинга и синергии с современными технологиями, используемых студентами каждый день.

Участники семинара смогли попробовать поработать на оборудовании в присутствии специалистов из компаний 123 Certification Inc., EWM, Fronius International, The Lincoln Electric Company, и Seabery, в то время как обсуждения в группах на протяжении всего семинара подчеркнули важность различных проектов C-XIV.

Было решено провести аналогичный семинар C-XIV в июле 2016 г. в Австралии, в течение следующего Ежегодной Ассамблеи МИС.

Вечер молодых профессионалов

Единственная реальная проблема — это весело провести время и завести новых друзей! Это был принцип викторины, ставшей испытанием для молодых специалистов на встрече, которая состоялась на инженерном факультете университета Аалто.

Профессор Gary Marquis, местные организаторы доц. Pedro Vilaca и др. Heikki Remes и руководители групп г-н Christoph Esser-Ayertey (Германия) и г-н Levente Bakos (Венгрия) приветствовали более 80 участников. После ознакомления с университетом и промышленностью Финляндии участники были разбиты на пять групп — метко названных «присадочный металл» (победитель вечера), «базовый материал», «защитный газ», «источник питания» и «ЗТВ».

Наряду с более веселыми занятиями, такими как дарты, крокет и мёлкки (финская игра с метанием, похожая на кегли), команды посетили лаборатории сварки и прочности материалов

и им предложили ответить на ряд технических вопросов.

Каждая команда также дала обдуманый ответ на вопрос на миллион долларов, «Какой скачок сделает сварочная технология к 2050 г.?». Победившая идея «Сварка в атмосферах Марса и Луны» отразила сущность группы молодых профессионалов, которая была организована МИС, чтобы создать форум для работы в сетях, который обеспечит появление новых идей и обучение будущих лидеров сварочного сообщества, и чтобы поощрять их участие в Ежегодных Ассамблеях МИС и деятельности рабочих органов.

Узнать больше о группе молодых специалистов МИС можно на Facebook и Twitter под ключевыми словами IW YP.

Итоги собраний рабочих групп

В общей сложности различные рабочие группы МИС приняли 144 решения, 110 документов было рекомендовано для публикации в рецензируемом (специалистами) журнале МИС «Сварка в мире».

Комиссия I рекомендовала Совету директоров изменить ее название на «Аддитивное производство, наплавка и термическая резка», и расширить ее полномочия, чтобы лучше отразить последние инновации в глобальной промышленности. Комиссия III (Контактная сварка, сварка в твердого фазе и смежные процессы соединения) предложила новый проект по стандартизации для пересмотра и исправления ISO 25239, части 1-5 Сварка трением с перемешиванием — Алюминий, в то время как Комиссия VI (Терминология) завершила включение материалов МИС в раздел Технического отчета ISO: ISO/TR 25901 Сварка и родственные процессы — Словарный запас и приняла резолюцию направить их в ISO.

Выборы/назначение председателей рабочих групп МИС

Комиссия II *Дуговая сварка и присадочные материалы*

Др Gerhard Posch (Австрия) был избран на второй срок в качестве Председателя

Комиссия V *Неразрушающий контроль и обеспечение качества сварных изделий*

Д-р Eric Sjerne (Канада) был избран на второй срок в качестве Председателя

Комиссия VIII *Здоровье, безопасность и окружающая среда*

Д-р мед. Wolfgang Zschiesche (Германия) был избран Председателем

Комиссия IX *Поведение материалов, подвергнутых сварке*

Д-р Hee Jin Kim (Республика Корея) был избран заместителем Председателя

Комиссия X *Структурные характеристики сварных соединений — предотвращение разрушения*



Проф. др.-инж. Fumiyoshi Minami (Япония) был избран на второй срок в качестве Председателя

Комиссия XIII *Усталость сварных изделий и конструкций*

Проф. Kenneth A MacDonald (Норвегия) был избран Председателем

Комиссия XV *Проектирование, анализ и изготовление сварных конструкций*

Др. Stefano Botta (Италия) был избран Председателем

Комиссия XVI *Соединение полимеров и адгезивная технология*

Проф. др.-инж Volker Schöppner (Германия) был вновь избран Председателем

Доцент David Grewell (США) был переизбран заместителем Председателя

Исследовательская группа 212 *Физика сварки*

Проф. Manabu Tanaka (Япония) был избран на второй срок в качестве Председателя

Исследовательская группа RES *Стратегия сварочных исследований и сотрудничество*

Проф. Americo Scotti (Бразилия) был избран на второй срок в качестве Председателя

Почетные сертификаты за участие

Почетные сертификаты за участие и памятные значки были вручены во-время различных заседаний рабочих групп тем, кто внес значительный вклад в работу МИС. **Проф. Luisa Coutinho** (Португалия) была отмечена за то, что приняла участие в 30 Ежегодных Ассамблеях МИС, **проф. Veli Kujaanpää** (Финляндия) и **проф.-инж. Jaroslav Koukal** (Чехия) — за участие в 20 Ежегодных Ассамблеях, в то время как в общей сложности 10 человек были отмечены за то, что приняли участие в 10 Ежегодных Ассамблеях МИС.

Международная конференция

Международная конференция МИС по теме «Высокопрочные материалы — «Проблемы и применения» прошла после завершения Ежегодной Ассамблеи, чтобы извлечь выгоду из присутствия стольких мировых экспертов в Хельсинки, и сделать их знания и видение будущего сварочной отрасли доступными для присутствовавших делегатов из местных организаций и промышленности и со всего мира.

После приветствия от Президента МИС и Председателя конференции, **проф. Gary Marquis**, конференция была открыта лекцией памяти выдающегося ученого Портевена, которую прочитал крупный ученый **проф. David Porter** из Университета Оулу, Финляндия, на тему «Свариваемые высокопрочные стали — проблемы и инженерные применения».

Заседания секций конференции были посвящены проблемам и решениям, охватывающим все аспекты соединения, обработки и расчетных ха-

рактеристик высокопрочных материалов, с выделением их успешного применения в промышленных и коммерческих изделиях.

Следующие участники из разных стран выступили с основными докладами:

- **д-р Petteri Jernström** (Финляндия): Новая технология сварки труб с помощью газовой электрической дуговой сварки металлическим электродом

- **г-н Boyan Ivanov** и **г-н Johannes Wirth** (Германия): Размагничивание ферромагнитных материалов

- **г-н Anders Ohlsson** (Швеция): Применение высокопрочных сталей — возможности в новых секторах (рынка).

В ходе конференции были представлены более 100 высококачественных работ из 26 стран в следующих областях:

- сосуды давления и промышленные применения процесса
- характеристики материалов подвергнутых сварке
- проектирование и изготовление
- применение в авиационной и аэрокосмической промышленности
- физика сварки
- судостроение
- применения в энергетической промышленности
- усталость и разрушение
- применения в транспортной отрасли
- явления «кинжального проплавления» в лазерной сварке
- инновационные методы соединения высокопрочных материалов
- лазерная гибридная сварка

Труды предоставляются бесплатно членам МИС и подписчикам журнала «Сварка в мире», и их можно приобрести через секретариат МИС.

Гала Банкет

Более 750 человек приняли участие в банкете в Финляндия Холл — наиболее популярном общественном событии Ассамблеи, которое знаменует собой окончание технических заседаний МИС. Это была отличная возможность для общения и укрепления дружеских отношений, возникших в течение недели, в том числе и на финском вечере, который был посвящен различным традициям таким, как барбекю, mölkkö, метание ботинок и финские народные танцы.

Г-н Ismo Meuronen, Председатель местного Организационного Комитета, президент СОФ и ведущий вечера, поздравил всех участников от имени СОФ. Позже вечером, **г-н Meuronen** представил Вице-президента МИС, **г-на Chee-Pheng Ang**, который сказал несколько слов благодарности, и вручил Сертификат признательности местному Организационному комитету.



Награда за заслуги была вручена **др. Luca Costa**, Председателю Технического управляющего совета, **г-ну Robert Shaw** в знак признательности за его выдающуюся добровольную работу в качестве Председателя Комиссии XV Проектирование, анализ и изготовление сварных конструкций в течение девяти лет.

Президент МИС проф. Gary Marquis объявил получателей стипендий за 2015 г.:

- **проф. др.-инж. Cetin Morris Sonsino**
- **проф. Chitoshi Miki**
- **др. Thomas Siewert**
- **проф. др. Takashi Miyata**
- **проф. Pingsha Dong**

Официальная передача флага МИС обществу-члену, принимающему следующую Ежегодную Ассамблею МИС, является важной и эмоциональной частью банкета и церемонии за-

крытия. **Г-н John Barnett**, Президент и **г-н Geoff Crittenden**, Главный исполнительный директор Института сварочной технологии (Австралия) WTIA, представляли оргкомитет 69-й Ежегодной Ассамблеи МИС и Международной конференции, которая состоится в Мельбурне, Австралия. Они приняли флаг от **г-на Jouko Lassila**, Исполнительного директора и **г-на Juha Kaupila**, менеджера по обучению и квалификации СОФ, и пригласил всех членов семьи МИС присоединиться к ним на конференции «Down Under» в 2016 г.

Будущие Ежегодные Ассамблеи МИС будут проходить

2016: Мельбурн (Австралия), 10–15 июля

2017: Шанхай (КНР), 25–30 июня

2018: Стамбул (Турция)

2019: Братислава (Словакия)

Будущие международные конгрессы и связанные с МИС события

Год	Место	Дата	Мероприятие
2016	Галле, Германия	20–21 апреля	Связанное с МИС событие 10-я Международная конференция по лучевым технологиям
	Хайдарабад, Индия	22–24 апреля	Событие МИС SG-RES 6-й Коллоквиум МИС по сварочным исследованиям и сотрудничеству
	Галле, Германия	11–12 мая	Связанное с МИС событие 4-я Европейская конференция «Join-Trans 2016»
	Хихон, Испания	17–19 мая	Связанное с МИС событие 3-й Международный Конгресс по сварке & 21-я конференция по соединению материалов
	Париж, Франция	13–15 сентября	Связанное с МИС событие ESOPE 2016 «Строительство и ресурс оборудования, работающего под давлением: глобальные проблемы»
2017	Мец, Франция	15–17 мая	Международный конгресс МИС «Сварка, аддитивное производство и сопутствующий НК»
	Ченнаи, Индия	7–9 декабря	Международный конгресс МИС 4-й Международный конгресс МИС

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕМИНАР «TPS/I ROBOTICS — РОБОТИЗАЦИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ. НОВЫЕ РЕШЕНИЯ ОТ FRONIUS»

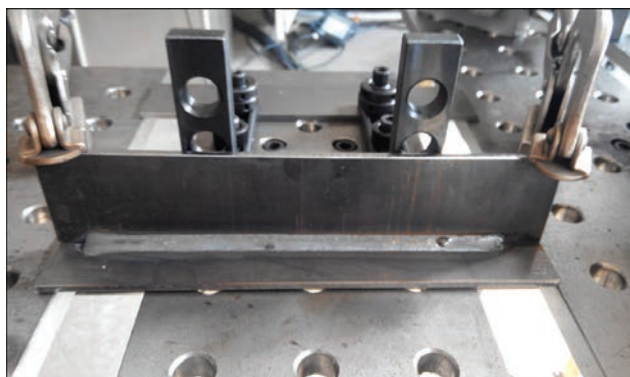
17 сентября 2015 г. в селе Княжичи Киевской области в Технологическом центре ООО «Фрониус Украина» состоялся технический семинар «TPS/i Robotics — роботизация сварочных процессов. Новые решения от Fronius». Семинар посетили более 40 представителей различных предприятий Украины. Вниманию участников семинара были представлены доклады и презентации на следующие темы:

- ♦ мировые тенденции в развитии роботизированной сварки; TPS/i Robotics — интеллектуальная роботизированная система, неограниченные возможности TPS/i и их соответствие последним тенденциям в роботизированной сварке;

- ♦ PMC/LSC — инновационные процессы от Fronius;



Демонстрация сварочных процессов PMC/LSC



Угловой шов, сварочный процесс PMC. Преимущества: высокая скорость сварки с неизменно высоким качеством шва



Сварка по зазору, корневой проход сварочный процесс LSC Root (положение PG), заполняющий — PMC-MIX (без колебаний, положение PF). Преимущества: стабилизация длины дуги, отсутствие брызг, высокая стабильность сварочной дуги



Вертикальный шов, сварка снизу-вверх (PF), сварочный процесс LSC Universal. Преимущества: стабилизация длины дуги и проплавления, отсутствие брызг, высокая стабильность процесса

- ♦ TPS/i Robotics — новое поколение роботизированных сварочных горелок Robacta Drive (новый уровень сервисного обслуживания от Fronius);

- ♦ сварочные системы TIG/PLASMA для роботизированной сварки и др.

Наибольший интерес у участников семинара вызвали презентации TPS/i Robotics — интеллектуальная роботизированная система и PMC/LSC — инновационные процессы

от Fronius. Помимо теоретической части участники семинара на практике ознакомились с неограниченными возможностями сварочной системы TPS/i Robotics и убедились в больших преимуществах новых сварочных процессов LSC (Low Spatter Control) и PMC (Pulse Multi Control).

Следующий семинар, под названием «Роботизация сварочных процессов. Новые решения от Fronius» состоится в сентябре 2016 г. Организаторы приглашают всех интересующихся инновационными сварочными технологиями Fronius принять в нем участие.

В.Л. Бондаренко



ОТЧЕТНО-ВЫБОРНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ОБЩЕСТВА СВАРЩИКОВ УКРАИНЫ

25 ноября 2015 г. состоялась очередная (VI) отчетно-выборная конференция Общества сварщиков Украины (ОСУ). На ней присутствовали полномочные представители большинства отделений Общества, ведущие специалисты ряда промышленных предприятий, научные сотрудники ИЭС им. Патона (всего в работе конференции участвовало 48 делегатов).

С отчетом о работе Совета Общества за период 2011–2015 гг. выступил президент ОСУ В.Г. Фартушный. В докладе был дан анализ современного состояния сварочного производства Украины, представлены основные направления деятельности Общества и перспективы его развития. Рассматривая приоритетные направления деятельности ОСУ, докладчик отметил, что дальнейшее совершенствование отечественного производства должно базироваться на требованиях международных нормативов по аттестации и сертификации всех составляющих производства — материалов, оборудования, технологий и персонала. В связи с этим чрезвычайно большое значение имеет стандартизация в области сварки и родственных процессов, введение в действие национальных стандартов, гармонизированных с международными и европейскими.

В отчетном периоде Совет общества серьезное внимание уделил развитию конкурсного движения как в Украине, так и участию наших сварщиков в международных конкурсах: конкурс молодых сварщиков в Чехии, конкурс сварщиков-профессионалов в Китае. В этом большая заслуга Одесского областного общества сварщиков (председатель А.Н. Воробьев) и Одесского инженерно-аттестационного центра «Прометей» (директор В.Е. Гладков), на базе которого проведено большинство республиканских конкурсов.

ОСУ принимало также активное участие в организации и проведении научно-технических конференций и семинаров, специализированных выставок как республиканского, так и регионального уровня. Уже традицией стало проведение в рамках сварочных выставок конкурсов профессионального мастерства сварщиков. Анализируя состояние организационной деятельности Совета ОСУ, докладчик отметил необходимость внесения ряда изменений в Устав Общества и приведение его в соответствие с новым Законом «Об общественных организациях».

С отчетом о работе ревизионной комиссии выступил председатель комиссии А.Н. Воробьев. В прениях по докладам и дискуссии выступили Н.В. Высоколян, А.Р. Дзюбик, А.Б. Малый, А.Н. Во-

робьев, А.Н. Алимов, П.П. Проценко, В.И. Дегтярь, В.Д. Позняков, А.М. Костин, А.А. Клименко, К.А. Ющенко, А.А. Мазур. Острую дискуссию вызвал вопрос о состоянии подготовки сварщиков в профтехучилищах и колледжах. Участники конференции поддержали предложение директора МУАЦ ИЭС им. Е.О. Патона Проценко П.П. о создании при ОСУ отраслевого Совета по разработке профессиональных стандартов и профессиональных квалификаций персонала сварочного производства. Были внесены и ряд других предложений по активизации деятельности Общества.

На конференции избран новый состав Совета Общества в количестве 23 человек. Президентом ОСУ избран В.Г. Фартушный, вице-президентом — С.Ю. Максимов (зав. отделом ИЭС им. Е.О. Патона) и П.П. Проценко (директор МУАЦ ИЭС им. Е.О. Патона), исполнительным директором — В.М. Илюшено (вед. научн. сотрудник ИЭС им. Е.О. Патона).

Членами Совета избраны: А.А. Абрамов, председатель Хмельницкого обл. отдел. ОСУ; А.Н. Алимов, технич. директор ООО «Витаполис»; В.А. Белинский, председатель Донецкого обл. отдел. ОСУ; Ю.В. Бутенко, главный сварщик НПКиГ «Зоря» — «Машпроект»; О.Г. Быковский, председатель Запорожского обл. отдел. ОСУ; А.Н. Воробьев, председатель Одесского ООСУ; Н.В. Высоколян, председатель Полтавского обл. отдел. ОСУ; А.Р. Дзюбик, зам. председателя Западного отдел. ОСУ; А.Г. Кантор, нач. сварочной лаборатории ПАО «Турбоатом»; А.И. Комисар, генеральный директор ООО «Фрониус Украина»; А.М. Костин, председатель Николаевского обл. отдел. ОСУ; М.А. Лактионов, председатель Сумского обл. отдел. ОСУ; Я.И. Микитин, председатель Херсонского обл. отдел. ОСУ; С.В. Олексиенко, председатель Черниговского обл. отдел. ОСУ; Ю.Н. Омельчук, технич. директор ПАО «ПлазмаТек»; В.В. Перемитько, председатель Днепропетровского обл. отдел. ОСУ; В.Н. Проскудин, зам. генерального директора НТК «ИЭС им. Е.О. Патона»; В.В. Рогожинский, председатель Житомирского обл. отдел. ОСУ; А.А. Сливинский, доцент кафедры сварочного производства НТУУ «КПИ».

Участники конференции приняли решение, определяющее программу деятельности Общества на следующий отчетный период.

В.М. Илюшенко,
исполнительный директор ОСУ



В грудні виповнилось 80 років відомому вченому в галузі технології зварювання та зварювального матеріалознавства, доктору технічних наук, академіку НАН України, професору, заслуженому діячу науки і техніки України, лауреату Державної премії СРСР, Премії РМ СРСР, Премії

ім. Є.О. Патона, заступнику директора з наукової роботи Інститута електрозварювання ім. Є.О. Патона Костянтину Андрійовичу Ющенку.

К.А. Ющенко працює в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України з 1958 р. Основний напрямок його наукової діяльності — нові металічні матеріали, процеси їх одержання та обробки поверхні, технологія зварювання. Наукова діяльність К.А. Ющенка пов'язана із створенням добрезварюваних сталей та сплавів, зокрема таких, що використовуються в агресивних середовищах, умовах випромінювання, при криогенних та високих температурах, розробкою теоретичних основ їх зварювання.

У 1962–1965 рр. ним було виконано цикл робіт по теорії зварювання сталей феритно-аустенітного класу. Було встановлено закономірності змінування фізико-механічних та корозійних властивостей металу з багатокомпонентним фазовим складом. Вивчення мікропроцесів вибіркового електрохімічного розчинення фаз дозволило встановити взаємозв'язок між ступенем їх легування в активних середовищах. Це стало основою для розробки нових систем економнолегованих нікелем сталей та швів, створення зварювальних матеріалів і процесів, які забезпечують їх широке використання в хімічному машинобудуванні. Виконані дослідження узагальнені К.А. Ющенком у кандидатській дисертації (1965 р.).

У 1965–2005 рр. К.А. Ющенко очолює в ІЄЗ дослідження по створенню нових конструкційних зварюваних сталей та сплавів для криогенної техніки, нових технологій по інженерії поверхні.

Однією з найважливіших проблем світового рівня є оптимізація складу сталі і шва, виходячи з вимог високої питомої міцності, стійкості проти скрихнення за різних умов навантаження в інтервалі 4,2...293 К, в тому числі при дії сильних магнітних полів, радіаційного випромінювання, термоциклів. Проведені К.А. Ющенком дослідження, поряд з теоретичними роботами, дозволили створити гаму нових добрезварюваних ста-

лей для криогенної техніки, а також зварювальних матеріалів і процесів. Це стало основою для розвитку нового наукового напрямку — зварювального криогенного матеріалознавства, яке одержало визнання і розвиток не тільки в країнах СНД, але й за кордоном.

К.А. Ющенко із співробітниками виконано великий цикл робіт по оціненню конструкційної міцності зварних з'єднань при криогенних температурах. Теоретичні дослідження були реалізовані при створенні методів розрахунку і норм проектування конструкцій, прийнятих в Україні, Росії та інших країнах.

Понад 80 нових марок сталей, зварювальних дротів, флюсів, технологій, створених під керівництвом і за участю К.А. Ющенко, використовуються у вітчизняному криогенному машинобудуванні. Їх використання реалізовано в новітніх великих національних проектах, таких, як «Буран» (стартовий комплекс), «Токамак-7», «Токамак-15» (силова надпровідна магнітна система), великі імітатори космосу, МГД-генератори, пристрої життєзабезпечення та бортові двигуни космічних систем, нове покоління газотурбінних двигунів. Нові сталі та матеріали, розроблені К.А. Ющенко, включені як кандидатні при створенні міжнародного термоядерного реактору «ІТЕР» і магнітної системи установки «Стеларатор». В останні роки розроблено і освоєно заводами Дніпроспецсталь, НКМЗ і Запоріжсталь промисловою технологією виробництва товстолистового прокату великих поковок (масою до 20 т) стабільноаустенітної сталі для здійснення будівництва прототипу реактора з керованим термоядерним синтезом.

Наукові дослідження та технологічні розробки у галузі криогенного матеріалознавства узагальнено К.А. Ющенко у докторській дисертації (1982 р.).

Розвиваючи теоретичні роботи по матеріалам для зварювання високолегованих сталей, К.А. Ющенко у 1985 р. розробив нові положення та ідеї щодо процесів, які викликають утворення тріщин у швах при кристалізації та повторних нагріваннях. Теоретично обгрунтовано та експериментально підтверджено роль дислокаційних і сегрегаційних процесів у верхньому та нижньому інтервалах крихкості на утворення тріщин. Одержані дані реалізовано при створенні нових оригінальних систем легування швів та матеріалів електродних дротів, які знайшли застосування при зварюванні спеціальних сплавів на основі нікеля.

В останні роки К.А. Ющенко із співробітниками на основі дослідження процесів скрихнення високохромистих сталей з ОЦК-структурою системи Fe-20Cr запропонував керувати сегре-



гаційними явищами при рекристалізації металу за рахунок контрольованого диспергування домішок в зерні. Ці роботи відкрили перспективний напрямок у розробці технологічних безнікелевих корозійностійких високохромистих феритних сталей, що дозволило запропонувати гаму добре зварюваних сталей масового призначення. Нові сталі типу 04X19AФТ з нітрідно-ванадієвим дисперсійним мікролегуванням, освоєні металургійними виробництвами, знайшли широке застосування у промисловості.

Одним із значних наукових досягнень є створення К.А. Ющенко із співробітниками теорії зварювання високолегованих сталей із понадрівноважним вмістом азоту. Цикл робіт дозволив обґрунтувати принципи одержання якісних з'єднань металів нового класу із понадрівновісним легуванням газами. Дослідження з кінетики деазотації дозволили встановити умови існування квазірівновісних станів у приграничних зонах металу, що кристалізується, роль фазових змін металу в системі «рідина–газ». Вперше у світовій практиці розроблено матеріали та процеси, що дозволяють зварювати метал із понадрівновісним вмістом азоту до 1 %.

У 1990–1995 рр. К.А. Ющенко виконано цикл робіт по зварюванню кераміки та кераміки з металом. Досліджено процеси взаємодії оксидної, боридної та нітрідної кераміки з металізованою плазмою в умовах прикладення високоенергетичних імпульсних навантажень. Теоретично обґрунтовано можливість одержання якісних нерознімних з'єднань різних видів кераміки. Одержано унікальні характеристики міцності з'єднань кераміки на основі карбіду кремнію при температурах понад 1800 °С.

У 1986–2015 рр. К.А. Ющенко бере участь у роботах по створенню нових матеріалів та процесів щодо обробки поверхні та нанесення покриттів. Він провадить дослідження по створенню і використанню спеціальних порошкових дротів для стійкого проти зносу та корозійностійкого наплавлення, нових видів дротів та порошків на основі тугоплавких матеріалів, розробці нових композицій сплавів з аморфною структурою. Нові матеріали та процеси знайшли використання у промисловості, багато з яких є оригінальними та запатентовані. До них відносяться нові технологічні процеси, такі як карбованадування, плазмо-детонаційна обробка, мікроплазмове наплавлення і напилення.

У 1980 р. за роботи по створенню спеціалізованих комплексів для металургійного виробництва

К.А. Ющенко присуджено Премію Ради Міністрів СРСР. У 1983 р. — Премію ім. Є.О. Патона НАН України за роботи з криогенного матеріалознавства. У 1985 р. К.А. Ющенка удостоєно Державної премії СРСР за створення нових сталей та сплавів.

К.А. Ющенко — автор більш, як 900 друкованих робіт та винаходів, серед яких 5 монографій, 1 довідник. Багато років він очолює один із провідних відділів Інституту електрозварювання. Під керівництвом К.А. Ющенко підготовлено понад 40 кандидатських та 6 докторських дисертацій. К.А. Ющенко веде велику науково-організаційну діяльність. У 1989 р. його обрано віце-президентом Міжнародного інституту зварювання. З 1986 по 1992 рр. він — заступник голови Національного комітету СРСР по зварюванню. З 1993 р. — голова Національного комітету по зварюванню України. К.А. Ющенко — науковий керівник проблеми «Газотермічні та вакуумні покриття...», Комплексної програми науково-технічного прогресу країн РЕВ, з 1990 р. — керівник напрямку «Нерознімні з'єднання та покриття», програми «Нові речовини та матеріали». Очолює секцію по покриттям науково-технічної ради по одержанню та обробці нових матеріалів, член Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України (1983–2015 рр.), член Спеціалізованої ради по захисту дисертацій при Інституті електрозварювання, член редколегії журналу «Автоматическая сварка». К.А. Ющенко є виконавчим директором київського відділення Американського міжнародного товариства по матеріалам (ASM International) та членом керівної ради Європейського відділення цього товариства по матеріалам, членом технічного комітету та головою спеціального комітету Міжнародного інституту зварювання по з'єднанням та покриттям перспективних матеріалів в авіаційній техніці. Керував виконанням робіт ряду міжнародних європейських проектів по матеріалам та технологіям у галузі покриттів (ІНТАС, БРАЙТ, ТАСІС).

К.А. Ющенка нагороджено Почесною Грамотою Верховної Ради УРСР, орденом Дружби народів, орденом князя Ярослава Мудрого V ступеня, медалями. У 2001 р. йому присуджено звання Заслужений діяч науки і техніки України.

З 2005 р. очолює роботи по створенню технологій і обладнання для зварювання і ремонту авіаційних двигунів спеціального призначення. Нові розробки і обладнання використовуються на авіаційних підприємствах України.

Машины для контактной стыковой сварки ленточных пил, прутков, проволок и стержней

Контактная стыковая сварка ленточных пил имеет свои особенности, связанные с геометрической формой поперечного сечения пилы (ширина значительно больше толщины). При сварке сопротивлением случайный характер расположения участков контактирования в стыке и обусловленная этим неравномерность нагрева таких сечений является большой проблемой. Тепло, выделяемое на участках контактирования, вызывает в них быстрое повышение температуры, которая сохраняется и после исчезновения контактного сопротивления до конца цикла сварки. Это приводит к перегреву металла на данных участках со всеми вытекающими последствиями — ростом зерен, скоплением примесей по границам зерен и др. Пластические и прочностные свойства металла данной зоны снижаются и улучшить их высоким отпуском, применяемым в контактных машинах, невозможно. Кроме того, большая плотность тока, необходимая для нагрева сопротивлением (значительно большая, чем при нагреве оплавлением) приводит к выплескам металла при нагреве и образованию оксидов в зоне соединения. Поэтому сварные соединения ленточных пил, полученные контактной стыковой сваркой сопротивлением, не имеют высокого, а главное, стабильного качества. При сварке ленточных пил оплавлением единичные контакты в зоне оплавления равномерно распределены по всему поперечному сечению стыка, что обеспечивает его равномерный нагрев и получение более стабильных свойств сварных соединений.

Для контактной стыковой сварки ленточных пил мировой промышленностью выпускаются машины как для сварки сопротивлением, так и оплавлением.

Машины для сварки сопротивлением всех производителей (FULGOR, GRIGGIO, IDEAL) устроены практически одинаково и удовлетворительно справляются со сваркой пил шириной до 20 мм. Для повышения спроса их технологические возможности были расширены путем доработки зажимов для установки лент шириной 40, а в некоторых машинах и до 60 мм. В данной ситуации речи о стабильной и надежной сварке нет.

Машины для контактной стыковой сварки оплавлением ленточных пил, предлагаемые на рынке, IDEAL BAS-050, IDEAL BAS-060 и др. (Германия), FULGOR FW400, (Италия), FL50 (Китай) выполнены по традиционной однотипной схеме и отличаются друг от друга, в основном, мощностью и внешним видом. Машины украинских производителей Г-22 и облагороженная внешне, но ухудшенная по содержанию и жесткости конструкции ее копия MC4 — тяжелые, ненадежные, не отвечающие настоящему времени конструкции.

Наиболее удачными и, соответственно, популярными, являются машины фирмы «IDEAL». Машины могут комплектоваться пирометрами, позволяют получать стабильное качество сварки. Для этого производитель рекомендует снимать токоподводящие губки с машины и производить их шлифовку каждые 10...20 сварок (в зависимости от ширины свариваемых лент). Для этого требуется наличие шлифовального станка, что, по понятным причинам, затратно.

Процесс оплавления сопровождается выделением большого количества частиц металла в виде брызг и аэрозоля. Поэтому во всех сварочных машинах чрезвычайно уязвимы подшипники каретки подвижного зажима и контактные поверхности зажимов.

Существенный ресурс повышения качества сварных соединений ленточных пил при контактной стыковой сварке оплавлением — это увеличение скорости закрытия искрового зазора. Увеличение скорости уменьшит окисление расплавленного металла, повысит скорость деформации зоны соединения и обеспечит получение более мелкозернистой структуры металла шва. Однако существенно увеличить скорость осадки при сварке на существующем оборудовании затруднительно, так как большие усилия осадки приводят к потере устойчивости торцов лент, а большие инерционные массы подвижных зажимов определены конструкциями машин и не могут быть изменены. Особенно мала скорость осадки при сварке сечений, которые являются минимальными для сварочной машины, о чем традиционно свидетельствует низкое качество сварки получаемых соединений. При сварке пружинных и быстрорежущих сталей, из которых изготовлены биметаллические пилы, повышение скорости осадки также крайне желательно, поскольку известно, что получить стабильное качество сварки биметаллической пилы на существующих машинах задача трудная.

При сварке оплавлением для обеспечения устойчивого оплавления применяют трансформаторы с трех-пятикратным запасом мощности. При большой мощности даже кратковременный срыв оплавления с переходом на нагрев сопротивлением (кратковременное короткое замыкание) приводит к резкому увеличению тока в свариваемых деталях и к перегреву металла в зоне соединения. Это обусловлено тем, что напряжения, необходимые для устойчивого оплавления, приблизительно в 1,5 раза выше, чем напряжения, необходимые для нагрева сопротивлением. Поэтому разработка новых сварочных машин с меньшим запасом электрической мощности, обеспечивающих высокое и стабильное качество соединений, весьма актуальна.

Основной недостаток устройства практически всех ручных зажимов стыкосварочных машин состоит в том, что они не раскрываются полностью после каждой сварки для очистки токоподводящих электродов, а усилие зажатия в них не контролируется. Усилие зажатия тонких и узких лент следует уменьшать, так как при зажатии узких лент пила может деформировать токоподводящий электрод. Кроме того, нет необходимости в сильном зажатии, поскольку усилие осадки мало и вероятность проскальзывания пилы в зажимах машины также мала. В связи с этим, целесообразна разработка конструкции зажимов, в которых будут решены выше указанные проблемы.

Контроль качества соединений ленточных пил, прутков и проволок — важная часть технологии сварки. Контроль проводится, в основном, внешним осмотром и испытанием на количество перегибов на 180°. Испытания на количество перегибов позволяют оценивать как прочностные, так и пластические свойства сварных соединений, но дают лишь консультативную информацию. Такие испытания проводятся после каждой переналадки машины на другой режим сварки. Поэтому крайне желательно иметь параметр, по которому возможно оценить качество полученного соединения без его разрушения. Таким параметром может являться величина деформации стыка при осадке. При малой величине осадки в зоне соединения наблюдаются оксидные пленки и непровары, большая величина может свидетельствовать о перегреве металла. Поэтому представляет интерес разработка метода контроля величины осадки.

Для достижения поставленной цели — разработки новых сварочных машин, лишенных выше перечисленных недостатков, были решены следующие задачи:

- ♦ уменьшены массы подвижных частей машины, что улучшило качество сварки сечений, которые являются минимальными для сварочной машины;
- ♦ подвижная каретка сконструирована таким образом, что не имеет трущихся частей — направляющих, подшипников и других традиционных элементов и связей. Она подвешена в пространстве на пружинах, обеспечивающих жесткость в вертикальном и гибкость в горизонтальном направлениях при движении каретки. Благодаря такой конструкции отпала необходимость в обслуживании каретки в процессе эксплуатации машины;
- ♦ трансформатор сконструирован с учетом обеспечения устойчивого оплавления при минимальном запасе мощности, потери мощности от магнитных потоков рассеяния сведены к минимуму;
- ♦ предложен подход к оценке качества получаемых сварных соединений по величине осадки. В версии машины с микропроцессорным управлением измеряется и отображается на дисплее реальное значение полученной осадки;
- ♦ разработаны зажимы с симметричным расположением лент по отношению к оси сварочного трансформатора (обеспечивают равномерный нагрев лент, поскольку электромагнитное поле трансформатора не смещает линии тока). Конструкция зажимов обеспечивает доступ к токоподводящим электродам после каждой сварки, контролируемое усилие прижатия ленты пропорциональное ее толщине, легкую и понятную настройку равномерного распределения усилия прижима (и, соответственно, равномерного нагрева) по ширине ленты. Шлифовка электродов осуществляется без их снятия со сварочной машины.

Технические данные машин для контактной стыковой сварки оплавлением «Чайка» приведены ниже.

Разработанное оборудование запатентовано, имеет высокую надежность и обеспечивает стабильное качество сварных соединений как ленточных пил, так и прутков, и проволок.

Сегодня производятся две новые модели сварочных машин. Первая машина — с ручным взводом и с гидравлическим приводом оплавления, вторая — полностью автоматическая с электрическим

Технические характеристики машин для контактной стыковой сварки оплавлением «Чайка»

Параметры	«ЧАЙКА» МКССО-40	«ЧАЙКА» МКССО-60
Первичное напряжение сети, В	380	380
Максимальный первичный ток (при сварке), А	10	15
Ширина/толщина свариваемых лент, мм	10...40	20...60
	0,6...1,3	0,7...1,3
Диаметры свариваемых проволок и стержней из низкоуглеродистых сталей, мм	1,0...8,0	1,5...9,0
Количество сварок (лент) в час	30...40	30...40
Время сварки, с	0,9...2,0	1,0...2,0
Напряжение сварки, В	2,8...3,2	2,8...3,4
Охлаждение	Водяное, автономное	Водяное, автономное
Усилие осадки, Н	200...400	200...800
Регулировка термообработки	Ручная	Ручная/Автоматическая
Габаритные размеры, мм	250×500×400	250×500×400
Масса, кг	85	85

приводом оплавления, управляемая микроконтроллером. Управление машинами осуществляется одним рычагом либо джойстиком (нет кнопок управления).

В первой модели применен разработанный гидравлический привод оплавления с саморегулированием скорости оплавления [5]. Саморегулирование осуществляется следующим образом. При срыве оплавления по какой-либо причине (окисленные торцы, падение напряжения сети и т.д.) нагрев лент переходит из процесса оплавления в процесс нагрева сопротивлением. При этом твердые слои металла оплавляемых торцов соприкасаются (опираются друг о друга) и давление жидкости в гидроцилиндре уменьшается. Скорость перемещения поршня снижается и, соответственно, скорость оплавления автоматически уменьшается. Машина выходит из кризиса (стабилизируется оплавление) без потери качества сварного соединения. Особенностью машины является то, что время сварки не постоянно вследствие саморегуляции скорости оплавления. Для контроля времени сварки предусмотрена индикация.

Вторая модель сварочной машины автоматизирована и управляется микроконтроллером. Это упростило конструкцию механической части машины и выбор оптимального ускорения при оплавлении, времени сварки и точного дозирования тепловыделения при осадке. Последнее обеспечивается путем строгого дозирования количества импульсов тока и их мощности, проходящих через стык после включения осадки. Для оценки качества получаемых соединений после каждой сварки производится измерение реальной величины осадки и ее значение отображается на дисплее.

На машине установлены разработанные зажимы, которые раскрываются полностью после каждой сварки для очистки контактных поверхностей верхних губок и токоподводящих электродов (рис. 1). В данных зажимах независимо от усилия на кулачке, закрывающего зажим, усилие прижатия ленты верхней губкой к электроду пропорционально толщине зажимаемой ленты.

Равномерное распределение усилия прижима по ширине ленты и, соответственно, равномерный нагрев обеспечиваются предварительной установкой на шкале зажима значения толщины свариваемой ленты.

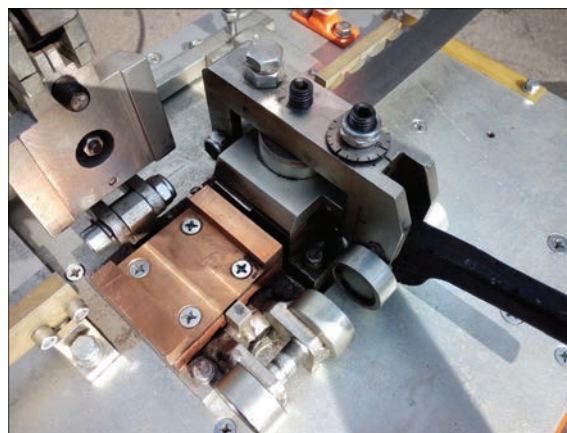


Рис. 1. Зажимы сварочной машины

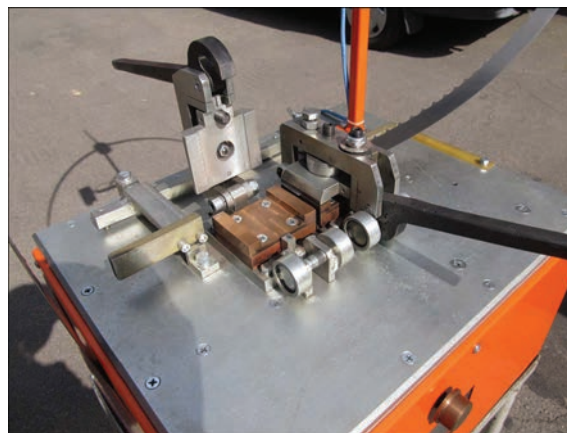


Рис. 2. Упорная рамка пилы



Рис. 3. Блок-схема машины с микроконтроллерной системой управления

Благодаря специально разработанному алгоритму управление сварочной машиной осуществляется одним четырехпозиционным джойстиком, которым выполняется как выбор предварительных настроек сварки, так и запуск самой сварки и термообработки. Упорная рамка, регулирующая свес зуба из зажимов машины и обеспечивающая прямолинейную сварку лент, выполнена общей для двух зажимов, имеет облегченную настройку и допускает поддержку пилы как по зубу, так и по «спине» (рис. 2).

Программное обеспечение сварочного аппарата позволяет обновление встроенной программы самим пользователем, что дает возможность оперативно отреагировать на просьбы оператора по корректировке алгоритма работы. Многоязыковый интерфейс облегчает использование машины в различных странах. Блок-схема работы машины с электронным управлением представлена на рис. 3.

Микроконтроллерная система управления позволяет облегчить работу благодаря пошаговым подсказкам, высвечивающимся на дисплее. Оператору остается только выбрать по программе тип свариваемой пилы, установить ее в зажимы и наклонить джойстик в положение «СВАРКА». Далее машина автоматически выполнит процесс сварки. По окончании сварки автоматически производится измерение величины осадки полученного сварного соединения. Измеренное значение выводится на дисплей. После сварки по пошаговым инструкциям на дисплее осуществляется термообработка сварного шва. Автоматический

процесс термообработки происходит без участия оператора. Температура сварного шва контролируется с помощью пирометра по программе микроконтроллера сварочной машины. В случае использования ручного режима термообработки оператору требуется самостоятельно регулировать нагрев стыка джойстиком, ориентируясь визуально по яркости свечения раскаленного металла. Предлагается 20 предустановленных режимов сварки и термообработки разнообразных пил, ножей и лобзиков.

Машина с микроконтроллерной системой управления характеризуется очень широкими возможностями по установке, регулировке и выполнению параметров сварки со стабилизацией тепловыделения в стыке при осадке. Для ее использования не требуется специального обучения оператора-сварщика.

В заключение следует отметить, что представленные машины для контактной стыковой сварки имеют следующие эксплуатационные преимущества: каретка не имеет трущихся частей (нет подшипников) и не требует обслуживания в процессе эксплуатации, обеспечивается контролируемое усилие прижатия ленты, равномерный нагрев по ширине, стабилизация тепловыделения в стыке при осадке, автоматическая термообработка, полный доступ к электродам после каждой сварки, высокое и стабильное качество сварки, в том числе и малых сечений, оценка качества получаемых сварных соединений без их разрушения.

Д.В. Чайка (НТУУ «Киевский политехнический институт»),
В.Г. Чайка (ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ),
С.П. Крушневич (Институт газа НАНУ),
Б.И. Волохатюк (ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ),
А.А. Хатаян (Фирма «RELEMA», Литва)



**Межотраслевой учебно-аттестационный центр
Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины**



Программы профессиональной подготовки на 2016 г.

Шифр курса	Наименование программы		Продолжительность	Сроки проведения		
1. Повышение квалификации инженерно-технических работников (с аттестацией на право технического руководства сварочными работами при изготовлении сварных конструкций в т.ч. подведомственных государственным надзорным органам)						
101	Техническое руководство сварочными работами на объектах, за которыми осуществляется государственный надзор		подготовка и аттестация	3 недели (112 ч)	апрель	
102			переаттестация	18 ч	март, апрель, июнь, октябрь, ноябрь	
103	Расширение области аттестации руководителей сварочных работ			6 ч	апрель, ноябрь	
104	Техническое руководство сварочно-монтажными работами при строительстве и ремонте газопроводов из полиэтиленовых труб		подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	по мере комплектования групп	
105			переаттестация	1 неделя (32 ч)		
106	Техническое руководство сварочными работами при ремонте действующих трубопроводов (под давлением)		подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)		
107			переаттестация	22 ч		
109	Техническое руководство работами по контактной стыковой сварке железнодорожных рельсов.			72 ч	март	
111	Подготовка и аттестация председателей комиссий по аттестации сварщиков - экспертов Украинского аттестационного комитета сварщиков (УАКС)			3 недели (112 ч)	октябрь	
112	Расширение области аттестации председателей комиссий по аттестации сварщиков – экспертов УАКС			8 ч	май, октябрь	
113	Подготовка и аттестация членов комиссий по аттестации сварщиков:	специалистов технологических служб, отвечающих за организацию аттестации сварщиков	2 недели (72 ч)	ноябрь		
114		специалистов служб технического контроля, отвечающих за контроль сварных соединений (включая специальную подготовку к аттестации по визуально-оптическому методу контроля)	2 недели (74 ч)	по мере комплектования групп		
115		специалистов служб охраны труда предприятий	2 недели (74 ч)			
116	Расширение области аттестации членов комиссий по аттестации сварщиков – специалистов технологических служб по сварке			6 ч	ноябрь	
117	Подтверждение полномочий (переаттестация) председателей комиссий по аттестации сварщиков - экспертов УАКС:		со стажем 3 года	32 ч	декабрь	
118			со стажем 6 и более лет	20 ч	январь - март, май, июль, сентябрь - декабрь	
119	Подтверждение полномочий (переаттестация) членов комиссий по аттестации сварщиков:	специалистов технологических служб по сварке:	со стажем 3 года	32 ч	декабрь	
120			со стажем 6 и более лет	20 ч	февраль, март, май, июнь, сентябрь, октябрь	
121		специалистов по техническому контролю		16 ч	февраль, май, июль, октябрь	
122		специалистов по техническому контролю (включая спец. подготовку к аттестации по визуально-оптическому методу контроля)		36 ч		
123		специалистов по охране труда		16 ч		
130		Переподготовка специалистов сварочного производства по программам Международного института сварки с присвоением квалификации:	Международный инженер по сварке		453 / 126 ч ¹	по мере комплектования групп
132			Международный технолог по сварке		372 / 91 ч ¹	
134			Международный специалист по сварке		248 / 60 ч ¹	
135	Международный практик по сварке		114			
136	Международный инспектор по сварке		полного уровня	230 ч		
137			стандартного уровня	170 ч		
138			базового уровня	115 ч		
139, 149			для специалистов, которые имеют квалификацию «Международный инженер / технолог по сварке»		76/ 78	
141	Металлографические исследования металлов и сварных соединений		специальная подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	июль	
142			переаттестация	22 ч	апрель, июль	
143	Физико-механические испытания материалов и сварных соединений		специальная подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	апрель	
144			переаттестация	20 ч	февраль, май, июнь, июль	
145	Эмиссионный спектральный анализ (стилоскопирование) металлов и сплавов		специальная подготовка и аттестация	2 недели (74 ч)	по мере комплектования групп	
146			переаттестация	22 ч		
147	Повышение квалификации руководителей и специалистов рельсосварочных поездов			36 ч	июнь	
151	Производство сварочных материалов: организация, технологии и системы управления качеством			2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком	
152	Ремонт, восстановление и упрочнение изношенных деталей методами наплавки					
153	Технологические процессы и обеспечение качества в авиастроении					

Тематические семинары (возможно проведение на территории заказчика)			
161	Состояние нормативно-технической документации в области сварочного производства, тенденции и перспективы	2 дня (16 ч)	март, июнь
162	Обеспечение качества сварки. Требования национальных и международных стандартов	2 дня (16 ч)	апрель, июнь, октябрь
163	Проектирование металлических конструкций по ЕВРОКОДАМ	24 ч	февраль

2. Повышение квалификации педагогических работников системы профессионально-технического образования в области сварки

203	Повышение квалификации мастеров (инструкторов) производственного обучения по сварке с присвоением квалификации «Международный практик по сварке (IWP)»	186 ч	по согласованию с заказчиком
204	Повышение квалификации преподавателей специальных дисциплин профессионально-технических учебных заведений по направлению «Сварка» с присвоением квалификации «Международный специалист по сварке»	100 ч	

3. Профессиональная подготовка, переподготовка и повышение квалификации квалифицированных рабочих в области сварки и родственных технологий (с присвоением квалификации в соответствии с национальными и международными требованиями)

Курсовая подготовка СВАРЩИКОВ:

301	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	9 недель (352 ч)	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
302	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (TIG)	5 недель (192 ч)	
303	газовой сварки	3 недели (116 ч)	
304	механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG)	3 недели (112 ч)	
305	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	3 недели (112 ч)	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
306	автоматической дуговой сварки под флюсом / в защитных газах	3 недели (112 ч)	
307	электрошлаковой сварки	3 недели (112 ч)	
308	контактной (прессовой) сварки (рельсов, промышленных и магистральных нефте- и газопроводов)	3 недели (112 ч)	
309	пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб)	5 недель (196 ч)	

Подготовка сварщиков по программам Международного института сварки с присвоением квалификации:

310	Международный сварщик угловых швов (IFW) с аттестацией по EN ISO 9606-1	130 – 210 ч ²	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
312	Международный сварщик плоских соединений (IPW) с аттестацией по EN ISO 9606-1	250 – 380 ч ²	
315	Международный сварщик труб (ITW) с аттестацией по EN ISO 9606-1	360 – 510 ч ²	
318	Международный практик-сварщик (IWP) с аттестацией по EN ISO 9606-1	35 – 153 ч ²	

Переподготовка СВАРЩИКОВ с присвоением квалификации «Международный сварщик (IW)»:

321	угловых швов (IFW) (переподготовка сварщиков 3-го разряда) с аттестацией по EN ISO 9606-1	74 – 118 ч ²	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
322	плоских соединений (IPW) (переподготовка сварщиков 4-го разряда) с аттестацией по EN ISO 9606-1	74 – 112 ч ²	
323	труб (ITW) (переподготовка сварщиков 5 и 6 разрядов) с аттестацией по EN ISO 9606-1	76 – 112 ч ²	

Повышение квалификации СВАРЩИКОВ:

330	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	2 недели (72 ч)	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
331	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах	2 недели (72 ч)	
332	газовой сварки	2 недели (72 ч)	
333	механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG)	2 недели (72 ч)	
334	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком
335	автоматической дуговой сварки под флюсом / в защитных газах	2 недели (72 ч)	
336	электрошлаковой сварки	2 недели (72 ч)	

Курсовая подготовка дефектоскопистов и контролеров:

340	ультразвукового контроля	196 ч	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
341	рентген и гамма контроля	188 ч	
342	магнитного контроля	180 ч	
343	контролеров неразрушающего контроля	196 / 72 ч ³	
345	контролеров сварочных работ	154 ч	

Целевая курсовая подготовка дефектоскопистов для железнодорожного транспорта:

350	магнитного контроля	120 ч	по согласованию с заказчиком
351	ультразвукового контроля	160 ч	
352	по комплексному ультразвуковому контролю колесных пар вагонов	160 ч	

Целевая подготовка и подтверждение квалификации:

362	метализаторов по нанесению упрочняющих и защитных покрытий на металлы	электродуговым напылением	3 недели (112 ч)	по согласованию с заказчиком
363		газопламенным напылением	3 недели (112 ч)	
364		детонационным напылением	3 недели (112 ч)	
365		плазменным напылением	3 недели (112 ч)	
366	специалистов Укрзалізниці по поверхностной закалке колесных пар на установке высокотемпературной закалки УВПЗ - 2М»		72 ч	

4. Аттестация персонала сварочного производства

400	Аттестация руководителей (координаторов) сварочных работ в соответствии с ДСТУ ISO 14731		8 ч	проводится по окончании курсов 101-109
401	Специальная подготовка и аттестация сварщиков в соответствии с правилами Госгорпромнадзора (НПАОП 0.00-1.16-96) и стандартами ДСТУ ISO 9606-1,2,3,4,5, ДСТУ ISO14732		72 ч	постоянно
402	Дополнительная и внеочередная аттестация сварщиков согласно с НПАОП 0.00-1.16-96		24 ч	
403	Периодическая аттестация сварщиков в соответствии с НПАОП 0.00-1.16-96, ДСТУ ISO 9606-1,2,3,4,5		32 ч	
406, 457	Периодическая аттестация сварщиков в соответствии с международными (европейскими) стандартами EN ISO 9606-1		24 ч	
407	Специальная подготовка и аттестация операторов автоматической сварки плавлением в соответствии с стандартом ДСТУ ISO 14732		2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком
411	Специальная подготовка и аттестация сварщиков на допуск к выполнению сварочных работ при ремонте действующих магистральных трубопроводов (под давлением)		3 недели (112 ч)	
412	Периодическая аттестация сварщиков на допуск к выполнению сварочных работ при ремонте действующих магистральных трубопроводов (под давлением)		32 ч	
413	Специальная подготовка и аттестация операторов-сварщиков контактно-стыковой сварки арматуры		2 недели (72 ч)	
414	Аттестация сварщиков пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб)			проводится по окончании курса 309
415	Периодическая аттестация сварщиков пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб)		32 ч	ежеквартально
421	Специальная подготовка дефектоскопистов к сертификации согласно НПАОП 0.00-1.63-13	ультразвуковой контроль	32 / 36 / 64 (I yr) ч ⁴	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
423			40 / 48 / 72 / 80 / 144 (II yr) ч ⁴	
427		радиографический контроль	36 / 40 / 72 (I yr) ч ⁴	
430			40 / 48 / 76 / 80 / 152 (II yr) ч ⁴	
433		визуально-оптический контроль	16 / 20 / 30 (I yr) ч ⁴	
436			20 / 24 / 35 / 40 / 70 (II yr) ч ⁴	
441	Специальная подготовка и аттестация дефектоскопистов по комплексному ультразвуковому контролю колесных пар вагонов (согласно РД 07-09-97)	подготовка и аттестация	76 ч	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
442		переаттестация	36 ч	
448	Переаттестация сварщиков контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов согласно требованиям ДСТУ ISO 14732		32 ч	февраль
454	Специальная подготовка и аттестация газорезчиков	газовой резки	3 недели (112 ч)	по согласованию с заказчиком
455		ручной и механизированной воздушно-плазменной резки	3 недели (112 ч)	

5. Тренинги, тестирование и подтверждение квалификации

501	Профессиональное тестирование и подтверждение квалификации сварщиков ручной и механизированной дуговой сварки	4 – 12 ч ⁵	по согласованию с заказчиком
505	Профессиональное тестирование и подтверждение квалификации сварщиков ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах	4 – 16 ч ⁵	
510	Практические тренинги по различным способам сварки	16 – 32 ч ⁵	

¹ - Продолжительность обучения определяется в зависимости от базовой профессиональной подготовки и опыта работы в сварочном производстве.

² - Продолжительность обучения зависит от специализации.

³ - Длительность программы определяется по результатам входного тестирования.

⁴ - Продолжительность обучения указывается в направлении ОСП (орган по сертификации персонала).

⁵ - Длительность программы зависит от условий и характера испытаний.

По просьбе заказчиков возможно проведение обучения по другим программам, не вошедшим в данный перечень. На период обучения слушателям предоставляется жилье с оплатой за наличный расчет. Стоимость обучения определяется при заключении договора. Для приема на обучение необходимо направить заявку с указанием шифра курса, количества специалистов и почтовых реквизитов предприятия.

Украина, 03150, г. Киев, ул. Боженко, 11 Тел. (044) 456-63-30, 456-10-74, 200-82-80, 200-81-09,
Факс (044) 456-48-94; E-mail: paton_muac@ukr.net, http://muac.kpi.ua

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ ЗА 2015 г.

ПЕРЕДОВИЦА

Евгений Оскарович Патон — выдающийся ученый в области сварки и мостостроения (к 145-летию со дня рождения) № 3–4

Интервью с заместителем директора ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины академиком С.И. Кучуком-Яценко № 8

Интервью с заместителем директора ИЭС им. Е.О. Патона академиком Л.М. Лобановым № 9

Интервью с директором ООО «Фрунзе-электрод» П.Н. Погребным № 1

Интервью с директором ООО «НДТ Системз энд сервисез Украина» В.Л. Найдой № 11

Новый производитель сварочных проволок в Украине № 11

Новости. Разработки ИЭС № 11

ООО «ТМ. ВЕЛТЕК» — стратегия развития № 5–6

Фирма «Плазма-Мастер ЛТД» — по пути инновационного развития № 7

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Ахонин С.В., Белоус В.Ю., Селин Р.В., Петриченко И.К., Вржижевский Э.Л. Структура и свойства сварных соединений высокопрочных двухфазных титановых сплавов, выполненных ЭЛС и ТИГ № 8

Баевич Г.А., Мышковец В.Н., Максименко А.В. Особенности плавления присадки хрома в зависимости от формы импульса лазерного излучения в процессах сварки и наплавки № 2

Белый А.И., Жудра А.П., Росляков А.И., Петров В.В., Лобода П.И. Влияние легирования на физико-механические свойства плавленных карбидов вольфрама № 5–6

Борисов Ю.С., Астахов Е.А., Мурашов А.П., Грищенко А.П., Вигилянская Н.В., Коломыцев М.В. Исследование структуры и свойств газотермических покрытий системы WC–Co–Cr, полученных высокоскоростными методами напыления № 10

Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Коломыцев М.В., Масючок О.П. Сверхзвуковое воздушно-газовое плазменное напыление керметных покрытий системы карбид титана-хрома-нихром № 2

Бушма А.И. Современное состояние гибридной лазерно-плазменной сварки (Обзор) № 8

Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Миленин А.С., Пивторак Н.И. Оценка работоспособности магистрального трубопровода с локальным утонением стенки при ремонте дуговой наплавкой № 1

Гончаров И.А., Галинич В.И., Мищенко Д.Д., Судавцова В.С. Прогнозирование термодинамических свойств расплавов системы $Al_2O_3-SiO_2$ № 1

Гончаров И.А., Галинич В.И., Мищенко Д.Д., Судавцова В.С. Термодинамические свойства расплавов системы $CaO-SiO_2$ № 2

Головки В.В., Степанюк С.Н., Ермоленко Д.Ю. Влияние титаносодержащих инокулянтов на структуру и свойства металла швов высокопрочных низколегированных сталей № 2

Гуляев И.П., Гуляев П.Ю., Коржик В.Н., Долматов А.В., Иордан В.И., Кривцун И.В., Харламов М.Ю., Демьянов А.И. Экспериментальное исследование процесса плазменно-дугового проволочного напыления № 3–4

Дмитрик В.В., Соболев О.В., Погребной М.А., Глушко А.В., Ищенко Г.И. Структурные изменения металла сварных соединений паропроводов в процессе эксплуатации № 12

Дмитрик В.В., Соболев О.В., Погребной М.А., Сыренко Т.А. Особенности деградации металла сварных соединений паропроводов № 7

Квасницкий В.В., Ермолаев Г.В., Матвиенко М.В. Влияние режима охлаждения после диффузионной сварки и пайки на остаточные напряжения в торцевых соединениях графита и меди № 11

Кириян В.И., Кучук-Яценко С.И., Казымов Б.И. О требованиях к ударной вязкости соединений трубопроводов, выполняемых контактной стыковой сваркой оплавлением № 2

Коваленко В.Л., Сидорук В.С. К вопросу оценки стабильности существования дугового разряда при электродуговой сварке № 12

Кравчук М.В., Устинов А.И. Влияние термодинамических и структурных параметров многослойных фольг на характеристики процесса СВС № 8

Кривцун И.В., Крикент И.В., Демченко В.Ф., Райсген У., Забиров А.Ф., Мокров О.А. Взаимодействие излучения CO_2 -лазера с плазмой аргоновой дуги при гибридной (лазер+ТИГ) сварке № 3–4

Кузнецов В.Д. Износостойкая наплавка с вводом в сварочную ванну нанопорошков № 5–6

Кузнецов В.Д., Степанов Д.В. Структура и свойства металла сварного шва, модифицированного наноксидными № 11

Кусков Ю.М., Гордань Г.Н., Еремеева Л.Т., Богайчук И.Л., Кайда Т.В. Влияние магнитно-импульсной обработки присадочных материалов на структуру наплавленного металла № 5–6

Кучук-Яценко С.И., Зяхор И.В., Чернобай С.В., Наконечный А.А., Завертанный М.С. Структура соединений алюминидов титана $\gamma-TiAl$ при контактной стыковой сварке сопротивлением с использованием промежуточных прослоек № 9

Кучук-Яценко С.И., Казымов Б.И., Загадарчук В.Ф., Дидковский А.В. Разработка технологии комбинированного соединения неповоротных стыков толсто-стенных труб из высокопрочных сталей № 10

Кучук-Яценко С.И., Руденко П.М., Гавриш В.С., Гу- щин К.В. Сравнительная оценка энергетических и технологических показателей при контактной сты- ковой сварке непрерывным оплавлением толсто- стенок деталей на постоянном и переменном токе № 1

Кучук-Яценко С.И., Швеи Ю.В., Кавуниченко А.В., Швеи В.И., Тараненко С.Д., Проценко В.А. Кон- тактная стыковая сварка железнодорожных кресто- вин через литую аустенитную вставку № 8

Куший А.М., Власова А.Ф. Моделирование процес- са плавления электродов с экзотермической смесью в покрытии при ремонтной сварке и наплавке № 5–6

Левченко О.Г., Безушко О.Н. Термодинамика обра- зования соединений хрома в сварочных аэрозолях № 7

Лендел И.В., Максимов С.Ю., Лебедев В.А., Козы- рко О.А. Влияние импульсной подачи электродной проволоки на формирование и износостойкость на- плавленного валика, а также потери электродного металла при дуговой наплавке в CO_2 № 5–6

Лентюгов И.П., Рябцев И.А. Структура и свойства металла, наплавленного порошковой проволокой с шихтой из переработанных металлоабразивных от- ходов № 5–6

Майстренко А.Л., Нестеренков В.М., Дутка В.А., Лу- каш В.А., Заболотный С.Д., Ткач В.Н. Моделирование тепловых процессов для улучшения структуры метал- лов и сплавов методом трения с перемешиванием № 1

Максимова С.В., Хорунов В.Ф., Мясоед В.В. Вли- яние депрессантов и основного металла на микро- структуру паяных швов соединений сплава на осно- ве Ni_3Al со сплавом Инконель 718 № 12

Маркашова Л.И., Позняков В.Д., Гайворонский А.А., Бердникова Е.Н., Алексеенко Т.А. Структура и свой- ства поверхности железнодорожных колес после восстановительной наплавки и эксплуатационного нагружения № 5–6

Маркашова Л.И., Шелягин В.Д., Кушнарева О.С., Бернацкий А.В. Влияние технологических пара- метров лазерного и лазерно-плазменного легирования на свойства слоев стали 38ХНЗМФА № 5–6

Матвиенко В.Н., Мазур В.А., Лещинский Л.К. Оцен- ка формы и размеров сварочной ванны при наплавке комбинированным ленточным электродом № 9

Махлин Н.М., Коротынский А.Е. Асинхронные воз- будители и стабилизаторы дуги. Анализ и методика расчета. Часть 1 № 3–4

Махлин Н.М., Коротынский А.Е. Асинхронные воз- будители и стабилизаторы дуги. Анализ и методика расчета. Часть 2 № 7

Начимани Ч. Анализ деформации электродов на медно-хромовой основе при контактной точечной сварке № 8

Патон Б.Е., Калеко Д.М., Кедровский С.Н., Коваль Ю.Н., Кривцун И.В., Слепченко В.Н. Сварка сопро- тивлением сплава системы медь–алюминий с эффек- том памяти формы № 12

Пашенко В.Н. Применение газовых систем N–O–C–H для синтеза упрочняющих компонент в плаз- менных покрытиях № 11

Позняков В.Д., Костин В.А., Гайворонский А.А., Моссоковская И.А., Жуков В.В., Клапатюк А.В. Вли- яние термического цикла сварки на структурно-фа- зовые превращения и свойства металла ЗТВ средне- углеродистой легированной стали типа 30X2H2MF № 2

Позняков В.Д., Шелягин В.Д., Жданов С.Л., Макси- менко А.А., Завдовеев А.В., Бернацкий А.В. Лазер- но-дуговая сварка высокопрочных сталей с преде- лом текучести более 700 МПа № 10

Покляцкий А.Г., Клочков И.Н., Мотрунич С.И. Некото- рые преимущества стыковых соединений тонколи- стовых деформируемых алюминиевых сплавов АМг5М и АМг6М, полученных сваркой трением с перемешива- нием, по сравнению с ТИГ № 7

Рыбаков А.А., Филиппчук Т.Н., Костин В.А. Особен- ности микроструктуры и ударная вязкость металла сварных соединений труб из высокопрочной стали, микролегированной ниобием и молибденом № 3–4

Рябцев И.А., Ланкин Ю.Н., Соловьев В.Г., Осечков П.П., Тищенко В.А., Тихомиров А.Г. Компьютерная информационно-измерительная система для иссле- дования процессов дуговой наплавки № 9

Рябцев И.А., Панфилов А.И., Бабинцев А.А., Рябцев И.И., Гордань Г.Н., Бабийчук И.Л. Структура и изно- состойкость при абразивном изнашивании напла- вленного металла, упрочненного карбидами различ- ных типов № 5–6

Сенченков И.К., Рябцев И.А., Турык Е. Структур- ная схема методики расчета напряженно-деформи- рованного состояния деталей в процессе наплавки и последующей эксплуатации № 5–6

Сенченков И.К., Червинко О.П., Рябцев И.А. Расчет усталостной долговечности цилиндрических дета- лей при многослойной наплавке и эксплуатацион- ном циклическом термомеханическом нагружении № 5–6

Сенчишин В.С., Пулька Ч.В. Расчет размеров струк- турных составляющих наплавленного индукцион- ным способом металла с наложением механической вибрации № 8

Устинов А.И., Фальченко Ю.В., Мельниченко Т.В., Петрушинец Л.В., Ляпина К.В., Шишкин А.Е. Диф- фузионная сварка в вакууме нержавеющей стали че- рез пористые прослойки никеля № 7

Устинов А.И., Фальченко Ю.В., Мельниченко Т.В., Петрушинец Л.В., Ляпина К.В., Шишкин А.Е., Гу- риев В.П. Диффузионная сварка стали с оловян-

ной бронзой через пористые прослойки никеля и меди № 9

Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н., Ткачук В.И., Шевченко В.Е., Юлюгин В.К., Ву Бойи, Ситко А.И., Ярош В.Е. Моделирование характеристик плазмы сжатой дуги при воздушно-плазменной резке на прямой и обратной полярностях № 10

Хаскин В.Ю., Коржик В.Н., Сидорец В.Н., Бушма А.И., Ву Бойи, Ло Зие. Повышение эффективности гибридной сварки алюминиевых сплавов № 12

Цыбульский Г.А. О влиянии электрической емкости в сварочной цепи на устойчивость режима дуговой сварки № 12

Шевченко С.Б., Кривцун И.В., Головкин Л.Ф., Лутай А.Н., Слободянюк В.П. Возможности использования лазерного излучения для повышения качества электродной проволоки № 5–6

Шелягин В.Д., Саенко В.Я., Полишко А.А., Рябинин В.А., Бернацкий А.В., Палагеша А.Н., Степанюк С.Н., Клочков И.Н. Лазерная сварка технического титана BT1-0 ДШП, упрочненного азотом № 3–4

Ющенко К.А., Яровицын А.В., Хрущов Г.Д., Фомакин А.А., Олейник Ю.В. Анализ процесса формообразования валика при наплавке на узкую подложку № 9

Яровицын А.В. Энергетический подход при анализе режимов микроплазменной порошковой наплавки № 5–6

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Атрошенко М.Г., Полещук М.А., Шевцов А.В., Пузрин А.Л., Мищенко Д.Д., Серебряник И.П., Бородин А.И. Физико-механические свойства переходной зоны биметалла, полученного автономной вакуумной напайкой меди на сталь № 11

Бабинцев А.А. Методика оценки термической стойкости многослойного наплавленного металла № 10

Бартенев И.А. Особенности дуговой наплавки лежащим пластинчатым электродом по легирующей шихте № 5–6

Брызгалов А.Г., Добрушин Л.Д., Шленский П.С., Лавренко И.Г., Ромашко И.М. Изготовление коаксиальных медно-алюминиевых трубчатых деталей с помощью сварки взрывом и протяжки № 3–4

Буряк Т.Н., Кацай И.А., Кузнецов В.Г., Новиков А.И., Тараненко А.А., Ярошенко Н.В. Технология производства высококачественных сварных труб из коррозионностойкой стали в Украине № 2

Ворончук А.П., Жудра А.П., Кочура В.О., Петров А.В., Федосенко В.В. Особенности технологии изготовления и применения порошковых лент для наплавки № 5–6

Гопкало А.П., Клипачевский В.В. Влияние наплавки на напряженно-деформированное состояние роторов машин непрерывного литья заготовок № 5–6

Григоренко Г.М., Адеева Л.И., Туник А.Ю., Полещук М.А., Зеленин Е.В., Зеленин В.И., Никитюк Ю.Н., Лукаш В.А. Использование метода сварки трением с перемешиванием для восстановления изношенных медных плит кристаллизаторов МНЛЗ № 5–6

Григоренко Г.М., Пузрин А.Л., Атрошенко М.Г., Полещук М.А., Шевцов А.В., Моссоковская И.А. Автовакуумная пайка при ремонте медных панелей кристаллизаторов МНЛЗ № 9

Гринюк А.А., Коржик В.Н., Шевченко В.Е., Бабич А.А., Пелешенко С.И., Чайка В.Г., Тищенко А.Ф., Ковбасенко Г.В. Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов № 11

Дидык Р.П., Козачко В.А. Многослойные конструкции повышенной трещиностойкости, сформированные сваркой взрывом № 2

Жеманюк П.Д., Петрик И.А., Чигилейчик С.Л. Опыт внедрения технологии восстановительной микроплазменной порошковой наплавки при ремонте лопаток турбин высокого давления в условиях серийного производства № 8

Жерносеков А.М., Кислицын В.М. Применение сварочных импульсных источников питания в электрохимических процессах № 8

Жудра А.П., Ворончук А.П., Фомакин А.А., Великий С.И. Материалы и оборудование для наплавки ножей горячей резки металла № 5–6

Зубченко Ю.В., Терновой Е.Г. Разработка новых эмиссионных систем электронно-лучевых пушек для технологических работ в условиях космоса № 12

Капустян А.Е. Получение длинномерных полуфабрикатов из спеченных титановых сплавов сваркой трением № 3–4

Кныш В.В., Соловей С.А., Гришанов А.А., Линник Г.О., Мальгин М.Г. Применение приварных шпилек для крепления полотна железнодорожных мостов № 1

Кривцун И.В., Хаскин В.Ю., Коржик В.Н., Ло Цзын. Промышленное применение гибридной лазерно-дуговой сварки (Обзор) № 7

Кузьменко О.Г. Особенности нагрева штамповых заготовок при электрошлаковой наплавке неплавящимися электродами № 5–6

Кусков Ю.М., Гордань Г.Н., Богайчук И.Л., Кайда Т.В. Электрошлаковая наплавка дискретным материалом различного способа изготовления № 5–6

Кучук-Яценко С.И., Руденко П.М., Гавриш В.С., Дидковский А.В., Антипин Е.В. Преобразователь частоты и числа фаз для контактной стыковой сварки рельсов № 7

Левченко О.Г., Кулешов В.А., Арламов А.Ю. Характеристики шума при сварке в аргоносодержащих защитных газах № 9

Левченко О.Г., Максимов С.Ю., Лукьяненко А.О., Лендел И.В. Сравнительная гигиеническая оценка дуговой сварки с постоянной и импульсной подачей электродной проволоки № 12

Лобанов Л.М., Волков В.С. Особенности изготовления тонкостенных сварных конструкций преобразователя космического назначения № 1

Лобанов Л.М., Махлин Н.М., Смоляков В.К., Водолазский В.Е., Попов В.Е., Свириденко А.А. Оборудование для подготовки торцов труб применительно к сварке неповоротных стыков трубопроводов № 9

Лопухов Ю.И. Эрозионная стойкость хромоникель-кремнистого металла при наплавке в различных защитных средах № 8

Лютый А.П. Вклад Евгения Оскаровича Патона в создание сварочного материаловедения и производство высококачественной стали № 3-4

Мазур А.А., Маковецкая О.К., Пустовойт С.В., Бровченко Н.С. Порошковые проволоки на мировом и региональных рынках сварочных материалов № 5-6

Майданчук Т.Б., Илюшенко В.М., Бондаренко А.Н. Улучшение качества биметаллического соединения при наплавке под флюсом высокооловянной бронзы на сталь № 5-6

Маковецкая О.К. Состояние и тенденции развития европейского рынка технологий соединений (Обзор) № 8

Маковецкая О.К. Состояние и тенденции развития мирового рынка основных конструкционных материалов и сварочной техники № 10

Махлин Н.М. Особенности бесконтактных возбуждений дуги переменного тока № 10

Махненко О.В., Миленин А.С., Сапрыкина Г.Ю. Оценка работоспособности трубопровода первого контура реактора ВВР-М с дефектами сварных соединений № 1

Молтасов А.В., Гушин К.В., Клочков И.Н., Ткач П.Н., Тарасенко А.И. Определение усилия, вызванного нагревом кольцевых изделий, при контактной стыковой сварке № 11

Нестеренков В.М., Кравчук Л.А., Архангельский Ю.А., Петрик И.А., Марченко Ю.А. Электронно-лучевая сварка камеры среднего давления газотурбинного двигателя № 12

Овчинников А.В. Производство прутков из спеченных титановых сплавов с использованием различных способов сварки (Обзор) № 2

Олейник О.И. Влияние усадки металла продольных швов муфты на контактное давление при ремонте магистрального газопровода № 11

Осин В.В. Порошковые проволоки, обеспечивающие получение наплавленного металла с высоким сопротивлением изнашиванию схватыванием № 5-6

Пантелеймонов Е.А., Письменный А.А. Индуктор для непрерывного нагрева при термоупрочнении головки железнодорожных рельсов № 3-4

Перемитько В.В., Кузнецов В.Д. Влияние фракционного состава абразивной массы на износостойкость наплавленного металла № 10

Перемитько В.В., Носов Д.Г. Оптимизация режимов дуговой наплавки под флюсом по слою легирующей шихты деталей ходовой части гусеничных машин № 5-6

Переpletчиков Е.Ф. Плазменно-порошковая наплавка никелевых и кобальтовых сплавов на медь и ее сплавы № 5-6

Пулька Ч.В., Шаблий О.Н., Барановский В.Н., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я. Пути совершенствования технологии индукционной наплавки тонких стальных дисков № 5-6

Рыбаков А.А., Гарф Э.Ф., Якимкин А.В., Лохман И.В., Бурак И.З. Оценка напряженно-деформированного состояния участка газопровода с местной потерей устойчивости № 2

Росерт Р. Сплавы на кобальтовой основе для наплавки № 5-6

Савуляк В.И., Заболотный С.А., Бакалец Д.В. Оценка прочности соединений, полученных сваркой с сопутствующей пайкой № 7

Сливинский А.А., Жданов Л.А., Коротенко В.В. Теплофизические особенности импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом в защитных газах (Обзор) № 11

Сом А.И. Влияние схемы ввода порошка в дугу на его потери и эффективность процесса плазменно-порошковой наплавки № 5-6

Стефанив Б.В., Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М., Максимова С.В., Воронов В.В. Особенности реставрации рабочих органов матричных буровых долот № 8

Суховая Е.В. Двухслойные наплавочные композиции на основе наполнителя системы легирования Cr-Ti-C № 5-6

Тихий В.Г., Гусев В.В., Потапов А.М., Шевцов Е.И., Гусарова И.А., Манько Т.А., Фальченко Ю.В. Плиточные теплозащитные конструкции многообразных космических аппаратов с различными наружными силовыми элементами № 3-4

Фомичев С.К., Бойко В.П., Квасницкий В.В., Жданов Л.А., Сливинский А.А., Коваленко В.Л. 80-летие кафедры сварочного производства Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт» № 11

Хаскин В.Ю., Шелягин В.Д., Бернацкий А.В. Современное состояние и перспективы развития тех-

нологий лазерной и гибридной наплавки (Обзор) № 5–6

Хоменко Е.В., Гречанюк Н.И., Затовский В.Г. Современные композиционные материалы для коммутационной и сварочной техники. Часть 1. Порошковые композиционные материалы № 10

Хохлов М.А., Ищенко Д.А. Конструкционные сверхлегкие пористые металлы (Обзор) № 3–4

Царюк А.К., Елагин В.П., Давыдов Е.А., Гаврик А.Р., Пасечник А.И., Полонец С.А., Дедов В.Г., Горелов В.П. Особенности сварки и контроля при изготовлении теплообменных модулей котла-утилизатора парогазовой электростанции мощностью 150 МВт № 1

Чайка Д.В., Чайка В.Г., Крушневич С.П., Волохатюк Б.И. Машины для контактной стыковой сварки ленточных пил, прутков, проволок и стержней № 12

Червяков Н.О. Оценка термонапряженного состояния в сварном соединении сплава Inconel 690 № 11

Шаповалов К.П., Белинский В.А., Косинов С.Н., Литвиненко С.Н., Ющенко К.А., Лычко И.И., Козулин С.М. Изготовление крупногабаритных станин электрошлаковой сваркой плавящимся мундштуком № 9

Ющенко К.А., Каховский Ю.Н., Булат А.В., Самойленко В.И., Каховский Н.Ю. Новые электроды для ремонтной наплавки поврежденной облицовки камер рабочего колеса гидроагрегатов ГЭС № 5–6

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Троицкий В.А. Новые возможности радиационного контроля качества сварных соединений № 7

Турык Е., Рябцев И.А. Опыт использования европейских стандартов для аттестации процедур наплавки № 5–6

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Диссертация на соискание ученой степени № 1–4, 8, 12

ХРОНИКА

В ассоциации «Электрод» № 10

Встреча президента НАН Украины Б.Е. Патона с Еврокомиссаром ЕС № 3–4

VIII Международная конференция молодых ученых и специалистов «WRTYS-2015. Сварка и родственные технологии» № 7

Гвоздецкому В.С. — 85

IX Всеукраинский фестиваль науки № 5–6

XX сессия Научного совета по новым материалам при Комитете по естественным наукам Международной ассоциации академий наук № 7

Касаткину О.Г. — 80 № 3–4

Конференция сварщиков в Томске № 10

Ланкину Ю.Н. — 80 № 2

Международная конференция «Наплавка. – Наука. Производство. Перспективы» № 7

Международная конференция «Технологии сварки для морской инженерии» № 2

Международная конференция по лазерным технологиям состоялась в Украине № 10

Наши поздравления! № 3–4

Памяти И.К. Походни № 5–6

Поздравляем лауреатов Государственной премии Украины в области науки и техники № 1

Россварка № 12

Семинар молодых ученых, аспирантов и студентов «Прогрессивные технологии сварки и наплавки. Прочность и надежность сварных конструкций» № 1

Семинары в рамках Европейского сотрудничества № 3–4

Торжественное собрание в ИЭС им. Е.О. Патона № 3–4

Технический семинар «TPS/Robotics — роботизация сварочных процессов. Новые решения от Fronius» № 12

III Международная конференция «Сварочные материалы–2015» № 11

68-я Ежегодная Ассамблея Международного института сварки IIW 2015 № 12

Эннану А.А. — 80 № 3–4

Ющенко К.А. — 80 № 12

Информация

Автоматизация, доведенная до совершенства № 5–6

Деятельность Совета научной молодежи Института электросварки им. Е.О. Патона № 3–4

Идеальный сварной шов возможен. TPS/i Robotics — вершина Интеллектуальной Революции № 9

Источники питания для дуговой сварки и наплавки с улучшенными технологическими характеристиками № 9

Информационная система маркетинга в Институте электросварки № 3–4

Календарь конференций и выставок в 2015 г. № 1

Машины для контактной стыковой сварки ленточных пил, прутков, проволок и стержней № 12

Новые установки производства ООО «НАВКО-ТЕХ» для автоматической дуговой наплавки и сварки № 5–6

ОЗСО ИЭС им. Е.О. Патона в цифрах и фактах № 11

Отчетно-выборная конференция Общества сварщиков Украины № 12

Программы профессиональной подготовки на 2016 г. № 12

Сварочные аппараты A1567M(M1) для автоматической дуговой сварки под флюсом кольцевых поворотных стыков в глубокую разделку № 2

Указатель авторов № 12

Указатель статей за 2015 г. № 12

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

- Адеева Л.И. № 5-6
 Алексеенко Т.А. № 5-6
 Антипин Е.В. № 7
 Арламов А.Ю. № 9
 Архангельский Ю.А. № 12
 Астахов Е.А. № 10
 Атрошенко М.Г. № 9, 11
 Ахонин С.В. № 8
Бабийчук И.Л. № 5-6
 Бабинец А.А. № 5-6, 10
 Бабич А.А. № 11
 Баевич Г.А. № 2
 Бакалец Д.В. № 7
 Барановский В.Н. № 5-6
 Бартенев И.А. № 5-6
 Безушко О.Н. № 7
 Белинский В.А. № 9
 Белый А.И. № 5-6
 Белоус В.Ю. № 8
 Бердникова Е.Н. № 5-6
 Бернацкий А.В. № 3-4, 5-6(2), 10
 Богайчук И.Л. № 5-6(2)
 Бойко В.П. № 11
 Бондаренко А.Н. № 5-6
 Борисова А.Л. № 2
 Борисов Ю.С. № 2, 10
 Бородин А.И. № 11
 Бровченко Н.С. № 5-6
 Брызгалин А.Г. № 3-4
 Булат А.В. № 5-6
 Бурак И.З. № 2
 Буряк Т.Н. № 2
 Бушма А.И. № 8, 12
Великий С.И. № 5-6
 Великоиваненко Е.А. № 1
 Вигилянская Н.В. № 10
 Власов А.Ф. № 5-6
 Водолазский В.Е. № 9
 Волков В.С. № 1
 Волохатюк Б.И. № 12
 Воронов В.В. № 8
 Ворончук А.П. № 5-6(2)
 Вржижевский Э.Л. № 8
 Ву Бойи № 10, 12
Гаврик А.Р. № 1
 Гаврилюк В.Я. № 5-6
 Гавриш В.С. № 1, 7
 Гайворонский А.А. № 2, 5-6
 Галинич В.И. № 1, 2
 Гарф Э.Ф. № 2
 Глушко А.В. № 12
 Головко В.В. № 2
 Головко Л.Ф. № 5-6
 Гончаров И.А. № 1, 2
 Гопкало А.П. № 5-6
 Гордань Г.Н. № 5-6(3)
 Горелов В.П. № 1
 Гречанюк Н.И. № 10
 Григоренко Г.М. № 5-6, 9
 Гринюк А.А. № 11
 Гришанов А.А. № 1
 Грищенко А.П. № 10
 Гуляев И.П. № 3-4
 Гуляев П.Ю. № 3-4
 Гуриенко В.П. № 9
 Гусарова И.А. № 3-4
 Гусев В.В. № 3-4
 Гущин К.В. № 1, 11
Давыдов Е.А. № 1
 Дедов В.Г. № 1
 Демченко В.Ф. № 3-4
 Демьянов А.И. № 3-4
 Дидковский А.В. № 7, 10
 Дидык Р.П. № 2
 Дмитрик В.В. № 7, 12
 Добрушин Л.Д. № 3-4
 Долматов А.В. № 3-4
 Дутка В.А. № 1
Елагин В.П. № 1
 Ермолаев Г.В. № 11
 Еремеева Л.Т. № 5-6
 Ермоленко Д.Ю. № 2
Жданов Л.А. № 11(2)
 Жданов С.Л. № 10
 Жеманюк П.Д. № 8
 Жерносеков А.М. № 8
 Жудра А.П. № 5-6(3)
 Жуков В.В. № 2
Забиров А.Ф. № 3-4
 Заболотный С.А. № 7
 Заболотный С.Д. № 1
 Завдовеев А.В. № 10
 Завертанный М.С. № 9
 Загадарчук В.Ф. № 10
 Затовский В.Г. № 10
 Зеленин В.И. № 5-6
 Зеленин Е.В. № 5-6
 Зубченко Ю.В. № 12
 Зяхор И.В. № 9
Илюшенко В.М. № 5-6
 Иордан В.И. № 3-4
 Ищенко Г.И. № 12
 Ищенко Д.А. № 3-4
Кавуниченко А.В. № 8
 Казымов Б.И. № 2, 10
 Кайда Т.В. № 5-6(2)
 Калеко Д.М. № 12
 Капустян А.Е. № 3-4
 Каховский Н.Ю. № 5-6
 Каховский Ю.Н. № 5-6
 Кацай И.А. № 2
 Квасницкий В.В. № 11(2)
 Кедровский С.Н. № 12
 Кирьян В.И. № 2
 Кислицын В.М. № 8
 Клапатюк А.В. № 2
 Клипачевский В.В. № 5-6
 Клочков И.Н. № 3-4, 7, 11
 Кныш В.В. № 1
 Коваленко В.Л. № 11
 Коваль Ю.Н. № 12
 Ковбасенко Г.В. № 11
 Козечко В.А. № 2
 Козулин С.М. № 9
 Козырко О.А. № 5-6
 Коломыщев М.В. № 2, 10
 Коржик В.Н. № 3-4, 7, 10-12
 Коротенко В.В. № 11
 Коротынский А.Е. № 3-4, 7
 Косинов С.Н. № 9
 Костин В.А. № 2, № 3-4
 Кочура В.О. № 5-6
 Кравчук Л.А. № 12
 Кравчук М.В. № 8
 Кривцун И.В. № 3-4(2), 5-6, 7, 10, 12
 Крикент И.В. № 3-4
 Крушневич С.П. № 12
 Кузьменко О.Г. № 5-6
 Кузнецов В.Г. № 2
 Кузнецов В.Д. № 5-6, 10, 11
 Кулешов В.А. № 9
 Кусков Ю.М. № 5-6(2)
 Кучук-Яценко С.И. № 1, 2, 7-9, 10
 Кушнарева О.С. № 5-6
 Куший А.М. № 5-6
Лавренко И.Г. № 3-4
 Ланкин Ю.Н. № 9
 Лебедев В.А. № 5-6
 Левченко О.Г. № 7, 9, 12
 Лендел И.В. № 5-6, 12
 Лентюгов И.П. № 5-6
 Лещинский Л.К. № 9
 Линник Г.О. № 1
 Литвиненко С.Н. № 9

- Ло Зие № 12
 Ло Цзыи № 7
 Лобанов Л.М. № 1, 9
 Лобода П.И. № 5-6
 Лопухов Ю.И. № 8
 Лохман И.В. № 2
 Лукаш В.А. № 1, 5-6
 Лукьяненко А.О. № 12
 Лутай А.Н. № 5-6
 Лычко И.И. № 9
 Лютый А.П. № 3-4
 Ляпина К.В. № 7, 9
Мазур А.А. № 5-6
 Мазур В.А. № 9
 Маковецкая О.К. № 5-6, 8, 10
 Майданчук Т.Б. № 5-6
 Майстренко А.Л. № 1
 Максименко А.А. № 10
 Максименко А.В. № 2
 Максимов С.Ю. № 5-6, 12
 Максимова С.В. № 8, 12
 Мальгин М.Г. № 1
 Манько Т.А. № 3-4
 Маркашова Л.И. № 5-6(2)
 Марченко Ю.А. № 12
 Масючок О.П. № 2
 Матвиенко В.Н. № 9
 Матвиенко М.В. № 11
 Махлин Н.М. № 3-4, 7, 9, 10
 Махненко О.В. № 1
 Мельниченко Т.В. № 7, 9
 Миленин А.С. № 1(2)
 Мищенко Д.Д. № 1, 2, 11
 Мокров О.А. № 3-4
 Молтасов А.В. № 11
 Моссоковская И.А. № 2, 9
 Мотрунич С.И. № 7
 Мурашов А.П. № 10
 Мышковец В.Н. № 2
 Мясоед В.В. № 12
Наконечный А.А. № 9
 Начимани Ч. № 8
 Нестеренков В.М. № 1, 12
 Никитюк Ю.Н. № 5-6
 Новиков А.И. № 2
 Носов Д.Г. № 5-6
Овчинников А.В. № 2
 Олейник О.И. № 11
 Олейник Ю.В. № 9
 Осечков П.П. № 9
 Осин В.В. № 5-6
Палагеша А.Н. № 3-4
 Пантелеймонов Е.А. № 3-4
 Панфилов А.И. № 5-6
 Пасечник А.И. № 1
 Патон Б.Е. № 12
 Пащенко В.Н. № 11
 Пелешенко С.И. № 11
 Перемишко В.В. № 5-6, 10
 Переплетчиков Е.Ф. № 5-6
 Петрик И.А. № 8, 12
 Петриченко И.К. № 8
 Петров А.В. № 5-6
 Петров В.В. № 5-6
 Петрушинец Л.В. № 7, 9
 Пивторак Н.И. № 1
 Письменный А.А. № 3-4
 Погребной М.А. № 7, 12
 Позняков В.Д. № 2, 5-6, 10
 Покляцкий А.Г. № 7
 Полещук М.А. № 5-6, 9, 11
 Полишко А.А. № 3-4
 Полонец С.А. № 1
 Попов В.Е. № 9
 Потапов А.М. № 3-4
 Прощенко В.А. № 8
 Пузрин А.Л. № 9, 11
 Пулька Ч.В. № 5-6, 8
 Пустойт С.В. № 5-6
Райсген У. № 3-4
 Розынка Г.Ф. № 1
 Ромашко И.М. № 3-4
 Росерт Р. № 5-6
 Росляков А.И. № 5-6
 Руденко П.М. № 1, 7
 Рыбаков А.А. № 2, 3-4
 Рябинин В.А. № 3-4
 Рябцев И.А. № 5-6(5), 9
 Рябцев И.И. № 5-6
Сабадаш О.М. № 8
 Савуляк В.И. № 7
 Саенко В.Я. № 3-4
 Самойленко В.И. № 5-6
 Сапрыкина Г.Ю. № 1
 Свириденко А.А. № 9
 Селин Р.В. № 8
 Сенченков И.К. № 5-6(2)
 Сенчишин В.С. № 5-6, 8
 Серебряник И.П. № 11
 Сидорец В.Н. № 12
 Сидорук В.С. № 12
 Ситко А.И. № 10
 Слепченко В.Н. № 12
 Сливинский А.А. № 11(2)
 Слободянюк В.П. № 5-6
 Смоляков В.К. № 9
 Соболев О.В. № 7, 12
 Соловей С.А. № 1
 Соловьев В.Г. № 9
 Сом А.И. № 5-6
 Степанов Д.В. № 11
 Степанюк С.Н. № 2, 3-4
 Стефанив Б.В. № 8
 Судавцова В.С. № 1, 2
 Суховая Е.В. № 5-6
 Сыренко Т.А. № 7
Тараненко А.А. № 2
 Тараненко С.Д. № 8
 Тарасенко А.И. № 11
 Терновой Е.Г. № 12
 Тихий В.Г. № 3-4
 Тихомиров А.Г. № 9
 Тищенко А.Ф. № 11
 Тищенко В.А. № 9
 Ткач В.Н. № 1
 Ткач П.Н. № 11
 Ткачук В.И. № 10
 Троицкий В.А. № 7
 Туник А.Ю. № 5-6
 Турык Е. № 5-6(2)
Устинов А.И. № 7-9
Фальченко Ю.В. № 3-4, 7, 9
 Федосенко В.В. № 5-6
 Филипчук Т.Н. № 3-4
 Фомакин А.А. № 5-6, 9
 Фомичев С.К. № 11
Харламов М.Ю. № 3-4, 10
 Хаскин В.Ю. № 5-6, 7, 12
 Хоменко Е.В. № 10
 Хорунов В.Ф. № 8, 12
 Хохлов М.А. № 3-4
 Хрущов Г.Д. № 9
Царюк А.К. № 1
 Цыбулькин Г.А. № 12
Чайка В.Г. № 11, 12
 Чайка Д.В. № 12
 Червинко О.П. № 5-6
 Червяков Н.О. № 11
 Чернобай С.В. № 9
 Чигилейчик С.Л. № 8
Шаблий О.Н. № 5-6
Шаповалов К.П. № 9
 Швец В.И. № 8
 Швец Ю.В. № 8
 Шевченко В.Е. № 10, 11
 Шевченко С.Б. № 5-6
 Шевцов А.В. № 9, 11
 Шевцов Е.И. № 3-4
 Шелягин В.Д. № 3-4, 5-6(2), 10
 Шишкин А.Е. № 7, 9
 Шленский П.С. № 3-4
Юлюгин В.К. № 10
 Ющенко К.А. № 5-6, 9(2)
Якимкин А.В. № 2
 Яровицын А.В. № 5-6, 9
 Ярош В.Е. № 10
 Ярошенко Н.В. № 2

ПОДПИСКА 2016 — на журнал «АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
720 грн.	1440 грн.	5400 руб.	10800 руб.	90 дол. США	180 дол. США

В стоимость подписки включена стоимость доставки заказной бандеролью.

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



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

В открытом доступе выпуски журнала с 2009 по 2014 гг. в формате *.pdf.

Журнал «Автоматическая сварка» реферируется и индексируется в базах данных «Джерело» (Украина), ВИНИТИ РЖ «Сварка» (Россия), INSPEC, «Welding Abstracts», ProQuest (Великобритания), EBSCO Research Database, CSA Materials Research Database with METADEX (США), Questel Orbit Inc. Weldasearch Select (Франция); представлен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), «Google Scholar» (США); реферируется в журналах «Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach» (Польша) и «Rivista Italiana della Saldatura» (Италия); освещается в обзорах японских журналов «Journal of Light Metal Welding», «Journal of the Japan Welding Society», «Quarterly Journal of the Japan Welding Society», «Journal of Japan Institute of Metals», «Welding Technology».

РЕКЛАМА в журнале «Автоматическая сварка»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190×190 мм) 700\$
 - Вторая (550\$), третья (500\$) и четвертая (600\$) страницы обложки (200×290 мм)
 - Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм) 400\$
 - Вклейка А4 (200×290 мм) 340\$
 - Разворот А3 (400×290 мм) 500\$
 - 0,5 А4 (185×130 мм) 170\$
- #### Технические требования к рекламным материалам
- Размер журнала после обрезки 200×290 мм

- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации
- Все файлы в формате IBM PC**
 - Corell Draw, версия до 10.0
 - Adobe Photoshop, версия до 7.0
 - QuarkXPress, версия до 7.0
 - Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi
- Стоимость рекламы и оплата**
 - Цена договорная
 - По вопросам стоимости размещения рекламы, свободной площади и сроков публикации просьба обращаться в редакцию

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

Контакты:

тел./факс: (38044) 200-82-77; 200-54-84
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

© Автоматическая сварка, 2015

Подписано к печати 02.12.2015. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 9,09. Усл.-отт. 10,09. Уч.-изд. л. 10,22 + 2 цв. вклейки.
Печать ООО «Фирма «Эссе». Тираж 950 экз.
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.