#### Международный научно-технический Автоматический Втоматический Втоматический

№ 7 Июпь 2018

Издается с 1948 года

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

#### Главный редактор Б. Е. Патон

Ученые ИЭС им. Е. О. Патона
д.т.н. С. И. Кучук-Яценко (зам. гл. ред.),
д.т.н. В. Н. Липодаев (зам. гл. ред.),
д.т.н. Ю. С. Борисов,
д.т.н. Г. М. Григоренко,
к.ф.-м.н. А. Т. Зельниченко,
д.т.н. В. В. Кныш,
д.т.н. И. В. Кривцун, д.т.н. Ю. Н. Ланкин,
д.т.н. Л. М. Лобанов,
д.т.н. В. Д. Позняков,
д.т.н. В. Д. Позняков,
д.т.н. К. А. Рябцев, д.т.н. К. А. Ющенко
Т. В. Юштина (отв. секр.)

Ученые университетов Украины д.т.н. В. В. Дмитрик, НТУ «ХПИ», Харьков, д.т.н. В. В. Квасницкий, НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев, к.т.н. Е. П. Чвертко, НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев, д.т.н. М. М. Студент, Физ.-механ. ин-т им. Г. В. Карпенко НАНУ, Львов

Зарубежные ученые
д.т.н. Н. П. Алешин
МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ
д.т.н. Гуань Цяо
Ин-т авиационных технологий, Пекин, Китай
д.х.н. М. Зиниград
Ун-т Ариэля, Израиль
д.т.н. В. И. Лысак
Волгоградский гос. техн. ун-т, РФ
д-р инж. У. Райсген
Ин-т сварки и соединений, Аахен, Германия
д.т.н. Я. Пилярчик
Ин-т сварки, Гливице, Польша
д.т.н. Г. А. Туричин
С.-Петербургский гос. политехн. ун-т, РФ

Адрес редакции
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ
03150, Украина, Киев-150,
ул. Казимира Малевича, 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 DOI: http://dx.doi.org/10.15407/as

Рекомендовано к печати редакционной коллегией журнала

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 Подписной индекс 70031

Издается ежемесячно

## СОДЕРЖАНИЕ

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

## ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

## **ХРОНИКА**

Международная выставка «Сварка/Welding 2018» 47
Запорожский промышленный форум-2018 47
Конференция «Сварка и родственные технологии
для изготовления оборудования специального и ответственного назначения» 49
Научно-техническая конференция «Сварочные материалы и оборудование для сварки. Перспективы производства» 50
Международный учебно-методический форум в Таллинне 51
Международная конференция «Титан 2018. Производство и применение в Украине» 52

## Информация

 Міжнародний науково-технічний і виробничий журнал International Scientific-Technical and Production Journal

**№7, 2018** 

# **Автоматичне Зварювання**

Видається 12 разів на рік з 1948 р

Головний редактор Б. Є. Патон

## 3MICT

## НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

Сміян О. Д. Газовиділення та перерозподіл водню при вилежуванні зварних конструкцій з різних
металевих матеріалів
сплаву ВТ19 12
Размишляєв О. Д., Видмиш П. О., Агєєва М. В. До питання моделювання будови поперечного магнітного поля в зоні зварювальної ванни
ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ
Кулик В. М. Технічні параметри та особливості виготовлення зварних посудин високого тиску
для доставки природнього газу
з алюмінієвих сплавів
Матвієнко В. М., Лещінський Л. К., Мазур В. О. Розрахунок розмірів зони проплавления при наплавленні роликів машин безперервного лиття
заготовок
короткі повідомлення
Дисертації на здобуття наукового ступеня 45
ХРОНІКА
Міжнародна виставка «Зварювання/Welding 2018» 47 Запорізький промисловий форум-2018 47 Конференція «Зварювання та споріднені техно-
логії для виготовлення обладнання спеціального та відповідального призначення»
ріали та обладнання для зварювання. Перспективи виробництва»
Міжнародний навчально-методичний форум в Таллінні5 <sup>4</sup>
Міжнародна конференція «Титан 2018. Виробництво та застосування в Україні»
ІНФОРМАЦІЯ
Сесія Наукової ради з нових матеріалів при Комітеті з природничих наук Міжнародної асоціації акаде-
мій наук

Журнал «Автоматичне зварювання» видається англійською мовою під назвою «The Paton Welding Journal»

Адреса редакції

03150, Україна, м. Київ-150, вул.Казимира Малевича, 11 IE3 ім. Є.О. Патона НАН України Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-63-02 E-mail: journal@paton.kiev.ua www.patonpublishinghouse.com

# Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)

Published 12 times per year since 1948

Editor-in-Chief B. E. Paton

## CONTENTS

## **SCIENTIFIC AND TECHNICAL**

Smiyan O. D. Gas emission and redistribution of hydrogen in aging of welded structures from different metallic materials
Kulik V. M. Technical parameters and features of manufacturing high-pressure vessels for natural gas transportation
Petrushynets L. V., Falchenko Yu. V., Fedorchuk V. E., Shynkarenko V. S. Possibilities of manufacturing three-layer welded honeycomb panels from aluminium alloys
Matvienko V. N., Leshchinsky L. K., Mazur V. S. Calculation of penetration zone dimensions in surfacing of rolls of machines for continuous casting of billets
Kuskov Yu. M., Solovjov V. G. Experimental study of slag and metal pool rotation in the electroslag process in current-supplying mould
BRIEF INFORMATION
Thesis for a scientific degree
NEWS
International Exhibition «Welding 2018»
Prospects»
International Training-Methodology Forum in Tallinn51
International Conference «Titanium 2018. Production
and Application in Ukraine» 52
INFORMATIONS
Session of the Scientific Council on Materials at the Committee on Natural Sciences of the International Association of Academies of Sciences

«Avtomaticheskaya Svarka» (Automatic Welding) journal is republished in English under the title «The Paton Welding Journal»

## Address

The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine Tel./Fax: (38044) 200-82-77, 200-63-02 E-mail: journal@paton.kiev.ua www.patonpublishinghouse.com DOI: http://dx.doi.org/10.15407/as2018.07.01

УДК 621.791.052:620.192.47

# ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА ПРИ ВЫЛЕЖИВАНИИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

## О. Д. СМИЯН

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проанализированы результаты исследований поведения водорода в процессе вылеживания сварных соединений различных материалов. Проведена градация процессов, протекающих в металле при вылеживании и выявлены причины снижения трещиностойкости сварных соединений при комнатных температурах. Предложен механизм, объясняющий спонтанное выделение водорода из металла в процессе вылеживания, причины и следствия этих процессов. Библиогр. 22, табл. 2, рис. 11.

Kл  $\phi$  ч e в  $\omega$  е e с  $\pi$  о в a: вылеживание сварных конструкций, водород, трещиностойкость, бозон, механизм, холодная трещина

Холодные трещины образуются в сварных соединениях сталей различного класса в результате прохождения фазовых превращений, приводящих к снижению прочностных свойств металла (например, образование закалочных структур), наличию диффузионно-подвижного водорода (ДПВ) и воздействию сварочных напряжений. Холодные трещины образуются как на этапе охлаждения при температурах ниже 423 К, так и во время вылеживания сварных конструкций при комнатной температуре в течение некоторого времени после сварки. Вопросам, связанным с изучением причин и механизма образования холодных трещин в сварных соединениях сталей и сплавов титана различного химического состава и разработке мероприятий по их предупреждению, посвящено значительное количество работ (например, [1-6]).

В технической литературе встречается понятие отдыха, под которым подразумевается изотермическая выдержка металла после окончания сварки в процессе охлаждения сварного соединения при некоторой температуре (обычно T = 373...423 К в течение от 10 мин до 8 ч) для частичного снятия сварочных напряжений и удаления избыточного ДПВ. Такая операция приводит практически к полному восстановлению пластических свойств металла и поэтому дальнейшее вылеживание этого сварного соединения при комнатных температурах уже не приводит к образованию в нем холодных трещин. По этой теме проводились исследования для разных сталей еще с середины XX века (например, это отражено в работах [7-9]). В данной статье эти вопросы не рассматриваются. Целью данной работы является анализ и изучение процессов, протекающих в металле сварных соединений и конструкций во время вылеживания исключительно при комнатных и климатических температурах (поэтому здесь об отдыхе речь не идет), при которых происходит реальная эксплуатация многих изделий и конструкций из сталей, склонных к образованию холодных трещин в этих условиях, так как этот вопрос в литературе поднимается сравнительно редко и он изучен нелостаточно.

Известно, что после выполнения некоторых технологических операций (сварка плавлением, прокатка, термическая обработка) из различных сталей и сплавов при комнатных температурах в течение некоторого времени спонтанно выделяется так называемый диффузионно-подвижный водород, количество которого и распределение в сварном соединении может контролироваться различными методами анализа. Наиболее распространенный из них — глицериновый метод, когда сварной образец погружается в ванну с глицерином и контролируются места и частота выделения пузырьков водорода на его поверхности [8]. Полагают, что содержание оставшегося в металле водорода (так называемый остаточный водород — ОВ) в течение длительного времени при комнатных температурах остается постоянным. Установлено, что выделение ДПВ происходит преимущественно по линии сплавления, границе ЗТВ-ОМ и по границам зерен. Для высокопрочных сталей, в основном мартенситного и мартенситно-бейнитного классов, это явление связывают с появлением холодных трещин в сварных соединениях в процессе их остывания до температур ниже 373 К и последующего вылеживания при комнатных температурах (рис. 1). Принято считать, что по истечении 3...10 суток вылеживания количество выделяющегося ДПВ уменьшается до

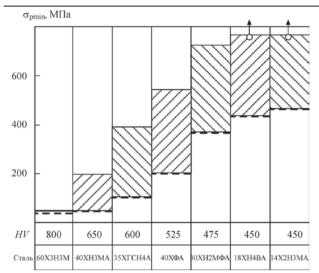


Рис. 1. Влияние содержания ДПВ (бозона  $H^-$ ) в наплавленном металле на сопротивление различных сталей холодным трещинам. Тавровый образец ЛТПП2-3, электроды УОНИ 13/45 (штриховая линия —  $[H^-] = 4$  ppm; сплошная линия —  $[H^-] = 1$  ppm (2)) [1]

безопасного уровня и в дальнейшем трещины не образуются.

Считается, что в процессе вылеживания не происходит фазовых превращений, наблюдаются только диффузионные (спонтанное удаление водорода из металла) и релаксационные процессы, вызывающие переход пластической деформации с границ зерен на тело зерна [7]. Это приводит к повышению пластичности и сопротивляемости образованию холодных трещин. Одновременно уменьшается электросопротивление стали, что свидетельствует об упорядочении атомного строения металла [9].

На основе анализа многочисленных эмпирических наблюдений были предложены технологические решения, которые позволяют избежать появления холодных трещин при вылеживании сварных соединений низколегированных высоко-

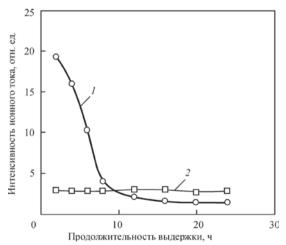


Рис. 2. Зависимость интенсивности вторичных ионов водорода  ${\rm H^-}$  (I) и  ${\rm H^+}$  (2) от продолжительности экспозиции в ультравысоком вакууме предварительно наводороженых образцов стали Ct3 [11, 12]

прочных сталей [5, 6, 10]. Однако глубоких систематических исследований процессов, происходящих в металле сварного соединения в процессе его вылеживания, не проводилось, причина и механизм негативного воздействия водорода на образование холодных трещин при вылеживании не установлены. Это и стало предметом исследований в данной работе.

Исследования, связанные с вылеживанием металла после его технологической обработки, обычно проводятся на образцах небольших размеров, т. е. процесс фактически моделируется. В реальных же условиях после окончания сварки многие изделия эксплуатируются при комнатных и климатических температурах длительное время (годами) в средах, содержащих водород в различной форме — в виде влаги воздуха, конденсата (туман), текущей воды (дождь), паров кислот в атмосфере, рабочих водородсодержащих жидкостей и так далее, однако для таких условий влияние «внешнего» водорода среды, из которой он сорбируется металлом как до начала, так и в процессе эксплуатации, не рассматривалось.

Исследования, выполненные нами совместно с И. К. Походней и сотрудниками [11], показали, что ДПВ — это негативный квазиион водорода H<sup>-</sup>. В последующих работах [12] было показано, что сорбированный металлом водород содержится в твердом теле одновременно в двух состояниях — в виде квазиионов Н- и Н+. Квазиион водорода Н- обладает квантовыми свойствами бозона — сверхподвижностью в твердом теле. Коэффициент массопереноса водорода-бозона (коэффициент диффузии в частном случае) больше коэффициента диффузии водорода (фермиона) в той же стали на несколько порядков. Например, для стали 14Х2ГМР при комнатных температурах через 40 ч после сварки он достигает величины  $D^{H^-} = 1.95 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2 / \text{ c}$ , а после вылеживания в течение месяца —  $5.85 \cdot 10^{-7}$  см<sup>2</sup>/с. Это объясняет спонтанность выделения ДПВ при этих условиях. Квазиион водорода Н+ обладает свойствами фермиона (это так называемый остаточный или протонионизированный водород), который удаляется из металла только в процессе нагревания или плавления.

Установлено [12], что при определенных условиях (температура, химический состав металла) водород-бозон может переходить в другую форму — в водород-фермион и наоборот. Для конструкционных сталей такой критической температурой является 602 К.

Установлено, что содержание ДПВ выше в приповерхностных слоях металла шва (рис. 3). Соотношение между  ${\rm H^-}$  и  ${\rm H^+}$  изменяется от поверхности в глубину металла шва (рис. 4), а также при изменении химического состава металла как в

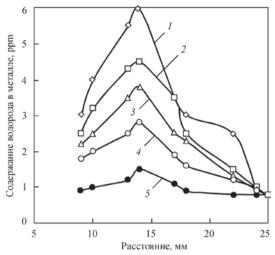


Рис. 3. Изменение распределения водорода в образце стали Ст3 при вылеживании после окончания сварки через 1, 2, 3, 4 и 5 ч, соответственно (по оси абцисс — расстояние от поверхности металла шва) [14]

процессе вылеживания, так и в процессе эксплуатации. Например, введение никеля в металл наплавки приводит к изменению соотношения H<sup>-</sup>/H<sup>+</sup> при сохранении общего содержания водорода (бозонного и фермионного) (табл. 1). Водород-бозон является одной из основных причин инициирования образования холодных трещин [12].

Анализ результатов наблюдений за процессом вылеживания и экспериментальных данных по контролю содержания ДПВ и ОВ в металле сварных соединений, выполненных ранее различными авторами, показал, что все случаи вылеживания сталей и сплавов, сопровождавшиеся спонтанным выделением или перераспределением водорода при комнатных температурах можно классифицировать по различным группам, которые отличаются характером, динамикой протекания процесса или уровнем воздействия водорода на механические свойства металла:

1. В процессе вылеживания независимо от его продолжительности структура и фазовый состав металла сохраняются, а изменения химического состава (в том числе и по водороду) не достигают критических величин. Структура металла энерге-

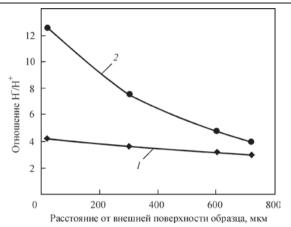


Рис. 4. Изменение соотношения  $H^-/H^+$  по радиусу нормального сечения цилиндрического образца стали 20 вдоль атомно-чистой поверхности излома после термической обработки (1 — нормализация; 2 — закалка) [12]

тически стабильна. Вероятность появления холодных трещин низка или вообще отсутствует.

- 2. При длительном вылеживании в металле сварного соединения происходят изменения структуры, вызванные релаксацией напряжений и перераспределением химических элементов в пределах зерен и их границ. Структуры, образующиеся в сварном соединении, энергетически неравновесны, нестабильны во времени, в процессе вылеживания происходит постепенная их стабилизация. Есть вероятность появления холодных трещин, особенно в первые часы после сварки.
- 3. В процессе длительного вылеживания (или эксплуатации) в металле происходят фазовые превращения, вызывающие изменения состава отдельных участков металла сварного соединения и растворимости в них водорода. Возникают структуры с большой энергетической нестабильностью (закалочные структуры, мартенсит, бейнит) и большими сварочными напряжениями, зонами с локальной пластической деформацией, растворимостью водорода и с повышенной локальной химической неоднородностью. Локализация повышенной концентрации водорода и интенсивность его пиков достигают и превышают критический уровень для данной стали, сплава. Возможно про-

Таблица 1. Влияние химического состава покрытия, напыленного на проволоку 09Г2С, на содержание диффузионно-подвижного (ДПВ) и остаточного (ОВ) водорода в металле наплавки стали 14Х2ГМР и на соотношение H⁻/H⁺ [13]

		Содержани	Отношение			
№	Состав покрытия	Раздельное	определение	Общее с	ДПВ (Н-) к ОВ	
3/П	проволоки	ДПВ, метод ХА	ОВ, метод ЛМА	Сумма ЛПВ + ОВ	Определение методом ВП	(H <sup>+</sup> ), H <sup>-</sup> /H <sup>+</sup>
1	Исходный (основной) металл	5,5	3,1	8,6	8	1,77
2	OM + 1,5 % Ni	4,85	5,2	9,05	9	0,74
3	OM + 1,6 % Ni + 0,44 % P3M, в т. ч. 0,017 % Се	1,9	7,2	9,1	8,5	0,26
4	OM + 0,45 % Y + 1,8 % Ni	4,6	4,2	8,8	9,5	1,09
5	OM + 2 % Ni + 0,6 % P3M, в т. ч. 0,26 % Ce	2,3	6,6	8,9	8,9	0,35
6	OM+0,3 % Y	5,2	3,9	9,1	10	1,33

Обозначения: ОМ – основной металл; XA — хроматографический анализ; ЛМА — локальный масс-спектральный анализ; ВП – метод вакуум-плавки; РЗМ – редкоземельные металлы (смесь).

текание химических реакций внутри металла с образованием пленочных гидридов железа, гидридов титана или молекулярных газов (например, типа углеводородов  $\mathrm{CH}_2$ ,  $\mathrm{CH}_4$  в высокоуглеродистых сталях), Вероятность появления холодных трещин очень велика.

- 4. В процессе длительного вылеживания (и эксплуатации) происходит изменение зарядового состояния растворенного в металле водорода и соотношения между квазиионами водорода различной зарядности. Вероятность появления холодных трещин зависит от величины этого соотношения, коэффициента химической неоднородности, интенсивности и локализованности концентрационного пика водорода, возможности протекания химической реакции между квазиионами водорода и компонентами стали. Вероятность появления холодных трещин очень велика.
- 5. Длительность вылеживания сварного соединения оказывает влияние на интенсивность и параметры финишной обработки изделий и их трещиностойкость. Возможно образование гидридов титана и (или) пленочных гидридов железа по границам зерен. Есть вероятность образования холодных трещин.

Рассмотрим несколько примеров, иллюстрирующих предложенную градацию процессов вылеживания различных металлов и сплавов после их тепловой или деформационной обработки в различных водородсодержащих средах.

Не изменяют свою структуру в процессе вылеживания однофазные металлы (например, медь), а также конструкционные стали в слое, прилегающем к поверхности сплавления. Эти материалы

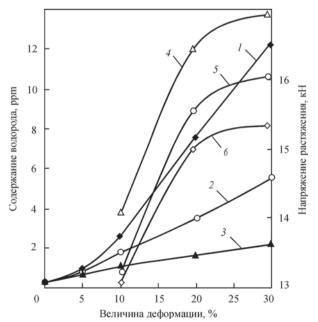


Рис. 5. Зависимость содержания водорода в меди (кривые I–3) и величины нагрузки (кривые 4–6) от степени деформации в среде газообразного водорода (I), конденсированной (2) и проточной (3) воды [16]

можно использовать как модельные при анализе сварных соединений сталей и сплавов титана, поскольку они позволяют оценить и сопоставить параметры и динамику сорбции водорода металлом в процессе локальной деформации, возникающей в ЗТВ металла шва при его охлаждении в результате действия сварочных напряжений и десорбции водорода при частичной релаксации сварочных напряжений во время вылеживания. Существенное влияние на эти процессы оказывает среда, в которой протекают исследуемые процессы (при сварке — влажность сварочных материалов; при деформации, вылеживании и эксплуатации сварных изделий — состав водородсодержащей среды и величина колебаний климатических температур).

На рис. 5 и рис. 6, а приведены данные по изменению величины и скорости сорбции водорода медью в процессе ее пластической деформации в различных средах, а на рис. 6,  $\delta$  — скорость десорбции водорода из тех же образцов меди за 42 месяца вылеживания при комнатной температуре. Медь — однофазный и пластичный металл, поэтому на изучаемые процессы не влияли фазовые и структурные изменения, а внутренние напряжения, обусловленные деформацией и растворением водорода, сведены к минимуму. Сорбция водорода из водородсодержащей среды деформирующимся металлом при комнатных температурах обусловлена действием структурно-деформационного эффекта, описанного в работе [15], десорбция водорода — релаксацией напряжений при длительном вылеживании.

На содержание и распределение водорода в сварном соединении существенно влияют содержание этой примеси в среде, в которой выполняется сварка, и процесс вылеживания. Например, изменение влажности флюса (как среды) при сварке стали 14Х2ГМР приводит к повышению содержания водорода в металле (рис. 7) и к более неоднородному распределению этой примеси, что повышает вероятность появления трещин в первые же часы вылеживания [10]. Уменьшение же влажности флюса с 0,04 до 0,017 % оказывается достаточным, чтобы через 4 ч вылеживания распределение водорода в сварном соединении стало практически однородным, а вероятность появления трещин стала минимальной. Характерно, что скорость удаления водорода из металла сварного соединения во время вылеживания из различных его участков неодинаковая. Наибольшая скорость дегазации металла достигается вдоль поверхности сплавления (табл. 2, рис. 8, 9), где структурные изменения в процессе вылеживания не наблюдались.

Изучение процесса выделения водорода из этого участка металла методом локального

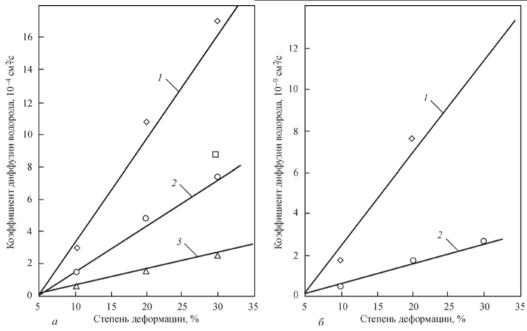


Рис. 6. Изменение коэффициента диффузии водорода при его сорбции медью в (a) в процессе деформирования (30 мин) в среде газообразного водорода (1), конденсата (структурированной) воды (2), обычной (проточной) воды (3) и десорбции (6) из тех же образцов меди после растяжения и вылеживания в течение 42 месяцев (1308 суток) [15–17]

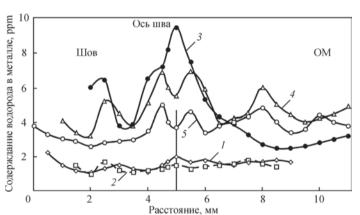


Рис. 7. Распределение водорода-бозона в сварном соединении стапи  $14X2\Gamma MP$  при различной влажности флюса АН-17M: I, 2 — влажность 0,017 %; 3–5 — влажность 0,04 %. Вылеживание после сварки: I — 4 ч; 2 — 5,5; 3 — 3; 4 — 4; 5 — 5. Локальный анализ содержания водорода методом ЛМА с ТЭЭ [10]

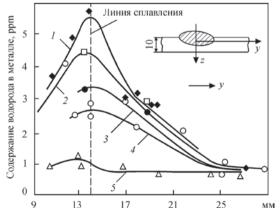


Рис. 8. Распределение водорода-бозона в сварном шве стали Ст3 сп в направлении оси V: I — непосредственно после сварки; 2 — через 1; 3 — 2; 4 — 24; 5 — 72 ч после сварки [20]

масс-спектрального анализа с термоэлектронной экстракцией злектронно-лучевым зондом (ЛМА с ТЭЭ) [17] показало, что, в процессе вылеживания водород десорбируется из металла не непрерывным потоком, а порциями, импульсами, а кривая изменения локального содержания водорода по линии сплавления в течение месяца после выполнения сварки представляет собой затухающую волну (рис. 9). Усредненные значения экспериментальных измерений совпадают с распределением, вычисленным по формуле Фика. Ошибка измерений составляла 10-4 ррт [17], что намного меньше амплитуды концентрационных колебаний водорода в одном и том же участке образца, составляющих несколько единиц ppm (рис. 9). Следовательно, наблюдаемые отклонения от кривой, построенной по уравнению Фика (штриховая

кривая на рис. 9), не являются ошибками измерений, а отражают реальный процесс дегазации водорода из металла, проходящий в зоне поверхности сплавления. Об импульсном характере выделения водорода из стали 9ГС после прокатки в процессе вылеживания при остывании и комнатных температурах сообщается и в работе [19].

Таблица 2. Диффузия водорода в различных участках сварного шва [18]

Сталь, участок	T, °K	$D^{\mathrm{H}}$ , cm <sup>2</sup> /c	Вид структуры
14Х2ГМР, шов	293	6,8×10 <sup>-5</sup>	Мартенситно- бейнитная
14Х2ГМР, ЗТВ	293	3,6×10 <sup>-7</sup>	->>-
14Х2ГМР, поверхность сплавления	293	1,8×10 <sup>-4</sup>	->>-

Волновой характер изменения содержания водорода в процессе длительного вылеживания (в течение 10 месяцев) наблюдался и после многопроходной аргонодуговой сварки высокопрочной стали ВНС-2. Изделия из этой стали, изготовленные с применением сварки, разрушались через 5...6 месяцев как в процессе их эксплуатации, так и при хранении на консервации, т. е. без эксплуатационных нагрузок. Для выяснения причин такого поведения материала были изготовлены сварные карточки, из которых ежемесячно отрезалась полоска металла и изготавливались образцы для последующего исследования методом ЛМА с ТЭЭ на установке 0Б768М в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. На каждом таком образце проводился дискретно-точечный анализ на локальное содержание водорода по 5 параллельным трассам, проходящим через шов и ЗТВ сварного соединения. Полученные результаты измерений усреднялись по образцам, а в конце года — по всей серии ежемесячных измерений. Конечные результаты этих измерений приведены на рис. 10. Установлено, что в процессе вылеживания общее содержание водорода в металле за 10 месяцев наблюдений изменилось незначительно (кривая 1 на рис. 10), но в отдельных участках сварного соединения локальная концентрация водорода выросла с 5 ррт в металле (сразу после сварки) до 34 ррт через 7 месяцев вылеживания сварных карточек при комнатной температуре, что значительно выше критического порога допустимого содержания водорода в этой стали (10 ppm). Это и вызвало разрушение

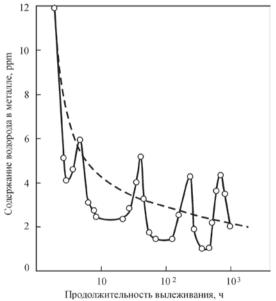


Рис. 9. Изменение концентрации водорода-бозона в зоне сплавления шов-основной металл в процессе вылеживания образцов стали 14Х2ГМР при комнатных температурах. Измерения методом ЛМА с ТЭЭ водорода сфокусированным пучком электронов. Электродуговая сварка электродами АНП-1 (штриховая линия — изменение концентрации водорода во времени по формуле Фика) [17]

изделия. Было обнаружено периодическое изменение содержания водорода в отдельных участках металла сварного соединения в процессе длительного вылеживания, однако кривая, отражающая эти изменения, оказалась восходящей. Металлографическое исследование структуры металла до и после вылеживания показало, что в металле произошло неполное обратное мартенситное превращение с образованием карбидной сетки, имеющей более низкую прочность, чем металл, и в которой более высокая растворимость водорода. Установлено, что при комнатных температурах в условиях вылеживания в данной мартенситной стали в поле локальных внутренних напряжений и микроучастков пластической деформации происходит миграция и перераспределение водорода-бозона, который концентрируется по границам зерен и в зонах их стыка, где формируются дилатоны и скопления вакансий. Водород молизуется в них, создавая значительное внутреннее давление. Это способствует частичному распаду мартенсита с выделением карбидной сетки. Водород из окружающего металла мигрирует в эти участки, так как растворимость его в карбиде значительно выше, чем в металле. В результате процесс деградации металла ускоряется. При анализе фиксируется возрастание локальной концентрации водорода в отдельных участках при сохране-

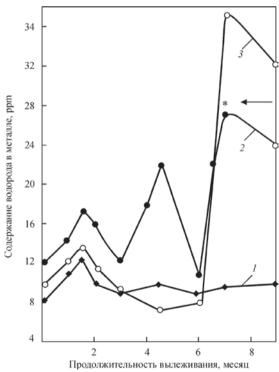
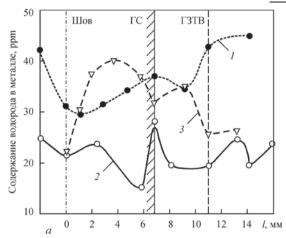


Рис. 10. Изменение концентрации водорода при  $T=300~\mathrm{K}$  в шве стали ВНС-2 в течение 9 месяцев после сварки; содержание водорода в металле шва: среднее (I); в светлой/ферритной/ (2) и темной/карбидной/ (3) полоске (на графике обозначено \* (указано стрелкой) — результат определения количества водорода методом вакуум-плавки в образце, вырезанном из зоны разрушения)



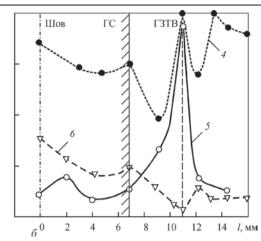


Рис. 11. Водород в сварном соединении сплава АТ-3: без термообработки (1,4) и после отжига при T=823 К (2,5) и 923 К (3,6); через 3 ч (a) и через 40 месяцев (6) после сварки: l — расстояние от оси шва; ГС — граница сплавления; ГЗТВ — граница ЗТВ [21]

нии его среднего содержания в металле (кривая 3, рис. 10). Водород-бозон вступает в химическую реакцию с углеродом, образуя с ним углеводороды — сначала СН2, потом СН4. Эти процессы (увеличение концентрации водорода в карбидной сетке, образование новых порций дилатонов, рост внутреннего давления, образование новых порций углеводородов) идут одновременно, т. е. это — синергетический процесс. Можно предположить, что в период образования новых порций углеводородов наблюдается повышенный расход водорода и на концентрационной кривой будет наблюдаться уменьшение его локальной концентрации и внутреннего давления, процесс образования новых порций углеводородов ослабевает. Локальная концентрация водорода в карбидной сетке вновь возрастает до критического уровня, когда снова активируется процесс образования углеводородов и увеличиваются зоны дефекта. Появляются микротрещины в карбидной сетке, которые в процессе вылеживания растут. На седьмом месяце вылеживания в металле трещина вырастает до критических величин. Локальная концентрация водорода в карбидной сетке достигает 32...34 ppm (кривая 1 на рис. 10). В феррите активизируется пластическая деформация, при которой ядра дислокаций захватывают водород из среды [15] и в нем тоже интенсивно увеличивается локальное содержание водорода. Феррит с таким высоким локальным содержанием водорода (28,0 ppm) (кривая 2 на рис. 10) уже склонен к водородному охрупчиванию [17]. Таким образом, в локализованной зоне сварного соединения стали ВНС-2 через 7 месяцев после сварки в процессе вылеживания создаются благоприятные условия для деструкции металла независимо от действия внешних (эксплуатационных) нагрузок, которые лишь незначительно (менее, чем на 1 месяц) ускоряют процесс разрушения.

Еще один интересный материаловедческий аспект последствий длительного вылеживания изменение финишных технологических операций, в частности, режима и характера отжига сварного соединения, выполненного до и после длительного вылеживания (рис. 11). Установлено, что если при изготовлении аргонодуговой сваркой изделие из сплава АТ-3 используется в конструкции сразу после сварки или в течение месяца после нее, то целесообразно применять неполный отжиг (T == 823 К) и этого достаточно для снятия сварочных напряжений и получения оптимальных механических характеристик сварного соединения сплава АТ-3. В таком металле не возникает опасных ситуаций, связанных со значительным локальным обогащением водородом локальных участков сварного соединения (рис. 11, а). Более того, проведение полного отжига (T = 923 K) приводит к некоторому повышению содержания водорода в металле шва и 3ТВ (кривая 3 на рис. 11, a). Однако, если сварное изделие вылеживаается в течение трех и более лет и лишь после этого используется в конструкции, то возникает необходимость проводить полный отжиг (T = 923 K), так как за время длительного вылеживания в металле сварного соединения происходят некоторые структурные изменения, сопровождающиеся перераспределением некоторых химических элементов, в частности, водорода — его содержание на границе ЗТВ-ОМ вырастает, а после проведения неполного отжига локальная концентрация водорода в этом участке достигает критических значений — до 51 ppm (кривая 5 на рис. 11, б). В работе [22] сообщается, что в сварных соединениях сплавов титана на границе ЗТВ-ОМ образуется узкая зона рекристаллизации с высокими внутренними напряжениями. Структурные компоненты этой полосы (пластины) в процессе вылеживания «обволакиваются» пленочными карбидами, оксидами, гидридами титана. В результате напряжения в этом

участке металла возрастают, а прочность падает. Коэффициент сегрегации водорода в этих участках достигал значений 3,0...3,5 [22]. В нашем же случае (рис. 11, б, кривая 5) этот коэффициент еще выше и равен 8, причем концентрационный пик острый, т. е. на этом участке металла высокая вероятность образования трещины. Характер кривых распределения водорода по сечению сварного соединения после 3 лет вылеживания (рис. 11,  $\delta$ , кривые 5 и 6) свидетельствует о том, что при неполном отжиге возникшие в этом участке металла высокие внутренние напряжения полностью не устраняются, но устраняются при полном отжиге (кривая 6 на рис. 11,  $\delta$ ). Этот факт необходимо учитывать при изготовлении сварных изделий и конструкций.

## Выводы

Предложен механизм, объясняющий процесс спонтанного газовыделения водорода в процессе вылеживания при комнатных температурах, перераспределение этой примеси в объеме изделия и изменение склонности металла сварных соединений к образованию трещин.

Установлено, что в результате вылеживания при комнатных температурах происходит не только потеря металлом части сорбированного ранее водорода в результате прохождения в сварном соединении процессов релаксации сварочных напряжений, но и перераспределение водорода внутри металла, если в нем происходят процессы фазовых (как в стали ВНС-2) или структурных (как в сплаве АТ-3) превращений, связанных с разной растворимостью водорода в отдельных фазах или структурах. Это приводит к усилению химической неоднородности, появлению участков с локальной концентрацией водорода, превышающей критические значения для этой стали или сплава и провоцирующих образование холодных трещин.

## Список литература

- 1. Макаров Э. Л. (1981) Холодные трещины при сварке легированных сталей. Москва, Машиностроение.
- 2. Лобанов Л. М., Позняков В. Д., Махненко О. В. (2013) Образование холодных трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей с пределом текучести 350...850 МПа. Автоматическая сварка, 7, 8–13.
- 3. Касаткин Б. С., Стрижиус Г. Н., Бреднев В. М., Царюк А. К. (1993) Водородная хрупкость и образование холодных трещин при сварке стали 25Х2НМФА. Там же, 8, 3–10.
- 4. Cwiek J. (2007) Hydrogen degradation of high strength weldable steels. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 20, 223–226.
- 5. Мусияченко В. Ф. (1983) Свариваемость и технология сварки высокопрочных сталей. Киев, Наукова думка.
- 6. Мусияченко В. Ф., Миходуй Л. И. (1990) Водород при сварке высокопрочной стали и его влияние на сопротивление сварных соединений образованию холодных трещин. Проблемы сварки и специальной электрометаллургии. Киев, Наукова думка, сс. 161-168.

- 7. Акулов А. И., Бельчук Г. А., Демянцевич В. П. (1977) *Tex*нология и оборудование сварки плавлением. Москва, Машиностроение.
- 8. Петров Г. Л., Миллион А. (1964) Процессы распределения водорода в сварных соединениях углеродистых и низколегированных сталей. Сварочное производство, 10, 9–11.
- 9. Гудремон Э. (1959) Специальные стали. Москва, Гостехиздат.
- 10. Смиян О. Д., Касаткин Б. С., Мусияченко В. Ф. и др. (1974) Влияние влажности флюса на распределение водорода в сварном соединении стали 14Х2ГМР. Автоматическая сварка, 5, 72-77.
- 11. Походня И. К., Швачко В. И., Смиян О. Д. и др. (1988) Исследование диффузионно-подвижного водорода в малоуглеродистых сталях методом масс-спектрометрии вторичных ионов. *Методы определения и исследования* газов в металлах. Сб. тр. V Всесоюзной конференции. Москва, Изд. ГЕОХИ им. А. А. Вернадского АН СССР, cc. 146-148.
- 12. Сміян О. Д. (2004) Водень в металі як бозонна рідина. Фізика і хімія твердого тіла, 4, 571–578.
- 13. Мусияченко В. Ф., Мельник И. С., Смиян О. Д., Буткова Е. И. (1988) Водород в высокопрочном металле шва, микролегированном РЗМ. Информационные материалы  $C \ni B$ , 1, 13–18.
- 14. Макара А. М. Лакомский В. И., Григоренко Г. М. (1968) Распределение водорода в сварных соединениях при вылеживании. Автоматическая сварка, 2, 1–5.
- 15. Сміян О. Д. (2002) Атомний механізм взаємодії речовини середовища з металом, що деформується. Фізика і хімія твердого тіла, **4**, 662–667.
- 16. Босак Л. К., Буткова Е. И., Смиян О. Д. (1988) Изучение особенностей сорбции водорода твердым металлом применительно к ЗТВ при сварке меди. Автоматическая *сварка*, **8**, 36–38.
- 17. Вайнман А. Б., Мелехов Р. К., Смиян О. Д. (1990) Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления. Киев, Наукова думка.
- 18. Смиян О. Д., Кадырева К. К. (1976) Новые методы прямого экспериментального определения коэффициентов диффузии газообразующих примесей в металлах сварных соединений. Диффузионные процессы при сварке. Сб. тр. Киев, Знание, сс. 20-21.
- 19. Тупилко В. М., Заика В. И., Коваль Г. М., Тупилко Вл. М. (1977) Импульсный характер выделения водорода из готового проката при комнатной температуре. Физико-химическая механика материалов, 13, 1, 25–27.
- 20. Аснис А. Е., Иващенко  $\hat{\Gamma}$ . А. (1978) Повышение прочности сварных конструкций. Киев, Наукова думка.
- Блащук В. Е., Буткова Е. И., Смиян О. Д. и др. (1990) Влияние отжига на характер распределения водорода в сварных соединениях сплава АТ-3. Автоматическая сварка, 11, 33-36.
- Задерий Б. А., Шевчук Т. В., Смиян О. Д. и др. (1987) Особенности переходного участка между ЗТВ и основным металлом в сварных соединениях титановых сплавов. *Там же*, **3**, 8–11.

## References

- Makarov, E.L. (1981) Cold cracks in welding of alloy steels. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- Lobanov, L.M., Poznyakov, V.D., Makhnenko, O.V. (2013) Formation of cold cracks in welded joints from high-strength steels with 350-850 MPa yield strength. The Paton Welding J., 7, 7-12.
- 3. Kasatkin, B.S., Strizhius, G.N., Bredney, V.M. et al. (1993) Hydrogen brittleness and formation of cold cracks in welding of 25Kh2NMFA steel. Avtomatich. Svarka, 8, 3-10.
- 4. Cwiek, J. (2007) Hydrogen degradation of high strength weldable steels. J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 20, 223-226.
- 5. Musiyachenko, V.F. (1983) Weldability and technology of welding of high-strength steels. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

- Musiyachenko, V.F., Mikhoduj, L.I. (1990) Hydrogen in welding of high-strength steel and its influence on resistance of welded joints to cold crack formation. Kiev, Naukova Dumka, 161-168 [in Russian].
- Akulov, A.I., Belchuk, G.A., Demyantsevich, V.P. (1977) Technology and equipment of fusion welding. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- 8. Petrov, G.L., Million, A. (1964) Processes of hydrogen distribution in welded joints of carbon- and low-alloy steels. *Svarochn. Proizvodstvo*, **10**, 9-11 [in Russian].
- 9. Houdremont, E. (1959) *Special steels*. Moscow, Gostekhizdat [in Russian].
- Smiyan, O.D., Kasatkin, B.S., Musiyachenko, V.F. et al. (1974) Influence of flux humidity on hydrogen distribution in welded joint of 14Kh2GMR steel. *Avtomatich. Svarka*, 5, 72-77 [in Russian].
- Pokhodnya, I.K., Shvachko, V.I., Smiyan, O.D. et al. (1988) Examination of diffusive-mobile hydrogen in low-alloy steels by method of secondary ion mass-spectrometry. *Methods of determination and study of gases in metals*. In: Proc. of 5th All-Union Conf. Moscow. Izd. A.A. Vernadskogo, GEOKhI, 145-148 [in Russian].
- 12. Smiyan, O.D. (2004) Hydrogen in metal as an ozone-free liquid. Fizyka i Khimiya Tverdogo Tila, 4, 571-578 [in Ukrainian].
- 13. Musiyachenko, V.F., Melnik, I.S., Smiyan, O.D. et al. (1988) Hydrogen in high-strength weld metal microalloyed with rare-earth metals. *In: Information documents of CMEA*, 1, 13-18 [in Russian].
- Makara, A.M., Lakomsky, V.I., Grigorenko, G.M. (1968)
   Hydrogen distribution in welded joints during ageing.
   Avtomatich. Svarka, 2, 1-5 [in Russian]. Smiyan, O.D. (2002)
   Atomic mechanism of interaction between medium

- substance and metal being deformed. Fizyka i Khimiya Tverdogo Tila, 4, 662-667 [in Russian].
- 15. Smiyan, O.D. (2002) Atomic mechanism of interaction between medium substance and metal being deformed. *Fizyka i Khimiya Tverdogo Tila*, **4**, 662-667 [in Russian].
- Bosak, L.K., Butkova, E.I., Smiyan, O.D. (1988) Examination of peculiarities of hydrogen sorption by solid metal with regard to HAZ in welding of copper. *Avtomatich. Svarka*, 8, 36-38 [in Russian].
- 17. Vajnman, A.B., Melekhov, R.K., Smiyan, O.D. (1990) Hydrogen embrittlement of components of high pressure boilers. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
- Smiyan, O.D., Kadyreva, K.K. (1976) New methods of direct experimental determination of diffusion coefficients of gasforming impurities in metals of welded joints. *In: Diffusion* processes in welding: Transact. Kiev, Znanie, 20-21 [in Russian].
- 19. Tupilko, V.M., Zaika, V.I., Koval, G.M. et al. (1977) Pulsed nature of hydrogen emission from finished steel at room temperature. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialov*, 13(1), 25-27 [in Russian].
- 20. Asnis, A.E., Ivashchenko, G.A. (1978) *Increase in strength of welded structures*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
- 21. Blashchuk, V.E., Butkova, E.I., Smiyan, O.D. et al. (1990) Effect of annealing on nature of hydrogen distribution in welded joints of AT-3 alloy. *Avtomatich. Svarka*, **11**, 33-36 [in Russian].
- 22. Zadery, B.A., Shevchuk, T.V., Smiyan, O.D. et al. (1987) Peculiarities of transition area between HAZ and base metal in titanium alloy welded joints. *Ibid.*, **3**, 8-11.

## ГАЗОВИДІЛЕННЯ ТА ПЕРЕРОЗПОДІЛ ВОДНЮ ПРИ ВИЛЕЖУВАННІ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ З РІЗНИХ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

## О. Д. СМІЯН

IE3 ім. Є. О. Патона НАН України 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: jarutka77@gmail.com

Проаналізовано результати досліджень поведінки водню в процесі вилежування зварних з'єднань різних матеріалів. Проведена градація процесів, що протікають в металі при вилежуванні та виявлено причини зниження тріщиностійкості зварних з'єднань при кімнатних температурах. Запропоновано механізм, що пояснює спонтанне виділення водню з металу в процесі вилежування, причини і наслідки цих процесів. Бібліогр. 22, табл. 2, рис. 11.

Ключові слова: вилежування, зварне з'єднання, водень, тріщиностійкість, бозон, механізм, холодна тріщина

## GAS EMISSION AND REDISTRIBUTION OF HYDROGEN IN AGING OF WELDED STRUCTURES FROM DIFFERENT METALLIC MATERIALS

## O.D. SMIYAN

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail:jarutka77@gmail.com

The results of investigations of hydrogen behavior in process of aging of welded structures of different materials were analyzed. Gradation of the processes taking place in metal at aging was carried out and reasons of reduction of crack resistances in welded joints at room temperature were found. The mechanism was proposed, which explains spontaneous hydrogen emission from metal in process of aging, reasons and consequences of these processes. 22 Ref., 2 Tabl., 11 Fig.

Keywords: aging of welded structures, hydrogen, crack resistance, boson, mechanism, cold crack

Поступила в редакцию 07.06.2018

DOI: http://dx.doi.org/10.15407/as2018.07.02

УДК. 621.791.947.2

## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА И ТЕРМООБРАБОТКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНОГО ПСЕВДО-β-ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ19

С. В. АХОНИН, В. Ю. БЕЛОУС, Р. В. СЕЛИН, Э. Л. ВРЖИЖЕВСКИЙ, И. К. ПЕТРИЧЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Титановые псевдо-β-сплавы имеют высокую прочность, достигающую 1200...1400 МПа в состаренном состоянии, а также высокую технологичность по сравнению со сплавами с псевдо-α- или (α+β)-структурой. Такие преимущества псевдо-β-титановых сплавов, характерным представителем которых является высоколегированный сплав ВТ19, делают этот класс титановых сплавов перспективным для применения в новой технике и при модернизации существующей. В работе изучалось влияние режима электронно-лучевой сварки, режимов предварительного подогрева и локальной термообработки, а также печного отжига на свойства сварных соединений псевдо-β-титанового сплава ВТ19, выполненных электронно-лучевой сваркой. Изменение скорости электронно-лучевой сварки сплава ВТ19 не позволяет в существенных пределах изменить соотношение между а- и β-фазами в металле шва и зоны термического влияния. Электронно-лучевая сварка в сочетании с предварительным подогревом позволяет регулировать соотношение между α- и β-фазами в металле сварного соединения и снизить содержание β-фазы в металле шва сплава ВТ19 с 91 до 53 %, а также повысить прочность сварных соединений с 876 до 937 МПа. Библиогр. 11, табл. 2, рис. 6.

Ключевые слова: титан, титановые сплавы, псевдо-β-титановые сплавы, электронно-лучевая сварка, структура, свойства, локальная термическая обработка, отжиг, прочность

Основными преимуществами современных псевдо-β-сплавов титана является их высокая технологичность, по сравнению со сплавами с псевдо- $\alpha$ - или ( $\alpha$ + $\beta$ )-структурой, а также их высокие прочностные свойства. Такие преимущества псевдо-β-титановых сплавов, характерным представителем которых является высоколегированный сплав BT19, делают этот класс титановых сплавов перспективным для применения в новой технике и при модернизации существующей [1]. Псевдо-β-титановый сплав VST5553 (Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr) уже используют в самолетах производства фирмы Boeing [2]. Важной задачей является разработка технологии сварки и режимов термической обработки полученных соединений, которые должны обеспечить оптимальный фазовый состав и уровень прочности не менее 0,90...0,95 прочности основного материала. Для этого требуется применение дополнительных технологических операций, таких как предварительный подогрев и послесварочная термообработка [3]. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) позволяет совместить такие технологические операции как сварка и термическая обработка, что позволит обеспечить высокое качество получаемых соединений [4, 5].

Целью работы являлось определение влияния режима ЭЛС, режимов предварительного подогрева и локальной термообработки, а также печного отжига на свойства сварных соединений псевдо-β-титанового сплава ВТ19, выполненных ЭЛС.

Выполняли сварку образцов размером 200×100×8 мм. ЭЛС осуществляли на модернизированной установке УЛ-144, оснащенной энергоблоком ЭЛА 60/60. Предварительный нагрев проводили до температуры 400 °C, контроль температуры осуществлялся с помощью термопар. прикрепленных с корневой стороны шва. Подробно методика предварительного подогрева описана в работе [6]. Схема выполнения предварительного подогрева и локальной термической обработки (ЛТО) представлена на рис. 1. Ширина зоны об-

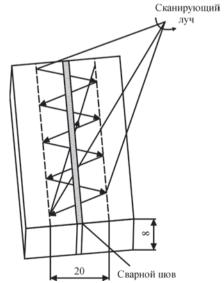


Рис. 1. Схема сканирования сварного соединения псевдо-β-титанового сплава ВТ19, при локальной электронно-лучевой термообработке (750 °C, 10 мин)

© С. В. Ахонин, В. Ю. Белоус, Р. В. Селин, Э. Л. Вржижевский, И. К. Петриченко, 2018



Рис. 2. Сварное соединение псевдо-в-титанового сплава ВТ19, выполненное ЭЛС со стороны корня шва работки составляла 20 мм. Мощность электронно-

го луча в процессе ЛТО составляла около 3 кВт, и подвергалась корректировке для поддержания температуры в зоне обработки на уровне 750 °C.

Сварку выполняли на режиме:  $U_{\text{vck}} = 60 \text{ kB}$ ,  $I_{\text{пуча}} = 120 \text{ мА. Соединения выполнялись на двух}$ скоростях сварки 7 и 11 мм/с.

Часть сварных соединений перед сваркой подвергалась предварительному подогреву до температуры 400 °C. Сварные соединения, выполненные с предварительным подогревом после сварки, подвергалась ЛТО в вакуумной камере по режиму, предусматривающему нагрев до температуры 750 °С и выдержку 10 мин. Часть соединений после сварки подвергалась печному отжигу, предусматривающему нагрев до температуры 750 °C, и выдержку 1 ч и последующее охлаждение с печью. Внешний вид образцов сварных соединений приведен на рис. 2. Во всех образцах, сваренных ЭЛС, по данным рентгеновского контроля и анализу структуры отсутствуют такие дефекты, как поры, непровары, трещины, неметаллические включения.

Исследования структуры осуществлялись с помощью оптического микроскопа «NEOFOT-30», оснащенного приставкой для цифрового фотографирования. Определение количества β-фазы в металле шва, ЗТВ и основном металле выполнялось экспериментальным путем на микрошлифах. Для этого оценивалось соотношение светлых участков структуры, соответствующих β-фазе, и темных участков структуры, соответствующих α-фазе, на сканированных микрошлифах.

Механические свойства основного металла и полученных сварных соединений приведены в табл. 1.

Основной металл сплава ВТ19 содержит равноосные полиэдрические зерна с равномерно распределенными по телу зерна дисперсными выделениями  $\alpha$ -фазы (рис. 3, a). Размер  $\alpha$ -частиц составляет 1...2 мкм и меньше. Количество β-фазы в основном металле в состоянии после проката составляет 44 % (табл. 2).

Проведенные исследования структуры соединений позволили сделать вывод, что в металле шва, выполненного со скоростью сварки 7 мм/с, преобладают крупные, равноосные полиэдрические β-зерна. Металл шва состоит практически из чистой β-фазы (рис. 2, б) с волосовидными границами, количество β-фазы 99 %.

Участок ЗТВ, примыкающий к шву, претерпевший полное полиморфное превращение – не широкий, его ширина составляет 2...3 зерна. Участок полного полиморфного превращения состоит из практически чистой β-фазы (рис. 3, в).

Прочность сварных соединений находится на уровне 91 %, при этом их структура неравновесная и требует применения термообработки для получения однородной равномерной структуры.

Металл шва сплава ВТ19, выполненного со скоростью сварки 11 мм/с, также состоит из равноосных и вытянутых в направлении теплоотвода зерен β-фазы, границы которых проявляются на фоне дендритной структуры (рис. 3, г), в некоторых зернах металла шва встречаются немногочисленные дисперсные фазовые выделения.

Таблица 1. Свойства сварных соединений титанового сплава ВТ19, выполненных ЭЛС

Номер образца	Тип образца; скорость сварки; термообработка	$\sigma_{_{\rm B}}$ , МПа	σ <sub>т</sub> , МПа	δ, %	ψ, %	<i>КСV</i> , Дж/см <sup>2</sup>
1	Основной металл; после проката	958	887	12,0	47,0	27
2	Сварное соединение; 7 мм/с	876	842	11,3	36,8	29
3	Сварное соединение; 11 мм/с,	891	847	10,0	45,9	28
4	Сварное соединение; 7 мм/с; предварительный подогрев 400 °C	893	879	12,0	47,0	21
5	Сварное соединение; 7 мм/с; предварительный подогрев 400 °C, ЛТО 750 °C, 10 мин	937	868	5,3	19,0	20
6	Сварное соединение; 7 мм/с; отжиг 750 °C, 1 ч	1027	986	12,0	31,5	26
7	Сварное соединение; 11 мм/с; отжиг 750 °C, 1 ч	1024	985	8,7	30,6	27
8	Сварное соединение; 7 мм/с; предварительный подогрев 400 °C, закалка в воду и старение 450 °C	1285	1234	4,7	20,6	23

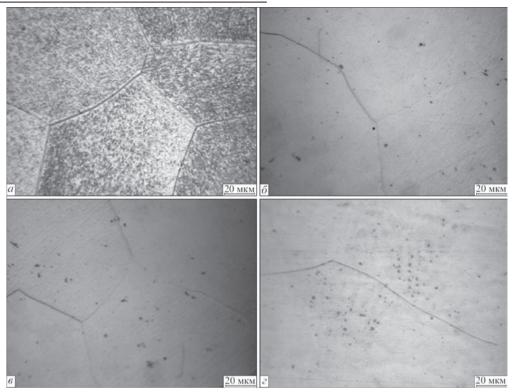


Рис. 3. Микроструктура сварного соединения титанового сплава BT19, выполненного ЭЛС в состоянии после сварки: a — основной металл;  $\delta$  — металл шва,  $v_{\rm cB}$  = 7 мм/с;  $\epsilon$  — металл ЗТВ,  $v_{\rm cB}$  = 7 мм/с;  $\epsilon$  — металл шва,  $v_{\rm cB}$  = 11 мм/с

Количество β-фазы незначительно снизилось и составляет 92 %. Прочность сварного соединения находится на уровне 94 % прочности основного металла в состоянии проката.

Следует отметить, что микроструктура сварного соединения сплава ВТ19, выполненного со скоростью  $v_{\rm cr} = 11$  мм/с аналогична микроструктуре сварного соединения со скоростью  $v_{cB} = 17 \text{ мм/c}$ несмотря на разную скорость сварки. Таким образом, после сварки в металле шва сварных соединений содержится в-фазы на уровне 92...99 %, изменение скорости сварки не позволяет в существенных пределах изменить соотношение между α- и β-фазами.

Металл шва сплава ВТ19, выполненного со скоростью сварки 11 мм/с, с применением предварительного подогрева 400 °C состоит из вытянутых в направлении теплоотвода и равноосных зерен β-фазы на фоне дендритной структуры. При применении предварительного подогрева и в результате уменьшения скорости охлаждения сварного соединения во многих зернах металла шва фиксируются в значительном количестве неравномерно распределенные мелкодисперсные выделения другой фазы (рис. 4, а) размеры которой составляют менее 1 мкм (рис. 4, б). Количество β-фазы в результате применения предварительного подогрева значительно снизилось и составляет 60 %. Это позволяет сделать вывод об эффективности локального предварительного подогрева.

В металле шва, выполненного ЭЛС с применением ЛТО (750 °C, 10 мин), количество мелкодисперсных выделений другой фазы увеличивается (рис. 5, a). Количество  $\beta$ -фазы в результате применения предварительного подогрева значительно снизилось и составляет 53 %. Прочность сварных

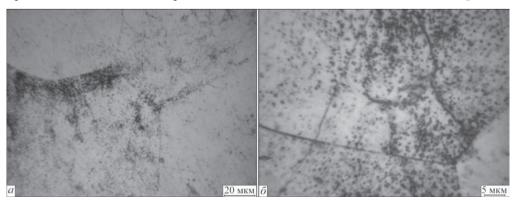


Рис. 4. Микроструктура металла шва сварного соединения титанового сплава ВТ19, выполненного ЭЛС в состоянии после сварки, со скоростью  $v_{\rm cB}$  = 7 мм/с с применением предварительного подогрева 400 °C

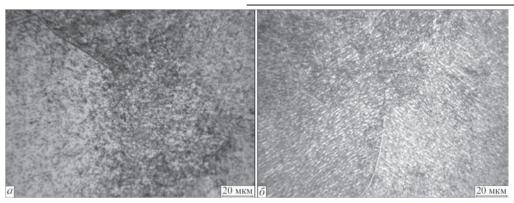


Рис. 5. Микроструктура металла шва сварного соединения титанового сплава BT19, выполненного ЭЛС со скоростью  $v_{\rm cs}$  = = 7 мм/с с применением предварительного подогрева 400 °C: a — в состоянии после ЛТО 750 °C, 10 мин;  $\delta$  — после печного отжига 750 °C, 1 ч

соединений находится на уровне 99 % прочности самого сплава. Это позволяет сделать вывод, что после ЛТО происходит снижение количества метастабильной β-фазы в металле шва в большей степени по сравнению с ЭЛС с одним лишь предварительным подогревом 400 °C. Дальнейший рост прочности сварных соединений ограничивается прочностью основного металла. Таким образом, применение ЭЛС в сочетании с предварительным подогревом и ЛТО позволяет получить равнопрочные сварные соединения титанового сплава ВТ19.

Для сравнения часть сварных соединений, выполненных со скоростью сварки 7 мм/с, подвергали печному отжигу при температуре 750 °C в течение 1 ч с последующим охлаждением с печью. Исследования показали, что в этом случае металл шва состоит из равноосных и вытянутых в направлении теплоотвода первичных β-зерен, подвергшихся в результате отжига распаду с образованием равномерной однородной двухфазной структуры (рис. 5, б), состоящей из частиц а- и β-фаз. Частицы α-фазы имеют пластинчатую морфологию, длина α-пластин составляет 1...5 мкм, при толщине 0,5...0,8 мкм. Количество β-фазы в результате применения печного отжига минимально для сварных соединений и находится на уровне 35 %. Прочность сварных соединений в этом случае максимальна и составляет 105...107 % прочности сплава в состоянии после проката. Следует отметить, что сплав ВТ19 позволяет применять термические обработки при более низких температурах по сравнению с высокопрочными двухфазными сплавами, такими как ВТ23, Т110 или T120 [7]. Так, температура отжига 750 °C, что ниже температуры ЛТО 850 °C или температуры рекомендованного вакуумного отжига 900 °C для сплава Т120.

Таким образом, применение технологии ЭЛС в сочетании с предварительным подогревом и ЛТО позволяет получить равнопрочные сварные соединения титанового сплава ВТ19, в то же время для того, чтобы получить однородную равномерную структуру во всех зонах сварного соединения, необходимо применение печного отжига при температуре 750 °C в течение 1 ч.

Поскольку прочность псевдо-β-сплава ВТ19 в деформированном и упрочненном состоянии может превышать 1500 МПа [8], а для высокопрочных титановых сплавов и для псевдо-β-сплава ВТ19 закалка в воду с последующим старением является эффективной упрочняющей термообработкой [9–11], поэтому изучали возможность повысить прочность соединений, выполненных ЭЛС. С этой целью часть образцов номера 2 (табл. 1) подвергалась дополнительной упрочняющей термообработке — закалке, предусматривающей нагрев до 800 °C, выдержку 1 ч при температуре 800° С, закалку в воду, старение при температуре 450 °С 4 ч.

Таблица 2. Количество β-фазы в ОМ и металле шва сварных соединений титанового сплава ВТ19, выполненных ЭЛС

Номер образца	Тип образца; скорость сварки; режим термообработки	Количество β-фазы, %
1	Основной металл	44
2	Сварное соединение; 7 мм/с	99
3	Сварное соединение; 11 мм/с	92
4	Сварное соединение; 7 мм/с; предварительный подогрев 400 °C	60
5	Сварное соединение; 7 мм/с, предварительный подогрев 400 °C, ЛТО 750 °C, 10 мин	53
6	Сварное соединение; 7 мм/с; отжиг 750 °С, 1 ч	34
7	Сварное соединение; 11 мм/с; отжиг 750 °C, 1 ч	37

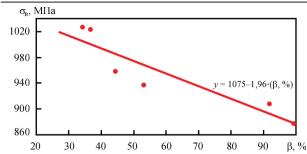


Рис. 6. Зависимость прочности соединений, выполненных ЭЛС, от количества β-фазы в металле шва титанового сплава ВТ19

Исследования структуры полученных соединений позволили сделать вывод, что после упрочняющей термической обработки, состоящей из закалки и последующего старения, в металле шва и ЗТВ этого сварного соединения образуются мелкодисперсные продукты распада, размер которых, в основном, составляет 1,0...1,5 мкм.

Проведенные исследования позволили сделать вывод, что в результате закалки и последующего старения в сварных соединениях сплава ВТ19, выполненного ЭЛС, формируется самая (из исследуемых) мелкодисперсная внутризеренная структура металла шва, в которой размер продуктов распада чаще всего не превышает 1 мкм, в ЗТВ размер составляет 1...1,5 мкм. Мелкодисперсная структура во всех зонах сварного соединения сплава ВТ19 обеспечивает ему высокую прочность, достигающую  $\sigma_{\rm p} = 1285 \ {\rm M}\Pi {\rm a}$ , при высоких показателях ударной вязкости  $KCV = 23 \text{ Дж/см}^2$ .

Необходимо отметить, что для сварных соединений титанового псевдо-β-сплава ВТ19 эффективной упрочняющей термообработкой является закалка в воду с последующим старением, которая обеспечивает прочность соединений на уровне 130 % прочности сплава в состоянии проката.

Исследования микроструктуры выполненных сварных соединений и их сопоставление с результатами оценки механических свойств соединений позволили установить обратно пропорциональную зависимость прочности соединений титанового псевдо-β-сплава ВТ19, выполненных ЭЛС, от количества β-фазы в металле шва (рис. 6). Эта зависимость имеет вид  $\sigma_{\rm p} = 1072 - 1,96 \cdot (\beta, \%)$ , согласно которой минимальные значения прочности сварных соединений ( $\sigma_{_{\rm R}} = 881~{\rm M}\Pi{\rm a}$ ) фиксируются при содержании β-фазы 99 %, а максимальные  $(\sigma_{_{\rm R}} = 1054 \ {\rm M}\Pi a)$  при содержании  $\beta$ -фазы 25 %.

## Выводы

1. Изменение скорости ЭЛС сплава ВТ19 не позволяет в существенных пределах изменить соотношение между о- и β-фазами в металле шва и ЗТВ, структура соединения, выполненного со скоростью 11 мм/с аналогична структуре соединения, выполненного со скоростью 7 мм/с.

- 2. ЭЛС в сочетании с предварительным подогревом позволяет регулировать соотношение между α- и β-фазами в металле сварного соединения и снизить содержание β-фазы в металле шва сплава ВТ19 с 91 до 53 %, повысить прочность сварных соединений с 876 до 937 МПа и в результате обеспечить равнопрочность сварных соединений основному металлу.
- 3. Для формирования однородной структуры, повышения прочности основного металла и сварных соединений до уровня 1020 МПа, полного распада метастабильных фаз соединения сплава ВТ19 необходимо подвергать печному отжигу при температуре 750 °C в течение 1 ч, в результате которого уровень прочности соединений повышается до 105...107 % прочности сплава после проката.
- 4. Закалка в воду с последующим старением обеспечивает высокие значения прочности соединений сплава ВТ19 на уровне 1285 МПа, при этом в металле шва и ЗТВ формируется мелкодисперсная внутризеренная структура, в которой размер частиц α-фазы не превышает 1,5 мкм.

## Список литературы

- 1. Каблов Е. Н. (2012) Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. Авиационные материалы и технологии, **S**, 7 - 17.
- 2. Хорев А. И. (2012) Сверхпрочный титановый сплав ВТ19. Технология машиностроения, 6, 5-8.
- 3. Гуревич С. М., Замков В. Н., Блащук В. Е. и др. (1986) Металлургия и технология сварки титана и его сплавов. Киев, Наукова думка.
- Лясоцкая В. С., Лысенков Ю. Т., Бирюков И. М. и др. (1981) Улучшение свойств сварных соединений сплавов ВТ9 путем локальной термической обработки электронным лучом. Сварочное производство, 11, 19–20.
- 5. Лясоцкая В. С., Лысенков Ю. Т. Герасименко А. В. и др. (1985) Влияние локальной термической обработки на структуру и свойства сварных соединений сплава ВТ6ч. Авиационная промышленность, 11, 57–59.
- 6. Вржижевский Э. Л., Сабокарь В. К., Ахонин С. В., Петриченко И. К. (2013) Влияние локальной термической обработки при ЭЛС титановых сплавов с силицидным упрочнением на механические свойства металла швов. Автоматическая сварка, **2**, 21–24.
- 7. Ахонин С. В., Белоус В. Ю., Селин Р. В. и др. (2015) Структура и свойства сварных соединений высокопрочных двухфазных титановых сплавов. Там же, 8, 16–19.
- 8. Хорев А. И. (2009) Разработка конструкционных титановых сплавов для изготовления деталей узлов авиакосмической техники. Сварочное производство, 3, 13-23.
- Gavze, A. L. Petrova, E. N. Chusov, S. Y. Yankov, V. P. (2009) Investigation of properties of titanium alloys with mechanically stable beta-structure for body armor application. Techniczne Wyroby Włókiennicze, 17, 2/3, 54–57
- 10. Попов А. А., Илларионов А. Г., Оленева О. А. (2010) Структура и свойства сварных соединений из высоколегированного титанового сплава после термической обработки. Металловедение и термическая обработка металлов, 10, 23–27.
- Luetjering G., Albrecht J. (eds) (2003) Ti-2003 Science and Tecnology: Proceedings of the 10th World Conference on Titanium, 13–18 July 2003, Hamburg, Germany, pp. 385, 2643, 3035.

#### References

- 1. Kablov, E.N. (2012) Strategic directions of development of materials and technologies of their recycling from the period up to 2030. Aviats. Materialy i Tekhnologii, S, 7-17 lin Russianl
- 2. Khorev, A.I. (2012) Super resistant titanium alloy VT19. *Tekhnologiya Mashinostr.*, **6**, 5-8 [in Russian].
- 3. Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Blashchuk, V.E. et al. (1986) Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
- 4. Lyasotskaya, V.S., Lysenkov, Yu.T., Biryukov, I.M. et al. (1981) Improvement of properties of welded joints of VT9 alloys by local electron beam heat treatment. Svarochn. Proizvodstvo, 11, 19-20.
- Lyasotskaya, V.S., Lysenkov, Yu.T., Gerasimenko, A.V. et al. (1985) Influence of local heat treatment on structure and properties of welded joints of BT6ch alloy. Aviats. Promyshlennost, 11, 57-59 [in Russian].
- Vrzhizhevsky, E.L., Sabokar, V.K., Akhonin, S.V. et al. (2013) Influence of local heat treatment at EBW of titanium

- alloys with silicide strengthening on mechanical properties of weld metal. The Paton Welding J., 2, 20-23.
- Akhonin, S.V., Belous, V.Yu., Selin, R.V. et al. (2015) Structure and properties of EB- and TIG-welded joints of high-strength two-phase titanium alloys. *Ibid.*, **8**, 14-17.
- 8. Khorey, A.I. (2009) Development of structural titanium alloys for manufacture of components of aerospace engineering. Svarochn. Proizvodstvo, 3, 13-23 [in Russian].
- 9. Gavze, A.L., Petrova, E.N., Chusov, S.Y., Yankov, V.P. (2009) Investigation of properties of titanium alloys with mechanically stable beta-structure for body armor application. *Techniczne Wyboby Wlokiennicze*, 17(2/3), 54-
- 10. Popov, A.A., Illarionov, A.G., Oleneva, O.A. (2010) Structure and properties of welded joints from high titanium alloy after heat treatment. Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov, 10, 23-27 [in Russian].
- 11. Luetjering, G., Albrecht, J. (eds) (2003) Ti-2003 Science and Tecnology: Proceedings of the 10th World Conference on Titanium, 13–18 July 2003, Hamburg, Germany, pp. 385, 2643, 3035.

## ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВЕ ЗВАРЮВАННЯ ТА ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ВИСОКОМІЦНОГО ПСЕВДО-В-ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ВТ19

С. В. АХОНІН, В. Ю. БІЛОУС, Р. В. СЕЛІН, Е. Л. ВРЖИЖЕВСЬКИЙ, І. К. ПЕТРИЧЕНКО

IEЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Титанові псевдо-β-сплави мають високу міцність, яка досягає 1200 ... 1400 МПа після старіння, а також високу технологічність у порівнянні зі сплавами з псевдо- $\alpha$ - або ( $\alpha + \beta$ )-структурою. Такі переваги псевдо- $\beta$ -титанових сплавів, характерним представником яких є високолегований сплав ВТ19, роблять цей клас титанових сплавів перспективним для застосування в новій техніці і при модернізації існуючої. В роботі вивчався вплив режиму електронно-променевого зварювання, режимів попереднього підігріву і локальної термообробки, а також пічного відпалу на властивості зварних з'єднань псевдо-β-титанового сплаву ВТ19, виконаних електронно-променевим зварюванням. Зміна швидкості електронно-променевого зварювання сплаву ВТ19 не дозволяє в істотних межах змінити співвідношення між α- і β-фазами в металі шва і зоні термічного впливу. Електронно-променеве зварювання в поєднанні з попереднім підігрівом дозволяє регулювати співвідношення між α- і β-фазами в металі зварного з'єднання і знизити вміст β-фази в металі шва сплаву ВТ19 з 91 до 53 %, а також підвищити міцність зварних з'єднань з 876 до 937 МПа. Бібліогр. 11, табл. 2, рис.6.

Kл ю ч о в i с л о в a: титан, титанові сплави, псевдо-eta-титанові сплави, електронно-променеве зварювання, структура, властивості, локальна термічна обробка, відпал, міцність

## ELECTRON BEAM WELDING AND HEAT TREATMENT OF WELDED JOINTS OF HIGH-STRENGTH PSEUDO-β-TITANIUM ALLOY VT19

S.V. AKHONIN, V.YU. BELOUS, R.V. SELIN, E.L. VRZHYZHEVSKY, I.K. PETRICHENKO

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail:office@paton.kiev.ua

Titanium pseudo-β allovs have high strength reaching 1200-1400 MPa in aged state as well as high fabricability in comparison with alloys with pseudo- $\alpha$  or  $(\alpha+\beta)$  structure. Such advantages of pseudo- $\beta$ -titanium alloys, typical representative of which is high-alloy VT19, make this class of titanium alloys perspective for application in new equipment and during modernization of existing one. The paper has studied the effect of mode of electron beam welding, modes of pre-heating and local heat treatment as well as furnace annealing on properties of welded joints of pseudo-β-titanium alloy VT19 produced by electron beam welding. Variation of rate of electron beam welding of alloy VT19 does not allow changing relation between  $\alpha$ - and  $\beta$ -phases within the significant limits in weld metal and heat affected zone. Electron beam welding in combination with pre-heating allows regulating the relation between  $\alpha$ - and  $\beta$ -phases in welded joint metal and reduce content of  $\beta$ -phase in weld metal of alloy VT19 from 91 to 53% as well as rise strength of welded joints from 876 to 937 MPa. 11 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: titanium, titanium alloys, pseudo-β-titanium alloys, electron beam welding, structure, properties, local heat treatment, annealing, strength

Поступила в редакцию 01.06.2018

DOI: http://dx.doi.org/10.15407/as2018.07.03

## УДК 621.791.75

## К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРОЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗОНЕ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ

## А. Д. РАЗМЫШЛЯЕВ<sup>1</sup>, П. А. ВЫДМЫШ<sup>2</sup>, М. В. АГЕЕВА<sup>3</sup>

 $^{1}\Gamma BУ3$  «Приазовский государственный технический университет». 87500, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7. E-mail: razmyshljaev@gmail.com <sup>2</sup>ООО «Метинвест-Промсервис». 87500, г. Мариуполь, Никопольский просп., 113-а. E-mail: pstukmu@gmail.com <sup>3</sup>Донбасская государственная машиностроительная академия. 84313, г. Краматорск, ул. Академическая, 72. E-mail: maryna ah@ukr.net

Экспериментально установлено, что нормальная компонента индукции вдоль боковых поверхностей стержней устройства ввода поперечного магнитного поля распределена практически равномерно (имеет одинаковые значения). Некоторое повышение значений этой компоненты индукции наблюдается только в зонах у торцов стержней и у катушек, размещенных на этих стержнях. Для изучения распределения индукции поперечного магнитного поля в зоне сварочной ванны (у поверхности основного металла) предложено использовать известное положение о том, что между строением магнитостатического и электростатического полей имеется аналогия. На этой основе предложена методика, позволяющая рассчитать распределение поперечной и продольной компонент индукции магнитного поля, генерируемого устройством ввода поперечного магнитного поля, у поверхности свариваемой пластины из немагнитных материалов. При этом используются известные уравнения электростатики. В расчетах принято, что заряды электростатического поля на боковых поверхностях и торцах стержней устройства ввода поперечного магнитного поля размещены равномерно. Показано, что предложенный метод обеспечивает удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных. Библиогр. 8, рис. 6.

Ключевые слова: поперечное магнитное поле, индукция, закон Кулона, напряженность электростатического

Использование поперечного магнитного поля (ПОМП) при дуговой сварке и наплавке позволяет управлять геометрией швов (валиков), повышать коэффициент расплавления электрода и измельчать структуру швов (наплавок) [1–4].

Изучение строения ПОМП в зоне сварочной ванны имеет теоретическое и практическое значение. Однако нет простых методик для расчета индукции магнитного поля, генерируемого двухстержневыми системами устройств ввода (УВ) ПОМП в зоне сварочной ванны.

Известная расчетная программа ANSYS позволяет определить значения индукции, генерируемой УВ ПОМП в этой зоне. Однако ее использование затруднено из-за чрезмерной сложности [5]. Чрезмерную сложность также имеет расчетная методика, основанная на использовании метода вторичных источников, когда также необходимо численное решение задачи методом конечных элементов [6, 7]. Необходима разработка более простой в использовании расчетной методики.

По литературным данным [6] имеется аналогия между строением магнитного поля, генерируемого УВ ПОМП, и строением электростатического поля, если бы последнее поле генерировалось аналогичными заряженными телами. По данным, приведенным, в частности, в работе [6], индукция B и напряженность электрического поля E,

генерируемые соответственно электромагнитами и заряженными телами, в определенной точке окружающего пространства складываются как векторы. Математический аппарат для описания строения электростатического поля разработан более полно, чем для электромагнитного поля. Следует отметить, что применительно к расчету индукции магнитного поля, генерируемого УВ ПОМП, этот метод не использовался.

Целью настоящей работы является анализ возможности моделирования стационарного магнитного поля, генерируемого УВ ПОМП, стационарным электростатическим полем в зоне ванны при дуговой сварке и наплавке.

Ниже приведена разработанная расчетная методика моделирования пространственного распределения индукции управляющего ПОМП в зоне сварочной ванны путем использования уравнений электростатики.

Исследовали особенности строения магнитного поля, генерируемого одним стержнем с обмоткой. Сечение стержня из низкоуглеродистой стали составляло  $F_c = 26 \times 16$  мм, длина стержня  $L_{cr} = 130$  мм. На стержне размещали обмотку из медного провода диаметром 1,0 мм, с количеством витков W = 100. Обмотка была четырехслойной и имела высоту 30 мм. Обмотку располагали по центру длины стержня.

© А. Д. Размышляев, П. А. Выдмыш, М. В. Агеева, 2018

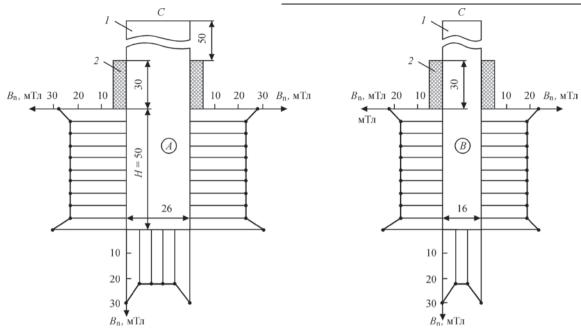


Рис. 1. Распределение индукции  $B_{_{\Pi}}$  вдоль поверхностей стержня (W = 100,  $I_{_{\rm K}}$  = 8 A): I — стержень; 2 — обмотка

Измеряли нормальную компоненту индукции  $B_{\rm n}$  вдоль боковых поверхностей стержня, а также компоненту индукции  $B_{\rm n}$  нормальную к торцу стержня на участке ниже обмотки. В катушке пропускали постоянный ток  $I_{\kappa} = 8$  А. Измерения индукции  $B_n$  выполняли миллитесламетром типа 43205 с датчиком Холла, имевшем измерительную базу 0,9×0,9 мм. Данные измерений приведены на рис. 1. Данные показали, что имеет место «всплеск» индукции  $B_n$  только у торца обмотки и внизу у торца стержня. «Всплеск» индукции  $B_{\rm n}$ наблюдался на участках длиной примерно 5 мм, а по всей длине стержня и у его торца индукция  $B_{\rm n}$  распределена достаточно равномерно. Касательная компонента индукции магнитного поля на всех поверхностях стержня практически была

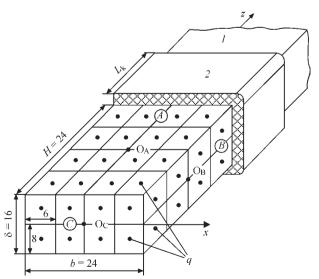


Рис. 2. Схема распределения зарядов q на поверхностях A, B, C стержня (1) ниже уровня катушки (2): H, b,  $\delta$  — размеры участка стержня (м);  $L_{\kappa}$  — длина катушки (м); (точки — места расположения зарядов q)

равна нулю. Аналогичные данные были получены при использовании стержней сечением 26×32 мм и 32×52 мм. При уменьшении расстояния от катушек до торцов стержней от 60 до 20 мм характер изменения компонент индукции соответствовал установленному для стержня сечением 26×16 мм (рис. 1). Это положение сохранялось и для стержней, выполненных в виде набора из пластин электротехнической стали Э42 толщиной 0,5 мм.

Для разработки расчетной методики намагниченный участок стержня (ниже обмотки) заменяли диэлектрическим телом, которое имеет заряды на своей поверхности. Размеры такого диэлектрического тела такие же, как и рассматриваемый участок стержня электромагнита. При этом заряды на поверхностях (A, B, C) указанного тела распределяли равномерно.

В качестве примера на рис. 2 приведено разбиение поверхностей на участки одинаковой площади, в центре которых размещены заряды q. Необходимо, чтобы все малые участки (после разбиения) на всех боковых поверхностях и торцах стержней (A, B, C) на рис. 2) имели одинаковую площадь. Целесообразно начинать разбиение на участки площади торцов стержней (C). Достаточным количеством участков на поверхностях С является 8...12. Чем больше количество участков, тем точнее будут в дальнейшем результаты вычислений, однако при этом возрастает объем вычислительной работы.

Как известно [6], по закону Кулона напряженность электростатического поля E от заряда q в точке на расстоянии R от заряда:

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 R^2},\tag{1}$$

где  $\epsilon_0$  — электрическая =  $8.85\cdot 10^{-12}~\Phi/\mathrm{M}.$ постоянная;  $\varepsilon_0 =$ 

Поскольку  $q/(4\pi\epsilon_0)$  = const, то в формуле (1), для оценки (расчета) E, генерируемого зарядом на боковой поверхности УВ ПОМП, можно принять любое численное (удобное для расчетов) значение  $q/(4\pi\varepsilon_0) = K$ .

Тогда формула (1) примет вид:

$$E = \frac{K}{R^2}. (2)$$

Расчет по формуле (2) удобен, поскольку в конечном итоге для оценки характера распределенности напряженности поля  $E\left(E_{x},E_{y},E_{z}\right)$  вдоль какого-либо направления (осей X, Y, Z) необходимо выражать в относительных единицах, например, через параметр  $E_{\rm r}/E_{\rm r\,max}$ . В этом случае распределение компоненты поля электростатического  $E_x/E_{x\,\mathrm{max}}$ , можно сравнить с распределенностью компонент индукции поля магнитного, генерируемого реальной конструкцией УВ ПОМП  $(B_x/B_{x\,\mathrm{max}})$ . Кроме того, значения компонент поля E $(E_{y}, \hat{E}_{y}, \hat{E}_{z})$  вдоль какого-либо направления позволяют численно (в делениях, единицах, полученных при расчете) оценить влияние размеров и расположения стержней УВ ПОМП в пространстве, наклона стержней к вертикальной оси на значение компонент поля  $E\left(E_{y},E_{y},E_{z}\right)$ , и тем самым позволяет определить оптимальные параметры УВ ПОМП, обеспечивающие максимальные значения компонент поля  $E_{x}, E_{y}, E_{z}$  в определенной точке (аналогов значений компонент магнитного поля  $B_{y}, B_{y}, B_{z}$  в точке).

Ранее установлено [8], что строение управляющего ПОМП, генерируемого различными конструкциями УВ П-образного типа в относительных единицах не зависит от того, как замыкаются магнитные силовые линии в верхней части двухстержневых систем УВ ПОМП. Это явилось основанием для моделирования магнитного поля электростатическим полем для УВ ПОМП из двух

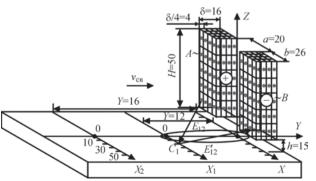


Рис. 3. Схема к расчету вектора E в точке  $C_1$  у поверхности пластины

стержней (с обмотками), не связанных между собой перемычкой вверху.

В расчетах рассматривали нижнюю часть двух стержней сечением  $F_c = b \times \delta = 26 \times 16$  мм, длиной H = 50 мм в зоне ниже катушек. На поверхностях стержней размещали точечные заряды одинаковой величины (на рис. 3 условно показаны в виде точек заряды, расположенные на вертикальных поверхностях каждого из двух стержней, но аналогичные заряды размещены и на нижних торцах стержней).

Векторы E каждого заряда раскладываются в пространстве на три составляющие, направленные вдоль координатных осей *ОХ*, *ОZ*, *ОY* через косинусы направляющих углов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  вектора Eотносительно этих осей (рис. 4).

Приняли, что из каждого заряда на поверхности A стержня — положительный полюс (+) «выходит» вектор напряженности поля E, а вектор E'«входит» в такую же точку стержня B — отрицательный полюс (-) (см. рис. 3).

Для каждого вектора напряженности можно составить уравнения:

$$E_{Y_i} = E \cos \beta = E_i \frac{y_i}{R_i}, \tag{3}$$

$$E_{Z_i} = E\cos\gamma = E_i \frac{z_i}{R_i},\tag{4}$$

$$E_{X_i} = E \cos \alpha = E_i \frac{x_i}{R_i}, \tag{5}$$

где E — значение напряженности поля в рассматриваемой точке,

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon_r R^2},\tag{6}$$

 $y_i, z_i, x_i$  — длина проекции вектора E на соответствующую ось, м;  $R_i$  — расстояние от заряда  $q_i$  до рассматриваемой точки  $C_1$ , м.

В дальнейшем расчет выполняли по формуле (2), где K — постоянная величина:

$$K = \frac{q_i}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon_{\rm r}} = \text{const.}$$
 (7)

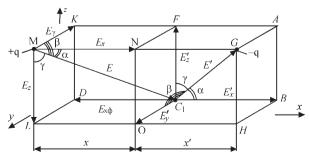


Рис. 4. Схема разложения вектора E в пространстве на его компоненты, параллельные осям X, Y, Z

Для получения численных значений векторов  $E_{y}$ ,  $E_{y}$ ,  $E_{z}$  в данной точке пространства (в частности, в точке  $C_1$ ) выполняли суммирование всех компонент  $E'_{xi}$ ,  $E'_{yi}$ ,  $E'_{zi}$  в этой точке от каждого заряда  $q_i$ , размещенного на поверхностях A и Bстержней и на торце C.

При этом тела (стержни A и B на рис. 3), считаются условно непрозрачными, т.е. необходимо учитывать действие только тех зарядов q на поверхностях A, B и C стержней, которые «видны» из точки  $C_1$ .

Для оценки возможности практического применения предложенной методики расчета необходимо сопоставить расчетные данные с соответствующими экспериментальными данными. Для этого исследовали распределение компонент  $B_z$ ,  $B_x$  магнитных полей, генерируемых реальными УВ ПОМП. В исследованиях использовали электромагниты с сечением стержней из низкоуглеродистой стали  $F_c = b \times \delta = 26 \times 16$  мм, длиной L = 130 мм c обмотками длиной l = 30 мм. Рас-

стояние от обмоток до торца стержня H = 50 мм. По катушкам пропускали постоянный ток I = 8 A. Индукцию измеряли универсальным тесламетром 43205 с датчиком Холла, имеющим базу 0,9×0,9 мм.

Для оценки структуры магнитного поля в ванне приняли расчетную схему из двух стержней  $F_c = 26 \times 16$  мм и условное распределение зарядов по боковым поверхностям, приведенное на рис. 3. Расстояние между стержнями a = 20 мм; между осью OX (поверхностью изделия) и торцами стержней h = 15 мм. Угол наклона стержней к вертикали  $\alpha = 0^{\circ}$ . Расчеты выполнялись с учетом действия всех зарядов на поверхностях всех стержней  $(A, B \cup C)$ , которые «видны» из точки  $C_1$ . Для ускорения расчетов использовали программу Mathcad 15.

Расчетным путем определяли абсолютные значения напряженности поля E в точках, расположенных по оси ОХ с шагом 10 мм, с координатами по оси ОУ в направлении, обратном направлению сварки  $Y_0 = 0$  мм,  $Y_1 = 12$  мм,  $Y_2 = 16$  мм и  $Y_3 =$ 

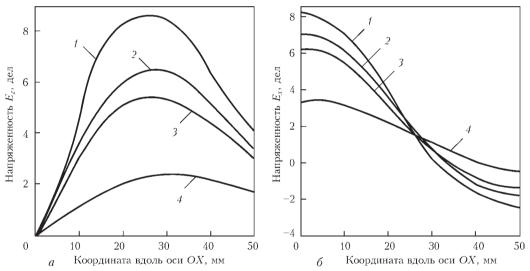


Рис. 5. Распределение расчетных значений  $E_z(a)$  и  $E_y(\delta)$  вдоль осей OX: I-4 — соответственно при y=0 мм; 12; 16; 32

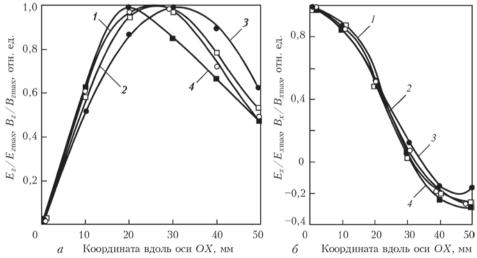


Рис. 6. Распределение относительных значений  $E_z/E_{z\,\mathrm{max}}$ ,  $B_z/B_{z\,\mathrm{max}}$  (a) и  $E_z/E_{z\,\mathrm{max}}$ ,  $B_x/B_{x\,\mathrm{max}}$  ( $\delta$ ) вдоль осей OX: I-4 — соответственно, при y=0 мм; 12; 16; 32 (линиями обозначены расчетные относительные значения для  $E_z/E_{z\,\mathrm{max}}$  (a) и  $E_x/E_{x\,\mathrm{max}}$  ( $\delta$ ); значками — экспериментальные данные для  $B_z/B_{z\,{
m max}}\left(a
ight)$  и  $B_x/B_{x\,{
m max}}\left(\delta
ight)$ 

= 32 мм (рис. 3). В расчете использовали зависимость  $E = 16/R^2$  (*R* измеряли в см). При этом получаются числа, являющиеся аналогами величин компонент напряженностей электростатического поля  $E_z$ ,  $E_x$ . Численные значения  $E_z$ ,  $E_x$  (в делениях) в принципе соответствуют значениям  $E_z$ ,  $E_r$ , имеющим размерность В/м.

Данные показали, что характер распределений расчетных значений продольной и поперечной компонент  $E_z$  и  $E_{\scriptscriptstyle X}$  (аналогов компонент индукций  $B_z$  и  $B_x$ ) вдоль осей OX сохраняется при увеличении расстояния по оси ОУ (см. рис. 3) в направлении противоположном направлению сварки (рис. 5, a и  $\delta$ ). Приведенные на рис. 6, a и  $\delta$ расчетные относительные значения  $E_z/E_{z \max}$  и  $E_x/E_{z \max}$  $E_{x\,\mathrm{max}}$ , соответствующие экспериментальным отношениям индукций  $B_z/B_{z\,\mathrm{max}}$  и  $B_x/B_{x\,\mathrm{max}}$  для реальных стержней УВ ПОМП, практически совпадают между собой.

Таким образом, предложенный метод обеспечивает удовлетворительную сходимость расчетных данных о распределении компонент напряженности моделирующего электростатического поля и экспериментальных данных о распределении компонент индукции магнитного поля в зоне сварочной ванны. Метод может быть использован для оптимизации конструкции УВ ПОМП, чтобы обеспечить максимальные значения поперечной компоненты индукции в зоне сварочной ванны при неизменной величине намагничивающей силы обмоток на стержнях этого УВ.

Следует отметить, что все приведенные выше результаты исследований относятся к случаю, когда изделие изготовлено не из ферромагнитного материала. Чтобы получить численные значения компонент индукции, приведенные на рис. 6 в виде относительных их значений, необходимо знать их численные значения хотя бы для одной точки на этом графике. Метод расчетного определения численных значений компонент индукций, генерируемых УВ ПОМП, будет приведен в следующей публикации.

## Выводы

- 1. Предложена расчетная методика с применением уравнений электростатики, которая адекватно отражает строение магнитных полей, генерируемых реальными УВ ПОМП, и позволяет оценивать распределение компонент индукции МП в зоне сварочной ванны.
- 2. Предложенный метод может быть использован для оптимизации конструкции УВ ПОМП,

чтобы обеспечить максимальные значения поперечной компоненты индукции в зоне сварочной ванны при неизменной величине намагничивающей силы обмоток на стержнях этого УВ.

## Список литературы

- 1. Скиперский Н. А., Рыбачук А. М. (2000) Формирование шва поперечным магнитным полем при сварке немагнитных материалов. Сварочное производство, 7, 53-55.
- 2. Иофинов П. А., Ибрагимов В. С., Дмитриенко А. К. и др. (1991) Влияние внешнего электромагнитного поля на скорость плавления электродной проволоки при автоматической наплавке под флюсом. Там же, 1, 34–35.
- 3. Размышляев А. Д., Миронова М. В. (2011) Производительность расплавления электродной проволоки при дуговой наплавке под флюсом с воздействием поперечного магнитного поля. *Автоматическая сварка*, **5**, 39–42.
- 4. Рыжов Р. Н., Кузнецов В. Д. (2006) Внешние электромагнитные воздействия в процессах дуговой сварки и наплавки (Обзор). Там же, 10, 36-44.
- 5. Андреева Е. Г., Шамец С. П., Колмогоров Д. В (2005) Расчет стационарных магнитных полей и характеристик электротехнических устройств с помощью программного пакета ANSYS. Electronic scientific journal «Oil and Gas Business», 1. http://ogbus.ru/authors/Andreeva/Andreeva\_1. pdf.
- 6. Бессонов Л. А. (2003) Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. Москва, Гардарики.
- Тозони О. В. (1975) Метод вторичных источников в электротехнике. Москва, Энергия.
- 8. Размышляев А. Д., Миронова М. В., Ярмонов С. В., Выдмыш П. А. (2013) Строение поперечного магнитного поля, генерируемого устройствами ввода для процесса дуговой сварки. Вісник Приазовського державного технічного університету. Зб. наук. пр., 26, сс. 135-141.

## References

- Skipersky, N.A., Rybachuk, A.M. (2000) Weld formation by transverse magnetic field in welding of nonmagnetic materials. Svarochn. Proizvodstvo, 7, 53-55 [in Russian].
- Iofinov, P.A., Ibragimov, V.S., Dmitrienko, A.K. et al. (1991) Influence of external electromagnetic field on melting rate of electrode wire in submerged-arc welding. Ibid., 1, 34-35 [in Russian
- 3. Razmyshlyaev, A.D., Mironova, M.V., Kuzmenko, K.G. (2011) Efficiency of melting of electrode wire in submergedarc surfacing with influence of transverse magnetic field. The Paton Welding J., 5, 39-42.
- R.N., V.D. (2006) External Ryzhov, Kuznetsov, electromagnetic effects in arc in processes of arc welding and surfacing (Review). *Ibid.*, 10, 29-35.
- 5. Andreeva, E.G., Shamets, S.P., Kolmogorov, D.V. (2005) Calculation of stationary magnetic fields and characteristics of electric devices using program package ANSYS. Electronic Sci. J. Oil and Gas Business, 1. http://ogbus.ru/ authors/Andreeva/Andreeva\_1.pdf.
- 6. Bessonov, L.A. (2003) Theoretical fundamentals of electrical engineering. Electromagnetic field. Moscow, Gardariki [in
- 7. Tozoni, O.V. (1975) Method of secondary sources in electrical engineering. Moscow, Energiya [in Russian].
- 8. Razmyshlyaev, A.D., Mironova, M.V., Yarmonov, S.V. et al. (2013) Structure of transverse magnetic field generated by input devices for arc welding process. Visnyk Pryazov. DTU: Transact. Mariupol, PDTU, 135-141 [in Russian].

## ДО ПИТАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ БУДОВИ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ В ЗОНІ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ВАННИ

## О. Д. РАЗМИШЛЯЄВ $^1$ , П.О. ВИДМИШ $^2$ , М. В. АГЄЄВА $^3$

<sup>1</sup>ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет».

87500, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7. E-mail: razmyshljaev@gmail.com

<sup>2</sup>ТОВ «Метінвест-Промсервіс». 87500, м. Маріуполь, Нікопольский просп., 113-а. Е-mail: pstukmu@gmail.com <sup>3</sup>Донбаська державна машинобудівна академія.

84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72. Е-таіl: maryna ah@ukr.net

Експериментально встановлено, що нормальна компонента індукції вздовж бічних поверхонь стрижнів пристрою ввелення поперечного магнітного поля розполілена практично рівномірно (має однакові значення). Леяке пілвишення значень цієї компоненти індукції спостерігається тільки в зонах у торців стрижнів і котушок, розміщених на цих стрижнях. Для вивчення розподілу індукції поперечного магнітного поля в зоні зварювальної ванни (біля поверхні основного металу) запропоновано використовувати відоме положення про те, що між будовою магнітостатичного і електростатичного полів  $\epsilon$  аналогія. На цій основі запропонована методика, що дозволя $\epsilon$  розрахувати розподіл поперечної і поздовжньої компонент індукції магнітного поля, що генерується пристроєм введення поперечного магнітного поля, у поверхні зварювальної пластини з немагнітних матеріалів. При цьому використовуються відомі рівняння електростатики. У розрахунках прийнято, що заряди електростатичного поля на бічних поверхнях і торцях стрижнів пристрою введення поперечного магнітного поля розміщені рівномірно. Показано, що запропонований метод забезпечує задовільну збіжність розрахункових і експериментальних даних. Бібліогр. 8, рис. 6.

Ключові слова: поперечне магнітне поле, індукція, закон Кулона, напруженість електростатичного поля

## TO THE ISSUE OF MODELING THE STRUCTURE OF TRANSVERSE MAGNETIC FIELD IN THE AREA OF WELDING POOL

## A.D. RAZMYSHLYAEV<sup>1</sup>, P.A. VYDMYSH<sup>2</sup>, M.V. AHIEIEVA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State Higher Eductation Instittue Pryazovskyi State Technical University 7, Universitetskaya Str., 87500, Mariupil, Ukraine. E-mail: razmyshljaey@gmail.com

<sup>2</sup>OJSC «Metinvest-Promservis», 113-a Nikopol ave., 87500, Mariupil, Ukraine, E-mail: pstukmu@gmail.com <sup>3</sup>Donbass State Machine Building Academy, 72 Akademicheskaya Str., 84313, Kramatorsk, Ukraine. E-mail: maryna ah@ukr.net

It was established experimentally that a normal component of induction along the side surfaces of rods of the device for input of transverse magnetic field is distributed almost uniformly (has the same values). A slight increase in the values of this induction component is observed only in the zones near the ends of the rods and near the coils, placed on these rods. To study the distribution of induction of a transverse magnetic field in the welding pool area (near the surface of the base metal) it was proposed to use the well-known assumption that there is an analogy between the structure of magnetostatic and electrostatic fields. On this basis, a procedure was proposed which allows calculating the distribution of transverse and longitudinal components of induction of the magnetic field generated by the device for input of the transverse magnetic field near the surface of the welded plate of non-magnetic materials. In this case, the known electrostatic equations are used. It was assumed in the calculations that the charges of electrostatic field on the side surfaces and ends of the rods of the device for input of the transverse magnetic field are uniformly distributed. It is shown that the proposed method provides a satisfactory convergence of calculated and experimental data. 8 Ref., 6 Fig.

Keywords: transverse magnetic field, induction, Coulomb's law, electrostatic field intensity

Поступила в редакцию 29.05.2018



Подписку на журнал «Автоматическая сварка» (подписной индекс 70031) можно оформить через редакцию журнала с любого месяца и на любой срок, включая выпуски журналов прошлых лет.

Тел./факс: (38044) 200-82-77

DOI: http://dx.doi.org/10.15407/as2018.07.04

УДК 621.791:621

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ СОСУДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДОСТАВКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

## В. М. КУЛИК

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены технические возможности упрощенного изготовления цельнометаллических сварных сосудов высокого давления для доставки природного газа путем использования производимых труб диаметром 351...610 мм из сталей повышенной прочности. Определены размерно-массовые параметры и напряжения в стенке сосудов в зависимости от прочности стали. Исследованы структура. структурно-механическая неоднородность и сопротивление усталости сварных соединений. Исключение из технологического процесса вальцовки, сварки, термомеханической обработки, термической обработки обечайки и формирования внешней стеклопластиковой оболочки, а также уменьшение толщины стенки, диаметра и массы обеспечивает существенное упрощение изготовления сосудов, сокращение количества проходов и продолжительности сварки кольцевых швов, расхода электроэнергии. Библиогр. 25, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: цельнометаллические сосуды высокого давления, трубы, напряжения, сварные соединения, структура, механические свойства, циклическая долговечность, размерно-массовые показатели

Одним из видов поставки природного газа является его морская транспортировка судами под давлением 20...30 МПа в цилиндрических стальных и металлопластиковых сосудах, изготавливаемых с применением газовых труб большого диаметра (1020, 1029, 1067, 1219 мм) с толщиной стенки до 40 мм из стали класса прочности X80 [1-5]. Поставку газа в Украину предлагается осуществлять в металлопластиковых сосудах диаметром 390 и 1020 мм длиной 5,8 и 11,7 м [1, 6]. Их изготовление осуществляется с применением вальцовки, сварки продольного шва, термомеханической и термической обработок обечайки из стали 30ХГСА [7] или с использованием труб из стали Х80 [8] и формированием стеклопластиковой оболочки. С применением труб большого диаметра из высокопрочных низколегированных сталей предлагалось изготавливать металлопластиковые сосуды для оперативного снабжения сжатыми газами небольших предприятий, фермерских хозяйств и пр. [9].

В связи с возможной нестабильностью импортных поставок газа актуальной является доставка природного газа в передвижных сосудах упрощенного изготовления, производство которых можно быстро освоить. Изготовление цельнометаллических сосудов большого диаметра с повышенной толщиной стенки и металлопластиковых сосудов, усиленных стеклопластиковой оболочкой толщиной большей, чем толщина стенки корпуса примерно в три раза [10], достаточно сложно для современного технического состояния Украины.

Целью работы было изыскание и оценка эффективности упрощенного изготовления сосудов высокого давления для доставки и хранения природного газа с перспективой возможности быстрого освоения их производства. Она решается исключением из технологического процесса формирования стеклопластиковой оболочки и изготовления термообрабатываемой обечайки за счет применения производимых труб среднего диаметра, в том числе термообработанных, с толщиной стенки не большей, чем толщина стенки (9,1 и 13,5 мм) корпусов металлопластиковых сосудов большого диаметра (1020 мм).

Цельнометаллический сосуд состоит из равнотолщинных обечайки из трубы среднего диаметра из стали повышенной прочности и двух выпуклых днищ с патрубком и штуцером, по крайней мере, в одном, сваренных встык кольцевыми швами. Производимые в Украине с применением дуговой сварки трубы диаметром 426 мм и более могут изготавливаться из листовых сталей класса прочности Х80 и X100. Такие стали, легированные 1,6...1,9 % Mn и микролегированные Ni, Cr, Mo, Ti, V, Nb, после термомеханической обработки, в том числе контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения, а также других видов обработки, отличаются повышенными прочностью ( $\sigma_{_{\rm B}} \ge 625$  и 760 МПа), пластичностью  $(\delta_5 \ge 18 \text{ и } 17 \%)$  и вязкостью ( $KC_{-40} \ge 155 \text{ и } 160 \text{ Дж}$ ). Снижение содержания углерода до 0,03 % и серы до 0,01 % обеспечивает повышение пластичности, деформируемости и вязкости, улучшение свариваемости по сравнению с углеродистой легированной сталью [11–13].

Бесшовные горячедеформированные трубы диаметром 530 (550) мм и менее изготавливаются из стали 30ХГСА с  $\sigma_{\rm p} \ge 686$  МПа и  $\delta_{\rm s} \ge 11$  %. По тре-

© В. М. Кулик, 2018

бованию потребителя они должны изготавливаться термически обработанными. Такие трубы приведены в перечне материалов, используемых для изготовления сосудов, работающих под давлением [14].

Основные технические параметры рассматриваемых цельнометаллических сосудов длиной 11,4...11,6 м, предлагаемых для доставки природного газа (как возможный вариант), приведены в таблице. Они определены с применением формул (1)-(5), из которых формулы (2) и (3) представлены в работе [15], формула (1) выведена из формулы (2).

$$S = \frac{K_{3 p} D}{2(\sigma_{p} + K_{3 p})},$$
 (1)

$$\sigma_{p}^{K} = \frac{P(D-2S)}{2S}, \qquad (2)$$

$$\sigma_{\mathbf{p}}^{\mathbf{M}} = \frac{P(D - 2S)}{4S(D - S)},\tag{3}$$

$$V = 0.262(D - 2S)^{2}(3l_{_{\rm II}} + 2D), \tag{4}$$

$$M = 24,65 \text{S}(D - S)(l_{_{\text{II}}} + D),$$
 (5)

где S, D и  $l_{_{\rm II}}$  — толщина стенки, наружный диаметр и длина цилиндрической части сосуда;  $K_3$  — коэффициент запаса прочности сосуда;  $P_p$  — рабочее давление газа в сосуде (20 МПа);  $\sigma_p^{\rm R}$ ,  $\sigma_p^{\rm M}$  и  $[\sigma]$  рабочие кольцевые, меридиальные и допускаемые напряжения в стенке; V и M — вместимость и масса сосуда.

Согласно Правил DNV для грузовых емкостей судов CNG допускается  $K_3 = 1,60...1,80$  [3]. Такой же  $K_2$  может быть для магистральных трубопроводов, а при толщине стенки 18,7 мм с поверхностным дефектом длиной 500 мм и глубиной до 5,3 мм он составляет 1,77...1,80 [16]. Металлопластиковые сосуды допускается изготавливать с  $K_{2}$  =

= 1,70 и 1,75 [1, 17]. Поэтому соблюдение запаса прочности примерно 1.75 цельнометаллических сварных сосудов вполне оправдано.

Минимальный диаметр приведенных в таблице сосудов из сталей X80 и X100 обусловлен минимальным диаметром 426 мм производимых в Украине с применением дуговой сварки труб. Минимальным диаметрам 508 и 351 мм сосудов из стали 30ХГСА соответствует расчетная толщина стенки 9,0 и 8,5 мм, меньше которой бесшовные горячедеформированные трубы (термообработанные и нетермообработанные) приведенных диаметров не производятся. В сосудах диаметрами большими, чем приведено в таблице, толщина стенки превышает толщину стенки корпуса из таких же сталей металлопластиковых сосудов.

При использовании труб из стали X80 толщина стенки сосуда с запасом прочности 1,75 может быть 11,1 и 13,2 мм. Сосуды из сталей 30ХГСА термообработанной и нетермообработанной и Х100 могут иметь толщину стенки 9,0...9,4; 8,5...12,7 и 9,0...12,8 мм, соответственно, с соблюдением запаса прочности 1,75...1,78. При этом, сосуды из двух последних сталей изготавливаются в более широких пределах диаметров 351...530 и 426...610 мм. Отношение *D/S* сосуда линейно возрастает с увеличением о стали, сопровождаемым снижением отношения M/V от 0,89 до  $0.60 \text{ т/м}^3$  (рис. 1). Такое же снижение M/V происходит почти линейно с увеличением D/S. При этом сосуды из стали одного уровня прочности

имеют одинаковые значения D/S,  $\sigma_{\rm p}^{\rm K}$ ,  $\sigma_{\rm p}^{\rm M}$  и M/V. Рабочие кольцевые напряжения  $\sigma_{\rm p}^{\rm K}$  не превышают допускаемые напряжения  $[\sigma] = \sigma_{\rm p}/K_3$ , а меридиальные напряжения  $\sigma_p^{\text{м}}$  уступают [ $\sigma$ ] в 2,04...2,06 раза. Это исключает разрушение сосуда при постоянном давлении газа 20 МПа. Напряжения в стенке полусферических днищ являются такими же, как меридиальные напряжения [15].

Размерно-массовые параметры и напряжения в стенке стальных сосудов длиной 11,4...11,6 м при  $P_n=20$  МПа

	Сталь трубы и сосуда											
Параметры	$\sigma_{\rm R} = 640  \rm M \Pi a$		$30$ ΧΓCA c $\tau$ /o $\sigma_{\rm B}$ = 960 MΠa		$30$ ХГСА без т/о $\sigma_{_{\rm R}} = 700$ МПа							
D, mm	508	426	530	508	530	426	377	351	610	558	508	426
S, mm	13,2	11,1	9,4	9,0	12,7	10,2	9,0	(8,5)	12,8	11,7	10,7	9,0
D/S	38,5	38,4	56,4	56,4	41,7	41,8	41,9	41,3	47,6	47,7	47,5	47,3
K	1,75	1,75	1,76	1,76	1,76	1,76	1,75	1,78	1,75	1,75	1,76	1,76
[σ], МПа	365,7	365,7	545,5	545,5	397,7	397,7	400,0	392,9	457,1	457,1	454,5	454,5
$\sigma_p^\kappa$ , MПa	364,8	363,8	543,8	544,4	397,3	397,6	398,9	392,0	456,6	456,9	454,7	453,2
$\sigma_p^{\scriptscriptstyle{M}}$ , MПа	177,5	177,1	267,0	267,3	193,8	193,9	194,6	191,6	223,4	223,6	222,5	221,7
<i>V</i> , м <sup>3</sup>	2,06	1,44	2,33	2,14	2,27	1,45	1,14	0,985	3,06	2,55	2,11	1,47
М, т	1,85	1,29	1,40	1,28	1,86	1,19	0,93	0,814	2,19	1,82	1,50	1,05
$M/V$ , $T/M^3$	0,89	0,89	0,60	0,60	0,81	0,82	0,81	0,826	0,71	0,71	0,71	0,71

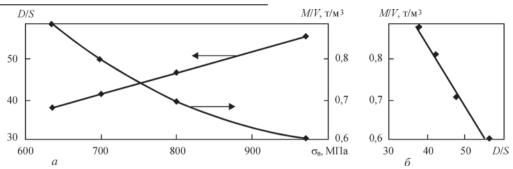


Рис. 1. Влияние  $\sigma_n$  стали трубы на D/S и M/V (a) и D/S на M/V (б) цельнометаллических сосудов диаметром 351...610 мм

Поэтому днища могут быть сформированы из менее дорогих нелегированных и низколегированных сталей широкого потребления, используемых для изготовления сосудов, работающих под давлением. Их  $\sigma_{\rm p}$  должен быть не ниже  $0.5\sigma_{\rm p}$  стали применяемых труб.

Масса цельнометаллических сосудов в пределах 0,81...1,85 т является значительно меньшей, чем M = 4,95 и 6,15 т металлопластиковых сосудов такой же длины. Это в сочетании с меньшими толщиной стенки и диаметром облегчает проведение сварочных и такелажных работ. Их вместимость 0,99...3,06 м<sup>3</sup> значительно уступает вместимости металлопластиковых сосудов большого диаметра. Масса и вместимость изменяются синхронно с изменением диаметра и длины. При размещении цельнометаллических сосудов в контейнере их суммарная вместимость может превышать суммарную вместимость металлопластиковых сосудов благодаря отсутствию стеклопластиковой оболочки. Объем газа в контейнере почти не зависит от диаметра размещаемых в нем сосудов.

Показатель M/V практически не зависит от диаметра и длины сосуда при соблюдении  $l_{\perp}/D =$ = 5...7 и более.

определяется прочностью стали, запасом прочности сосуда и давлением газа ( $\rho = 7.85 \text{ т/м}^3$  — плотность стали). Практическая независимость M/V от размерных параметров сосуда дает возможность быстро оценить этот показатель до разработки его конструкции.



Рис. 2. Первичная микроструктура металла (×50) корневого и следующего слоев шва стыкового соединения

Односторонняя многопроходная дуговая сварка поворотных стыков труб и днищ с толщиной стенки 9,0...13,2 мм с U-образной разделкой кромок с учетом [9, 18-20] осуществляется при выполнении корневого слоя навесу плавящимся электродом в среде защитного газа, в частности, в СО2, неплавящимся электродом в среде аргона и покрытыми электродами. Небольшой вес сварочной ванны при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом с активирующим флюсом и кристаллизация металла от боковых стенок (рис. 2) способствуют предотвращению протекания расплавленного металла и улучшению формирования сварного соединения с обратной стороны. Последующее заполнение разделки кромок можно продолжать приведенными способами сварки. Кольцевые соединения подвергаются местному отпуску, в частности гибкими электронагревателями.

Многослойный металл шва опытных стыков стали X80, сваренной под флюсом, имеет, подоб-

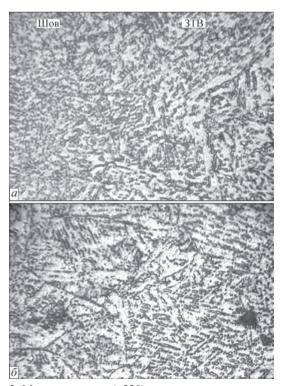


Рис. 3. Микроструктура ( $\times$ 320) металла зоны сплавления (a) и ЗТВ (б) стали класса прочности Х80

но металлу продольного шва производимых труб [21], ферритно-бейнитную структуру с включениями МАК-фазы (рис. 3). Его повышенная твердость *HRB* 88...91 по сравнению с *HRB* 72...75 и 71...72 основного металла и ЗТВ практически сохраняется после высокого отпуска (*HRB* 88...89, 71...73 и 70...73).

Микроструктура металла сварного соединения стали 30XГСА представляет собой смесь мартенсита, бейнита, а также феррита (рис. 4) [22]. В местах повторных кратковременных нагревов ниже начала аустенитного превращения  $^{A}_{C_{\downarrow}}$  имеется тенденция к появлению структуры сорбита отпуска. В верхней части соединения, выполненного аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом, металл шва и прилегающих к нему участков ЗТВ имеет высокую твердость HV0,2-390...500, которая снижается до HV0,2-230 при удалении от шва в сторону термоулучшенного основного металла твердостью HV0,2-280...300 (рис. 5, a). Металл нижней части шва имеет меньшую твер-

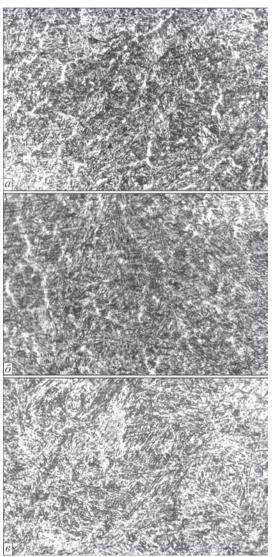


Рис. 4. Микроструктура ( $\times$ 320) металла корневого (a) и следующего ( $\delta$ ) слоев шва и зоны сплавления ( $\epsilon$ ) стали 30ХГСА

дость HV0,2 — 260...300 за счет отпусков при сварочных нагревах. Более длительный послесварочный местный отпуск вызывает снижение твердости металла верхней и нижней частей шва до HV0,2 — 330...420 и HV0,2 — 230...240 (рис. 5, б). У высокоотпущенного соединения, выполненного проволокой  $Hn-30X\Gamma CA$  в среде  $CO_2$ , достигается равномерное по ширине и высоте распределение твердости HV0,2 — 270...330.

Ударная вязкость  $KCU_{20}$  металла шва типа 10X2M и 3TB опытных стыков стали X80 при выполнении высокого отпуска незначительно возрастает от 86 до 87...95 и от 286 до 289...305 Дж/см². Микролегированный марганцовистый металл шва труб для магистральных трубопроводов имеет более высокую  $KCV_{20}=110...120$  Дж/см² [21]. Высокоотпущенный металл шва типа 18XM стали 30XГСА —  $KCU_{20}=90$ ,9 Дж/см². Приведенные значения ударной вязкости сварных соединений превышают минимально допустимые  $KCU_{20}=50$  Дж/см² и  $KCV_{20}=35$  Дж/см² [14].

Более высокая прочность металла шва обусловливает разрушение статически испытуемых сварных образцов за его пределами. Металл повышенной прочности отличается повышенным сопротивлением усталости. Циклическая долговечность при растяжении до  $\sigma_{\rm H} = 350$  МПа плоских сварных образцов из стали X80 выпрямленной части трубы большого диаметра после сварки под флюсом встык выдерживают 86100 циклов до разрушения от места перехода шва с высотой усиления примерно 1,5 мм к основному металлу. Она возрастает до 114100 циклов после высокого от-

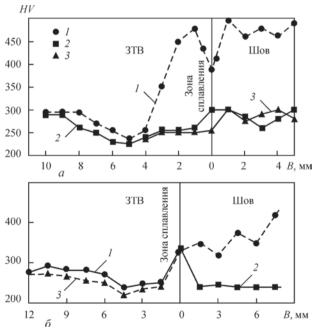


Рис. 5. Распределение микротвердости в верхней (I), нижней (2) и срединной (3) частях стыкового соединения термоулучшенной стали 30ХГСА толщиной 10 мм после аргонодуговой сварки (a) и последующего местного отпуска ( $\delta$ )

пуска, а при сочетании высокого отпуска с меньшей нагрузкой  $\sigma_{_{\! H}} = 300 \ \mathrm{M}\Pi \mathrm{a}$  увеличивается до 312400 циклов. Установленное количество циклов одноосного растяжения до разрушения образцов из стали X80, сваренной под флюсом, превышает 5200...7800 циклов заполнений и выпусков газа 2...3 раза в неделю в течение 50 лет эксплуатации в 11...22 раза и более. Оно значительно больше 15000...24000 циклов гидравлически испытуемых комбинированных автомобильных баллонов с термоупрочненным и усиленным стеклопластиком корпусом из легированной стали [23].

С уменьшением высоты усиления шва до 0,3...0,5 мм и улучшением формирования сварного соединения при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом стали 30ХГСА циклическая долговечность образцов в состояниях после сварки и местного отпуска превышает 217800 и 229200 циклов нагрузки при  $\sigma_{_{\rm H}}$  = 350 МПа (разрушения по галтели). После снижения шероховатости галтелей сварные образцы не разрушаются в течение 584400 и 674400 циклов при такой же нагрузке, превышающей  $\sigma_{\rm p}^{\rm \tiny M}=192...194$  и 267 МПа, равного 0,273...0,278 од стали нетермообработанной и термообработанной бесшовных труб. Пределы усталости  $\sigma_{-1}$  около  $0.4\sigma_{-1}$  стали [24] и  $\sigma_{0}$  = 0,27...0,30 σ<sub>в</sub> сварных соединений низколегированных высокопрочных сталей [25] превышают  $\sigma_{\rm p}^{\rm M}$ , и опасность усталостного разрушения кольцевых соединений от изменяющегося давления газа в цельнометаллическом сосуде отсутствует.

## Выводы

- 1. Обоснована целесообразность упрощенного изготовления сварных сосудов высокого давления для доставки природного газа и газоснабжения небольших предприятий. Это достигается применением производимых труб среднего диаметра из сталей повышенной прочности (Х80, 30ХГСА, X100) и исключением из технологического процесса операций с высокой энергозатратностью по формированию внешней стеклопластиковой оболочки и изготовлению сварной термоупрочненной обечайки. Для изготовления днищ цельнометаллических сосудов приемлемы менее прочные листовые низколегированные (и углеродистые качественные) конструкционные стали.
- 2. Относительно небольшие толщина стенки, диаметр и масса сосудов обусловливают упрощение проведения сварочных и такелажных работ, сокращение количества проходов и продолжительности сварки, расхода сварочных материалов и электроэнергии. Выполняемые кольцевые соединения цельнометаллических сосудов не разрушаются при постоянном и изменяющемся давлении газа.

- 3. Оношение M/V цельнометаллических сосудов слабо зависит от размеров сосуда. Этот показатель оперативно оценивается по прочности стали трубы без определения M и V.
- 4. Свободный доступ к цилиндрической поверхности сосуда способствует упрощению технического обслуживания и проведению ремонтно-восстановительных работ. Для изготовления цельнометаллических сосудов с применением труб среднего диаметра требуется простое сварочное оборудование. Его организация не вызывает особых трудностей.

Автор признателен В. П. Елагину и А. З. Кузьменко за помощь в исследовании распределения твердости и малоцикловой усталости сварных образцов.

## Список литературы

- 1. Патон Б. Е., Савицкий М. М., Савицкий А. М., Мазур А. А. (2014) Эффективность морской транспортировки природного газа при использовании сварных баллонов высокого давления. Автоматическая сварка, 8, 49–55.
- 2. Блинков А. Н., Власов А. А. (2006) Морская транспортировка сжатого газа. Новые возможности для освоения месторождений природного газа на шельфе. Морская биржа, 2, 65–69.
- 3. Блинков А. Н., Власов А. А., Лацис А. В., Шурняк В. К. (2007) Новая технология морской транспортировки газа: состояние, проблемы, перспективы. Сб. Регистра Судо*ходства*. С.-Петербург, **30**, 127–162.
- 4. Рен Ч. Г., Зеленская Е. В. (2011) Обзор существующих методов транспортировки природного газа на дальние расстояния и оценка их применимости. Нефть, газ и бизнес, 3, 3–9.
- Зайцев Вал., В., Зайцев В. В. Котова Е. В., Скрипниченко К. С. (2010) Анализ особенностей требований классификационных обществ к судам, перевозящим сжатый природный газ. Зб. наук. праць НУК. Миколаїв, НУК, 5(434), 11–18
- 6. Савицкий М. М., Савицкий А. М., Супруненко В. А. и др. (2013) Определение параметров облегченных сварных баллонов для грузовой системы CNG-газовозов. Электронный вестник НУК, 1, 4–11.
- 7. Савицький М. М, Кулик В. М., Лупан А. П. та ін. (2008) Спосіб виготовлення композитного балона. Україна, Пат. 83095.
- 8. Кулик В. М., Савицький М. М., Єлагін В. П., Демченко Е. Л. (2012) Спосіб виготовлення композитної посудини. Україна, Пат. 100273.
- Кулик В. М., Савицкий М. М., Елагин В. П., Демченко Э. Л. (2011) Возможности применения высокопрочных низколегированных трубных сталей для изготовления сосудов высокого давления. Автоматическая сварка, 2, 49-54.
- 10. Кулик В. М., Савицький М. М., Супруненко В. О. (2016) *Балон комбінований*. Україна, Пат. 11268.
- Тухбатуллин Ф. Б., Галиуллин З. Т., Карпов С. В. и др. (2001) Низколегированные стали для магистральных газопроводов и их сопротивление разрушению. Обз. информ. Сер. Транспорт и надземное хранение газов. Москва, ИРЦ Газпром.
- 12. Бауер Д., Флюс П., Аморис Е. и др. (2006) Микроструктура и характеристики трубных сталей после термомеханической обработки. Новости черн. металлургии за рубежом, 4, 65-76.
- 13. Набуки И., Шигери Е., Джос К. (2006) Трубы UOE с высокими характеристиками для магистральных трубопроводов. Там же, 77-80.

- 14. (1998) Правила будови та безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском. Киев.
- 15. Писаренко Г. С., Агарев В. А., Квитка А. Л. и др. (1967) Сопротивление материалов. Писаренко Г. С. (ред.). Киев, ГИТЛ УССР.
- 16. СТО Газпром 2-2.3-184-2007. (2008) Методика по расчету и обоснованию коэффициентов запаса прочности и устойчивости магистральных газопроводов на стадии эксплуатации и технического обслуживания. Москва.
- 17. Патон Б. Е., Савицкий М. М., Савиченко А. А., Супруненко В. А. (2009) Сосуды высокого давления для природного газа. Проблемы сварки, родственных процессов и технологий. Николаев, сс. 89–90.
- 18. Каховский Н. И., Фартушный В. Г., Ющенко К. А. (1975) Электродуговая сварка сталей. Справочник. Киев, Наукова думка.
- 19. Кулик В. М., Савицький М. М., Лупан А. П., Черторильський Л. О. (2007) Спосіб дугового багатопрохідного зварювання неплавким електродом. Україна, Пат. 81053.
- 20. Кулик В. М., Савицкий М. М., Лупан А. Ф. и др. (2007) Аргонодуговая сварка заготовок валов для металлургического оборудования. Автоматическая сварка, 10, 34–39.
- 21. Рыбаков А. А., Филипчук Т. Н., Костин В. А. (2015) Особенности микроструктуры и ударная вязкость металла сварных соединений труб из высокопрочной стали с ниобием и молибденом. Там же, **3-4**, 17–24.
- 22. Кулик В. М., Васильев В. Г., Григоренко Г. М. и др. (2007) Фазовые и структурные превращения при сварке и дуговой обработке соединений стали 30ХГСА. Там же, 9, 10 - 15
- 23. Савицкий М. М., Савиченко А. А., Кулик В. М. и др. (2007) Облегченные сварные баллоны для автотранспорта, Там же, 1, 52-53.
- 24. Серенсен С. В., Шнейдерович Р. М., Гусенков А. П. и др. (1975) Прочность при малоцикловом нагружении. Москва, Наука.
- 25. Труфяков В. И. (1973) Усталость сварных соединений. Киев, Наукова думка.

## References

- 1. Paton, B.E., Savitsky, M.M., Savitsky, A.M. et al. (2014) Effectiveness of natural gas transportation by sea at application of high pressure welded cylinders. The Paton Welding J., 8, 47-53.
- 2. Blinkov, A.N., Vlasov, A.A. (2006) Compressed gas transportation by sea. New possibilities for field development of natural gas in shelf. *Morskaya Birzha*, **2**, 65-69 [in Russian].
- 3. Blinkov, A.N., Vlasov, A.A., Latsis, A.V., Shurnyak, V.K. (2007) New technology of gas transportation by sea: State-ofthe-art, problems, perspectives. Sb. Registra Sudokhodstva, St.-Petersburg, 30, 127-162 [in Russian].
- 4. Ren, Ch.G., Zelenskaya, E.V. (2011) Review of existing methods of natural gas transportation for long distances and assessment of their application. Neft, Gaz i Biznes, 3, 3-9 [in Russian].
- 5. Zajtsev, Val. V., Zajtsev, V.A., Kotova, E.V., Skripnichenko, K.S. (2010) Analysis of specifics of requirements for classification societies to ships transporting compressed natural gas. Zb. Nauk. Prats NUK, Mykolaiv, 5(434), 11-18 [in Russian].
- Savitsky, M.M., Savitsky, A.M., Suprunenko, V.A. et al. (2013) Determination of parameters of light-weight welded

- cylinders for cargo system of CNG carriers. Elektronny Vestnik NUK, 1, 4-11 [in Russian].
- 7. Savytsky, M.M., Kulyk, V.M., Lupan, A.P. et al. (2008) Method of manufacture of composite cylinder. Pat. 83095 Ukraine [in Ukrainian].
- 8. Kulyk, V.M., Savytsky, M.M., Elagin, V.P., Demchenko, E.L. (2012) Method of manufacture of composite vessel. Pat. 100273 Ukraine [in Ukrainian].
- 9. Kulik, V.M., Savitsky, M.M., Elagin, V.P., Demchenko, E.L. (2011) Capabilities of application of high-strength low-alloy pipe steels for manufacture of high-pressure vessels. The Paton Welding J., 2, 43-47.
- 10. Kulyk, V.M., Savytsky, M.M., Suprunenko, V.O. (2016) *Combined cylinder*. Pat. 11268 Ukraine [in Ukrainian].
- 11. Tukhbatullin, F.B., Galiullin, Z.T., Karpov, S.V. et al. (2001) Low-alloy steels for main gas pipelines and their resistance to fracture. Inform. Rev. Ser. Transport and overhead storage of gases. Moscow, IRTs Gazprom [in Russian].
- 12. Bayer, D., Flus, P., Amoris, E. et al. (2006) Microstructure and characterisctics of pipe steels after thermal and mechanical treatment. Novosti Ĉĥyorn. Metallurgii za Rubezhom, 4, 65-76 [in Russian].
- 13. Nabuki, I., Shigeri, E., Jos, K. (2006) Pipes UOE with high characteristics for main pipelines. *Ibid.*, 77-80 [in Russian].
- 14. (1998) Regulations of design and safe operation of pressure vessels. Kiev [in Ukrainian].
- 15. Pisarenko, G.S., Agarev, V.A., Kvitka, A.L. et al. (1967) Strength of materials. Ed. by G.S. Pisarenko. Kiev, GITL Ukr. SSR [in Russian].
- 16. (2008) STO Gazprom 2-2.3-184-2007: Procedure on calculation and substantiation of safety and stability factors of main gas pipelines at the stage of service and maintenance. Moscow [in Russian].
- 17. Paton, B.E., Savitsky, M.M., Savichenko, A.A., Suprunenko, V.A. (2009) High-pressure vessels for natural gas. In: Problems of welding, related processes and technologies. Nikolaev, 89-90 [in Russian].
- 18. Kakhovsky, N.I., Fartushny, V.G., Yushchenko, K.A. (1975) Electric arc welding of steels: Refer. book. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
- 19. Kulyk, V.M. Savytsky, M.M., Lupan, A.P., Chertorylsky, L.O. (2007) Method of multipass nonconsumable electrode welding. Pat. 81953 Ukraine [in Ukrainian].
- 20. Kulik, V.M., Savitsky, M.M., Lupan, A.F. et al. (2007) Argonarc welding of billets of shafts for metallurgical equipment. *The Paton Welding J.*, 10, 28-32.
- 21. Rybakov, A.A., Filipchuk, T.N., Kostin, V.A. (2015) Peculiarities of microstructure and impact toughness of metal of welded joints of pipes of high-strength steel with niobium and molybdenum. *Îbid.*, **3-4**, 16-23.
- 22. Kulik, V.M., Vasiliev, V.G., Grigorenko, G.M. et al. (2007) Phase and structural transformations in welding and arc treatment of 30KhGSA steel joints. Ibid., 9, 6-10.
- 23. Savitsky, M.M., Savichenko, A.A., Kulik, V.M. et al. (2007) Light-weight welded cylinders for motor transport. *Ibid.*, 1,
- 24. Serensen, S.V., Shneiderovich, R.M., Gusenkov, A.P. et al. (1975) Strength under low-cycle loading. Moscow, Nauka [in Russian].
- Trufyakov, V.I. (1973) Fatigue of welded joints. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

## ТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗВАРНИХ ПОСУДИН ВИСОКОГО ТИСКУ ДЛЯ ДОСТАВКИ ПРИРОДНЬОГО ГАЗУ

## В. М. КУЛИК

IEЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Розглянуто технічні можливості спрощеного виготовлення суцільнометалевих зварних посудин високого тиску для доставки природного газу шляхом використання вироблених труб діаметром 351 ... 610 мм зі сталей підвищеної міцності. Визначено розмірно-масові параметри і напруження в стінці посудин в залежності від міцності сталі. Досліджено структуру, структурно-механічну неоднорідність і опір втомі зварних з'єднань. Виключення з технологічного процесу вальцювання, зварювання, термомеханічної обробки, термічної обробки обичайки і формування зовнішньої склопластикової оболонки, а також зменшення товщини стінки, діаметра і маси забезпечує суттєве спрощення виготовлення посудин, скорочення кількості проходів і тривалості зварювання кільцевих швів, витрати електроенергії. Бібліогр. 25, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: суцільнометалеві посудини високого тиску, труби, напруження, зварні з'єднання, структура, механічні властивості, циклічна довговічність, розмірно-масові показники

## TECHNICAL PARAMETERS AND FEATURES OF MANUFACTURING HIGH-PRESSURE VESSELS FOR NATURAL GAS TRANSPORTATION

## V.M. KULIK

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail:office@paton.kiev.ua

Considered are technical capabilities of simplified manufacture of all-metal welded high-pressure vessels for transportation of natural gas by means of application of produced 351-610 mm diameter pipes from increased strength steels. Dimensionweight parameters and stresses in vessel wall depending on steel strength are determined. The structure, structure-mechanical inhomogeneity and fatigue resistance of the welded joints were examined. Elimination of rolling, welding, thermal-mechanical treatment, thermal treatment of shell from the technological process and formation of outer fiberglass casing as well as reduction of wall thickness, diameter and weight provides significant simplification of vessel manufacture, reduction of amount of passes and duration of welding of circumferential welds, power consumption. 25 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: all-metal high-pressure vessels, pipes, stresses, welded joints, structure, mechanical properties, cyclic strength, dimension-weight indices

Поступила в редакцию 08.02.2018

## Вниманию читателей!

Вышел в свет второй выпуск информационного бюллетеня ассоциации «Электрод» «Электрод Информ» за II кв. 2018 г.

## В номере:

Календарь мая

Поздравляем! (именинники апреля, мая, июня) Лауреаты премии им. академика НАН Украины И. К. Походни

Рассказы о славных свершениях

Сравнение аустенитных сварочных электродов

с основным и титанистым типами покрытий

Отечественные электроды с рутиловым и пластмассовым покрытиями для дуговой сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей

Международная выставка «Сварка/Welding 2018»

Всероссийская научная конференция

VIII специализированная выставка «Металл.

Оборудование. Инструмент»

Новые члены ассоциации «Электрод»

Календарь выставок и конференций

(II полугодие 2018 г.)

Памяти Павла Васильевича Игнатченко

Члены ассоциации «Электрод»



Информационная поддержка журнал «Автоматическая сварка».

www.assotitation-electrode.com

DOI: http://dx.doi.org/10.15407/as2018.07.05

УДК 621.791:62-419

## ВОЗМОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ ТРЕХСЛОЙНЫХ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

## Л. В. ПЕТРУШИНЕЦ, Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО, В. Е. ФЕДОРЧУК, В. С. ШИНКАРЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В самолето-, судостроении, строительстве и других отраслях промышленности широко применяются трехслойные сотовые панели, которые конструктивно состоят из сотового заполнителя и двух обшивок. При относительно небольшой массе эти конструкции отличаются высокими прочностными характеристиками, звуко- и теплоизоляционными свойствами. Основной проблемой при изготовлении трехслойной конструкции является приварка верхней и нижней обшивки к торцевым поверхностям сотового заполнителя. В работе представлены результаты по разработке технологии изготовления трехслойных сотовых панелей из алюминиевых сплавов размером 150×150 мм. Сотовый заполнитель из алюминиевого сплава АД1 толщиной 0,150 мм был получен путем соединения гофрированных полос в блоки при помощи точечной сварки. Плоскопараллельность торцевых поверхностей сотового заполнителя получали шлифовкой. При этом жесткость конструкции обеспечивали за счет заполнения ячеек канифолью. Соединение заполнителя с обшивками из сплава АМг2 толщиной 1,0 мм выполняли способом диффузионной сварки в вакууме. Процесс проводили в приспособлении, состоящем из нижнего, верхнего фланцев и втулки. Фланцы обеспечивали прижатие обшивок к торцевым поверхностям сотового заполнителя по всей площади контакта, а втулка позволяла выровнять температурное поле в изделии и контролировать величину его деформации в процессе сварки. Библиогр. 8, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: трехслойная сотовая панель, тонколистовые алюминиевые сплавы, точечная сварка, диффузионная сварка в вакууме

В настоящее время в самолето-, судостроении, строительстве и других отраслях промышленности широко применяются трехслойные панели. При относительно небольшой массе эти конструкции имеют высокие прочностные характеристики и жесткость. Несущие слои, подкрепленные заполнителем, воспринимают высокие напряжения сжатия, превышающие предел упругости материала. Данный вид конструкций отличается хорошими вибрационными и радиотехническими характеристиками, звуко- и теплоизоляционными свойствами [1, 2].

Для соединения элементов сотовых заполнителей применяется ряд методов: склеивание, контактная сварка, пайка и диффузионная сварка. Наиболее распространенным способом изготовления является склеивание (около 95 %). Причем трехслойные сотовые панели из алюминиевых сплавов в современной промышленности изготавливают преимущественно склеиванием. Панели, полученные пайкой, контактной и диффузионной сваркой, применяют в конструкциях, работающих при высоких температурах или в агрессивных средах [1]. Соответственно, материалами для таких панелей служат нихром, титановые сплавы или нержавеющие стали.

Получение сотовых заполнителей выполняется одним из двух методов: растяжение пакета и изготовление из профилированных лент. При втором методе, кроме склеивания, также возможно применение сварки или пайки. Метод растяжения пакета применяется для изготовления заполнителей, соты которых состоят только из шести граней. При этом толщины металлических материалов не превышают 80 мкм. Сотовые заполнители, изготовленные из предварительно профилированной ленты в виде фольги, имеют более правильную геометрию сот, чем заполнители, полученные путем растяжения пакетов. Данный технологический процесс занимает больше времени, чем метод растяжения пакета, следовательно, заполнители, полученные из профилированных лент, обычно дороже [1].

Трехслойная панель по своей конструкции состоит из двух обшивок и сотового заполнителя, которые существенно отличаются как своей геометрией, так и механическими свойствами в разных плоскостях. Данный вид конструкции требует разработки отдельных подходов как к сварке профилированных лент в блок сотового заполнителя, так и формирования таврового соединения обшивок с заполнителем.

Целью данной работы было разработать технологию получения трехслойных сотовых панелей из алюминиевых сплавов способом диффузионной сварки в вакууме.

При изготовлении трехслойных панелей для сотового заполнителя применяли сплав алюминия

© Л. В. Петрушинец, Ю. В. Фальченко, В. Е. Федорчук, В. С. Шинкаренко, 2018

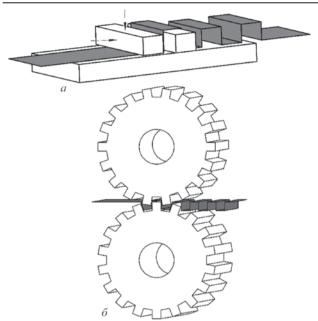


Рис. 1. Схема формирования полос сотового заполнителя с помощью прямоугольных вкладышей (а) или зубчатой передачи (б)

АД1 с толщиной фольги 0,15 мм, а для обшивок сплав АМг2 толщиной 1,0 мм.

На основе ранее проведенного литературного обзора [3] было показано, что профилированные ленты для сотового заполнителя могут быть получены путем последовательного формирования фольги с заданным шагом в виде половинок сот на оснастке, состоящей из прямоугольных вкладышей (рис. 1, а) или с помощью зубчатой пары (рис.  $1, \delta$ ).

Первый вид оснастки прост в изготовлении, но формирование профилированных лент требует значительных затрат времени. Оснастка, состоящая из зубчатой пары, более дорогостоящая в изготовлении, но целесообразна при изготовлении больших партий профилированной ленты.

Для соединения элементов профилированных полос в блок сотового заполнителя применяли способ точечной и диффузионной сварки. Точечную сварку проводили на опорной планке, изготовленной из стали в виде «гребенки» (рис. 2). Для диффузионной сварки использовали, соответственно, оснастку, состоящую из набора «гребенок».

Прочность соединений на растяжение

05	I	ежим свар	ки	Место	σ,	σ,	
Образец	$T_{\rm cB}$ , ${}^{\rm o}{\rm C}$	$P_{\rm cB}$ , МПа	$t_{\rm cb}$ , мин	разрушения	МΠа	σ <sub>cp</sub> , MΠa	
				-	67,9		
OM	-	-	-	-	58,9	68,0	
				-	77,3		
				Захваты	59,7		
Сварное	600	40	20	->>-	56,1	64,0	
соединение	000 40	20	Зона соединения	76,1	0-7,0		

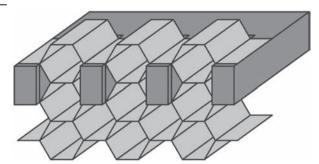


Рис. 2. Вид оснастки «гребенка» для сварки сотового заполнителя

Для проведения механических испытаний сварных соединений из фольги на растяжение была использована универсальная машина MTS 810. При исследовании механических характеристик сотовой конструкции на сжатие использовали цифровой контроллер давления фирмы «KOLI» марки XK3118T1 и датчик давления фирмы «CAS» марки MNC-1 с рабочим интервалом от 0 до 1000 кг.

Диффузионную сварку в вакууме проводили в установке П-115 по методике, подробно описанной в работе [4].

Исследование микроструктуры сварного соединения проводили на поперечных шлифах с помощью сканирующего электронного микроскопа, оснащенного энергодисперсионным спектрометром ENERGY 200 и оптического металлографического микроскопа ММТ-1600В.

Диффузионную сварку в вакууме алюминиевого сплава АД1 выполняли при температуре  $T_{\rm cg} =$ = 480...600 °С, давлении  $P_{\rm cB}$  = 10...40 МПа, продолжительности процесса  $t_{\rm cB}$  = 10...20 мин, вахуум в камере поддерживали на уровне 1,33·10-3 Па. Оксидную пленку удаляли путем механической зачистки, после чего свариваемые поверхности обезжиривали в спирте. Размер нахлеста свариваемых образцов составлял 10 мм.

Как показали исследования, при сварке фольги на режиме, который согласно литературным данным соответствует оптимальному [5], в зоне соединения образцов наблюдаются отдельные участки схватывания. Установлено, что увеличение давления до 40 МПа и продолжительности процесса до 20 мин обеспечивает формирование фи-

зического контакта по всей поверхности образцов. При повышении температуры сварки с 480 до 600 °C количество дефектов в зоне соединения уменьшается.

Механические свойства на растяжение определяли как для алюминиевой фольги в исходном состоянии, так и для сварных соединений (таблица). Установлено, что прочность исходного металла из сплава АД1 составляет  $\sigma_{_{\rm B}} = 68,0$  МПа. Средняя прочность сварных образцов равна  $\sigma_{_{\rm B}} =$  64,0 МПа, т. е. коэффициент прочности соединений составляет 0,94 уровня исходного материала.

Точечную сварку проводили при комнатной температуре на воздухе. Перед сваркой контактные поверхности фольги зачищали механическим путем и обезжиривали. Процесс вели на следующих режимах: напряжение  $U_{\rm cB}=3$  В, сила тока  $I_{\rm cB}=270...300$  А. Интенсивность нагрева при сварке определяли продолжительностью процесса, которая задавалась реле времени в диапазоне  $t_{\rm cB}=0,2...5,0$  с. Визуальный контроль поверхности и испытание соединений на растяжение показали, что оптимальным является продолжительность цикла сварки  $t_{\rm cB}=0,5...1,0$  с.

В образцах, полученных при продолжительности импульса менее 0.5 с, наблюдается частичное плавление соединяемых поверхностей под электродом с формированием сварных точек малого диаметра (рис. 3, a). Увеличение времени сварки до 1 с позволяет повысить качество соединения и

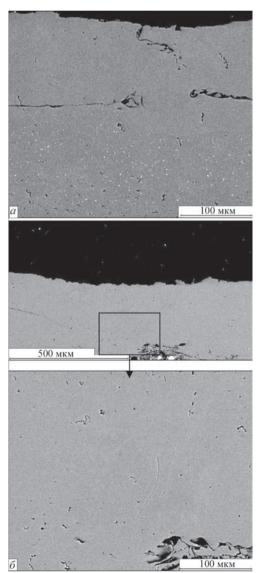


Рис. 3. Микроструктура соединений, полученных точечной сваркой при продолжительности процесса 0,2 (a) и 1 с ( $\delta$ )

способствует формированию плотного соединения под всей поверхностью электрода (рис.  $3, \delta$ ).

С учетом того, что процесс диффузионной сварки является более трудоемким, в дальнейшем для сварки элементов сотового заполнителя применяли точечную сварку.

Устойчивость сотового заполнителя к воздействию внешних нагрузок в соответствии с методиками, приведенными работах [6, 7], определяли с помощью испытаний на сжатие. Установлено, что деформирование сотового заполнителя из сплава АД1 происходит при среднем значении усилия сжатия, равном 23,3 МПа. Анализ элементов сотового заполнителя после испытания на сжатие показал, что в процессе деформации отслоения стенок не происходит.

При изготовлении трехслойной панели необходимо соединить сотовый заполнитель с обшивками, обеспечив формирование тавровых соединений. Диффузионная сварка в вакууме наиболее подходит для этих целей, так как позволяет максимально точно контролировать все параметры процесса.

Одним из основных требований при диффузионной сварке является плоскопараллельность свариваемых поверхностей. Однако технология получения сотового заполнителя из профилированных полос не обеспечивает этого. Вследствие возникающих в ходе точечной сварки напряжений происходит коробление блока сотового заполнителя. Поэтому нами была разработана технология шлифовки его контактных поверхностей. С учетом того, что сотовый заполнитель изготавливается из алюминиевого сплава толщиной 0,15 мм, непосредственная механическая обработка последнего невозможна из-за его высокой пластичности. Для обеспечения устойчивости стенок ячеек необходимо обеспечить их жесткость за счет заполнения их другим материалом. При этом материал для заливки сот должен соответствовать следующим требованиям:

- иметь низкую температуру плавления;
- быть достаточно жестким и прочным;
- быть инертным по отношению к материалу сотового заполнителя алюминию;
  - хорошо обрабатываться методом шлифования;
  - легко удаляться.

В качестве материала для заливки сотового заполнителя исследовалась возможность применения канифоли, серы, парафина.

При использовании серы ( $T_{\rm пл}=115~{\rm °C}$ ) необходимо учитывать, что выше  $160~{\rm °C}$  она имеет повышенную вязкость, что делает ее использование нетехнологичным. Наибольшую вязкость расплав серы приобретает при температуре  $190~{\rm °C}$ , дальнейшее повышение температуры сопровождает-

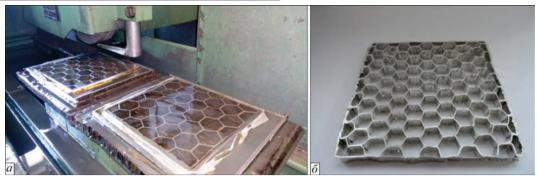


Рис. 4. Вид сотового заполнителя во время шлифования (a) и после удаления канифоли  $(\delta)$ 

ся уменьшением вязкости и выше 300 °C жидкотекучесть расплавленной серы снова повышается. Поэтому заливку ячеек сот необходимо проводить при температуре 300...350 °C.

Парафин имеет температуру плавления  $T_{\text{пп}} =$ = 45...65 °C, но при затвердевании дает значительную усадку, поэтому заливку требуется проводить в несколько этапов.

Канифоль плавится при температуре  $T_{nn} =$ = 100...130 °C. В расплавленном состоянии имеет достаточно низкую вязкость, что положительно влияет на технологичность (заполняемость формы). Кроме того, усадка при затвердении канифоли минимальна.

Образцы сотового заполнителя заливали соответствующим веществом (канифоль, сера, парафин) в расплавленном виде, после чего оставляли для отверждения в течение 20...30 мин, далее проводили шлифование контактных поверхностей (рис. 4, a).

Как показали проведенные эксперименты, наилучшую обрабатываемость при шлифовании имеют образцы, залитые канифолью. При использовании парафина происходит его налипание на абразивный инструмент, что затрудняет процесс шлифования. При применении серы наблюдаются участки поверхности, где она отслоилась, что приводит к деформированию стенок заполнителя.

Технологическую операцию удаления материала, залитого в ячейки сотового заполнителя, проводили с помощью повторного нагрева образцов. Эксперименты показали, что остатки парафина легко удаляются из ячеек, если окончательное промывание осуществлять в кипящей воде. В образцах, залитых серой, после ее удаления на поверхности ячеек остается небольшой налет, который с трудом удаляется после промывки в бензоле. В случае применения канифоли ее остатки легко удаляются промывкой в органических растворителях: спирте, бензоле, скипидаре.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что наиболее целесообразно для материала заливки ячеек сотового заполнителя применять канифоль. Она позволяет качественно провести механическую обработку и последующую очистку всех граней сотовых ячеек (рис.  $4, \delta$ ).

Диффузионную сварку трехслойной сотовой панели размером 150×150 мм проводили в специализированном приспособлении, которое конструктивно состоит из нижнего, верхнего фланцев и ограничивающей втулки (рис. 5, а). Фланцы обеспечивают в процессе сварки прижатие по всей площади контакта обшивок к сотовому заполнителю. Назначение ограничивающей втулки заключается в том, чтобы выровнять температурное поле и обеспечить заданный уровень общей пластической деформации на изделии [8]. Режим сварки соответствовал следующим параметрам:  $T_{\rm cB}=540$  °C,  $P_{\rm cB}=5$  МПа,  $t_{\rm cB}=20$  мин. Внешний вид трехслойной сотовой панели, полученной по разработанной методике, приведен на рис. 5,  $\delta$ .

Как показали результаты оптической микроскопии в зоне соединений стенка сотового заполнителя — обшивка дефекты в виде трещин и пор отсутствуют (рис. 6, a).

Для оценки прочности соединения элементов трехслойной панели проводили их испытание на сжатие. Для этого из трехслойной панели вырезали отдельные элементы, соответствующие по размерам единичной шестигранной ячейке.

Размер ячеек сотового заполнителя составлял 10×10 мм, высота 11 мм, толщины обшивок из сплава алюминия АМг2 — 1 мм, а толщина сотового заполнителя из сплава АД1 — 0,15 мм. Общая площадь поверхности образцов составляла около 670 мм<sup>2</sup>, площадь поперечного сечения сотового заполнителя 12 мм<sup>2</sup>.

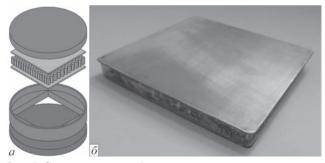


Рис. 5. Схематическое изображение оснастки с элементами панели (a) и вид трехслойной сотовой панели после сварки  $(\delta)$ 

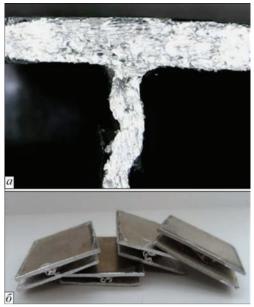


Рис. 6. Макрошлиф таврового соединения стенки сотового заполнителя с обшивкой панели (a) и вид образцов, вырезанных из трехслойной панели после их испытания на сжатие ( $\delta$ )

Как видно из рис. 6,  $\delta$ , при сжатии со степенью деформации порядка 50 % происходит деформация вертикальных стенок заполнителя без разрушения участков сварки сотового заполнителя с обшивками панели. Среднее значение усилия сжатия, при котором происходит деформирование сотового заполнителя в трехслойных панелях, составляет 58,12 МПа.

Таким образом, проведенные исследования показали принципиальную возможность изготовления сварных трехслойных панелей из алюминиевых сплавов. Разработанная технология шлифовки сотового заполнителя позволила обеспечить формирование соединения по всем контактным поверхностям трехслойной панели. Анализ результатов механических испытаний показал, что панели с сотовым заполнителем в виде шестигранных ячеек выдерживают сжимающее нагружение со степенью деформации порядка 50 % без разрушения тавровых сварных соединений.

## Список литературы

- Bitzer T. (1997) Honeycomb Technology. Materials, Design, Manufacturing, Applications And Testing. Springer-Science+Business Media Dordrecht.
- 2. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. (1991) Конструкции с заполнителем: Справочник. Москва, Машиностроение.
- 3. Фальченко Ю. В., Петрушинец Л. В. (2018) Современные способы получения трехслойных панелей из алюминиевых сплавов (Обзор). Автоматическая сварка, 6, 38—46.
- Ustinov A. I., Falchenko Yu. V., Melnichenko T. V. et al. (2013) Diffusion welding of aluminium alloy strengthened by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles through an Al/Cu multilayer foil. *Journal* of Materials Processing Technology, 213, 543–552.
- 5. Козаков Н. Ф. (1968) *Диффузионная сварка в вакууме*. Москва, Машиностроение.
- 6. Heimbs S., Schmeer S., Middendorf P., Maier M. (2007) Strain rate effects in phenolic composites and phenolicimpregnated honeycomb structures. *Composites Science and Technology*, **67**, 2827–2837.
- 7. Xu S., Beynon J. H., Ruan D., Lu G. (2012) Experimental study of the out-of-plane dynamic compression of hexagonal honeycombs. *Composite Structures*, **94**, 2326–2336.
- Фальченко Ю. В., Устінов А. І., Петрушинець Л. В. та ін. (2017) Пристрій для дифузійного зварювання тришарових стільникових панелей. Україна, Пат. 113424. B23К 20/00, B23K 20/14.

#### References

- Bitzer, T. (1997) Honeycomb technology: Materials, design, manufacturing, applications and testing. Springer-Science+Business Media Dordrecht.
- 2. Panin, V.F., Gladkov, Yu.A. (1991) Structures with filler: Refer. book. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- 3. Falchenko, Yu.V., Petrushinets, L.V. (2018) Modern methods of manufacturing three-layer panels of aluminium alloys (Review). *The Paton Welding J.*, **6**, 38-46.
- Ustinov, A.I., Falchenko, Yu.V., Melnichenko, T.V. et al. (2013) Diffusion welding of aluminium alloy strengthened by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles through an Al/Cu multilayer foil. *J. Materials Proc. Technology*, 213, 543-552.
- 5. Kozakov, N.F. (1968) Vacuum diffusion welding. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- Heimbs, S., Schmeer, S., Middendorf, P., Maier, M. (2007) Strain rate effects in phenolic composites and phenolicimpregnated honeycomb structures. *Composites Sci. and Technology*, 67, 2827-2837.
- 7. Xu, S., Beynon, J.H., Ruan, D., Lu, G. (2012) Experimental study of the out-of-plane dynamic compression of hexagonal honeycombs. *Composite Structures*, **94**, 2326-2336.
- 8. Falchenko, Yu.V., Ustinov, A.I., Petrushinets, L.V. et al. (2017) *Device for diffusion welding of three-layer honeycomb panels*. Pat. 113424, Ukraine, Int. Cl. B23K 20/00, B23K 20/14.

## МОЖЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗВАРНИХ ТРЬОХСЛОЙНИХ СОТОВИХ ПАНЕЛЕЙ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

## Л. В. ПЕТРУШИНЕЦЬ, Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО, В. €. ФЕДОРЧУК, В. С. ШИНКАРЕНКО

IEЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

У літако-, суднобудуванні, будівництві та інших галузях промисловості широко застосовуються тришарові стільникові панелі, які конструктивно складаються із стільникового заповнювача і двох обшивок. При відносно невеликій масі ці конструкції мають високі характеристики міцності, звуко- і теплоізоляційні властивості. Основною проблемою при виготовленні тришарової конструкції є приварка верхньої і нижньої обшивки до торцевих поверхонь стільникового заповнювача. В роботі представлені результати з розробки технології виготовлення тришарових стільникових панелей з алюмінієвих сплавів розміром 150×150 мм. Стільниковий заповнювач з алюмінієвого сплаву АД1 товщиною 0,150 мм був отриманий шляхом з'єднання гофрованих смуг в блоки за допомогою точкового зварювання. Плоскопаралельність торцевих поверхонь стільникового заповнювача отримували шліфуванням. При цьому жорсткість конструкції забезпечували за рахунок заповнення комірок каніфоллю. З'єднання заповнювача з обшивками зі сплаву АМг2 товщиною

1,0 мм виконували способом дифузійного зварювання у вакуумі. Процес проводили в пристосуванні, яке складається з нижнього, верхнього фланців і втулки. Фланці забезпечували притиснення обшивок до торцевих поверхонь стільникового заповнювача по всій площі контакту, а втулка дозволяла вирівняти температурне поле у виробі і контролювати величину його деформації в процесі зварювання. Бібліогр. 8, табл. 1, рис. 6.

Kл ю ч о в i с л о в a : тришарова стільникова панель, тонколистові алюмінієві сплави, точкове зварювання, дифузійне зварювання у вакуумі

## POSSIBILITIES OF MANUFACTURING THREE-LAYER WELDED HONEYCOMB PANELS FROM ALUMINIUM ALLOYS

## L.V. PETRUSHYNETS, Yu.V. FALCHENKO, V.E. FEDORCHUK, V.S. SHYNKARENKO

E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Three-layer honeycomb panels are widely applied in aircraft construction, ship-building, construction and others industries. In terms of design they consist of honeycomb core and two skins. At relatively small weight, these structures are characterized by high strength values, sound- and heat-insulating properties. The main problem in manufacturing a three-layer structure is welding the upper and lower skins to end faces of the honeycomb core. The work presents the results of development of the technology of manufacturing three-layer honeycomb panels of 150×150 mm size from aluminium alloys. The honeycomb core from AD1 aluminium alloy 0.150 mm thick was produced by joining the corrugated strips into blocks by spot welding. Flatness of end faces of the honeycomb core was achieved by grinding. The structure rigidity was ensured by filling the cells with colophony. Joining of the core to the skins from AMg2 alloy 1.0 mm thick was performed by diffusion welding in vacuum. The process was conducted in a fixture consisting of the lower and upper flanges and bushing. The flanges provided skin pressing to the honeycomb core end faces over the entire contact area, and the bushing allowed homogenizing the temperature in the item and controlling the extent of its deformation during welding. 8 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

Keywords: three-layer honeycomb panel, sheet aluminium alloys, spot welding, diffusion welding in vacuum

Поступила в редакцию 04.06.2018



ul. Braci Mieroszewskich 124 41-219 Sosnowiec expowelding@exposilesia.pl

Международная Ассоциация «Сварка» (г. Киев) организует участие украинских компаний на коллективном стенде в международной сварочной выставке «ExpoWELDING 2018», г. Сосновец, Польша, 16-18 ноября 2018 г. Выставка проводится один раз в два года и является крупнейшей сварочной выставкой в Восточной Европе. По вопросам участия в выставке «ExpoWELDING 2018» на коллективном стенде просьба обращаться: тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45, E-mail: journal@paton.kiev.ua. Статья, посвященная предыдущей выставке «ExpoWELDING 2016» и участию в ней украинских компаний на коллективном стенде, была опубликована в журнале «Автоматическая сварка» № 12, 2016, стр. 63-67 и находится в открытом доступе по ссылке: http://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2016/as201612part.pdf.

DOI: http://dx.doi.org/10.15407/as2018.07.06

УДК 621.791.927

## РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЗОНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ НАПЛАВКЕ РОЛИКОВ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

#### В. Н. МАТВИЕНКО, Л. К. ЛЕЩИНСКИЙ, В. А. МАЗУР

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». 87500, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7. E-mail: matvivenkovn@gmail.com

Показано, что при наплавке роликов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) на размеры зоны проплавления влияют химический состав и теплофизические свойства материала ролика или наплавленного подслоя. Представлены расчетные значения площади поперечного сечения и глубины проплавления, объема расплавленного металла, полученные численным моделированием на основании решения нелинейного трехмерного дифференциального уравнения теплопроводности с учетом аппроксимированной температурной зависимости коэффициента теплопроводности. Установлено расчетом и подтверждено экспериментом, что размеры зоны проплавления увеличиваются при наплавке ленточным электродом под флюсом на подслой из мартенситно-ферритной высокохромистой стали и в еще большей мере - на подслой из аустенитной хромоникелевой стали по сравнению с наплавкой на материал ролика или на подслой из низкоуглеродистой низколегированной стали. Библиогр. 10, табл. 3. рис. 3.

Ключевые слова: ролик машины непрерывного литья заготовок, основной металл, наплавка под флюсом, ленточный электрод, зона проплавления, размеры, численное моделирование, наплавленный слой, подслой, химический состав, теплофизические характеристики, коэффициент теплопроводности

При изготовлении и восстановлении наплавкой роликов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) уменьшить продольный изгиб ролика, а также снизить вероятность зарождения дефектов позволяет уменьшение объема наплавленного металла путем ограничения количества наплавляемых слоев [1, 2]. В случае применения технологии наплавки двумя слоями — подслоем (промежуточным слоем) и наружным слоем [3], требуемое содержание легирующих элементов в наружном слое зависит как от состава электрода, так и от степени разбавления наружного слоя подслоем, а через подслой — материалом ролика. Даже небольшие изменения степени разбавления могут привести к заметным отклонениям в содержании легирующих элементов в наружном слое. Такие отклонения от состава типа X13 (в частности, 08Х13Н3М1АФБ, широко применяемого для наплавки наружного слоя роликов МНЛЗ) приводят к снижению сопротивления коррозионно-механическому износу, теплосменам, термоусталостному разрушению [4, 5]. При этом возможность получения состава типа X13 в наружном слое зависит не только от обоснованности выбора материалов и параметров режима наплавки, но также от размеров зоны проплавления, в связи с чем растут требования к точности прогноза ее размеров.

Исходные данные для расчета размеров зоны проплавления. Выбор исходных данных для расчета осуществлялся, исходя из предварительного анализа состава и теплофизических свойств как основного материала роликов МНЛЗ,

© В. Н. Матвиенко, Л. К. Лещинский, В. А. Мазур, 2018

так и состава металла для наплавки подслоя и наружного слоя. Из материалов, используемых для изготовления роликов, следует выделить теплоустойчивую сталь перлитного класса 25Х1М1Ф, близкую к ней по составу сталь 25Cr1Mo1V, а также сталь мартенситного класса 42CrMo4 с более высоким содержанием углерода и меньшим хрома и молибдена [3-5]. Получение пластичного подслоя обеспечивает применение низкоуглеродистых низколегированных сталей 06ХН2Г1М, 10Х1М1Г1Н, 10ГС, 12Х1МФ [2]. При наплавке двумя слоями состав подслоя может выбираться с более высоким (чем в наружном слое) содержанием хрома, например, типа X17, а также других легирующих элементов, прежде всего, никеля и молибдена [3]. К составам подслоя с таким содержанием хрома, вместе с тем, обеспечивающим получение аустенитной структуры высокой пластичности, можно отнести стали 08Х17Н12М2, 0Х18Н10, 0Х19Н11М3. В отличие от представленных выше материалов, используемых для изготовления роликов МНЛЗ и выполнения подслоя, теплофизические свойства которых близки, свойства аустенитных сталей, используемых также для подслоя, отличаются значительно. Исходя из этого, расчеты размеров зоны проплавления и последующий анализ выполнялись для теплоустойчивой перлитной стали 25Х1М1Ф, стали мартенситного класса 42CrMo4, хромоникелевой аустенитной стали 08Х17Н12М2, а также для высокохромистой мартенситно-ферритной стали 20X13, применяемой в бандажах роликов составной конструкции. Химическим составом (табл. 1) и структурой рассматриваемых сталей опреде-

Таблица 1. Химический состав используемых в расчете сталей, мас. %

Марка стали	С	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
25X1M1Φ	0,25	0,6	0,3	1,65	0,25	0,75	0,25
42CrMo4	0,42	0,7	0,4	1,10	0,19	0,20	_
20X13	0,20	1,5	1,0	13,0	_	_	_
08X17H12M2	0,08	2,0	1,0	17,0	12,0	2,5	(0,4 Ti)

Таблица 2. Физические свойства используемых в расчете сталей (при 20...100 °C) [6, 7]

Марка стали	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·К)	Удельная теплоем- кость С, Дж/(кг.°С)	Коэффициент температуропроводности $a\cdot 10^6$ , м²/с	Температура плавления $T_{\rm пл}$ , °C
25X1M1Φ	52	486	12,2	1522
42CrMo4	38	506	7,6	1520
20X13	23	452	5,0	1510
08X17H12M2	16	468	5,0	1400

ляются представленные в табл. 2 теплофизические свойства: коэффициент теплопроводности λ, удельная теплоемкость С, коэффициент температуропроводности a, температура плавления  $T_{\rm nn}$ . Расчеты с использованием этих данных, а также экспериментальная проверка проводились для процесса наплавки ленточным электродом Св-12X13 под флюсом АН-26П на пластины толщиной 40 мм. Режим наплавки на постоянном токе обратной полярности: для ленты 45×0,7 мм ток 650 А, напряжение 32 В, скорость наплавки 12 м/ч; для ленты  $60 \times 0.5$  мм — ток 700 A, напряжение 32 В, скорость наплавки 10 м/ч; вылет ленточных электродов 40 мм. Наплавка осуществлялась с использованием аппарата АД-231, источник питания ВДУ-1202.

Результаты расчета размеров зоны проплавления. Для расчета размеров зоны нагрева, ограниченной положением изотермы  $T = T_{\rm nn}$ , применялась математическая модель [8, 9], основанная на численном решении методом конечных элементов нелинейного трехмерного дифференциального уравнения теплопроводности, которое позволяет учитывать влияние температуры на теплофизические свойства основного металла. Для этого использовались уравнения непрерывных функций, характеризующие температурную зависимость коэффициента теплопроводности для рассматриваемых сталей, полученные путем обработки экспериментальных и расчетных данных работ [6, 7].

#### Температурная зависимость коэффициента теплопроводности

25X1M1Φ	$y = -0.0161x + 43,429$
42CrMo4	y = -0.0127x + 39,424
20X13	$y = 29,113e^{-0,0002x}$
	y = 0.0073x + 13.887

Результаты расчета позволяют оценить текущие значения температуры нагрева, а также количественные характеристики теплового поля в зоне плавления основного металла.

Из результатов расчета (рис. 1) следует, что при неизменных условиях процесса наплавки ленточным электродом 45×0,7 мм площадь поперечного сечения, глубина проплавления и объем расплавленного металла для материала ролика сталь 25X1M1Ф значительно меньше, чем для подслоя из стали 08X17H12M2. Это подтверждается полученными при моделировании сечениями трехмерной модели теплового поля изделия в плоскости, перпендикулярной наплавляемой поверхности (рис. 2). Здесь следует отметить, что поскольку теплофизические свойства низкоуглеродистых низколегированных сталей для наплавки подслоя незначительно отличаются от свойств стали 25X1M1Ф, размеры зоны проплавления материала ролика и такого подслоя также мало различаются.

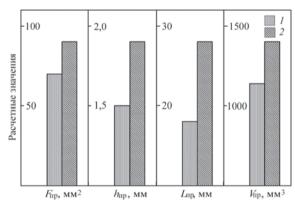


Рис. 1. Расчетные значения размеров зоны проплавления (площади сечения  $F_{\rm np}$ , глубины  $h_{\rm np}$ , длины  $L_{\rm np}$ , объема расплавленного металла  $V_{\rm np}$ ) (лента 45×0,7 мм): I — наплавка на сталь 25X1M1Ф; 2 — на подслой из стали 08X17H12M2

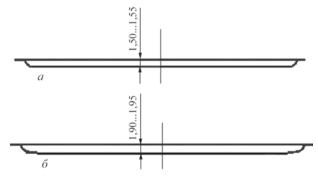


Рис. 2. Граница изотермы  $T_{\rm nn}$  в плоскости, перпендикулярной наплавляемой поверхности (лента 45×0,7 мм): *а* — наплавка на сталь 25X1M1Ф; б — на подслой из стали 08X17H12M2

та от и да от сравнение растепных и экспериментальных данных					
Параметры проплавления	Материал ролик	а сталь 25Х1М1Ф	Материал подслоя сталь 08Х17Н12М2		
	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	
Площадь $F_{\rm np}$ , мм <sup>2</sup>	6872	6773	8992	8893	
Глубина $h_{\rm np}$ , мм	1,501,55	1,541,58	1,901,95	1,921,98	
·					

Таблица 3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Макрошлиф поперечного сечения наплавленного валика



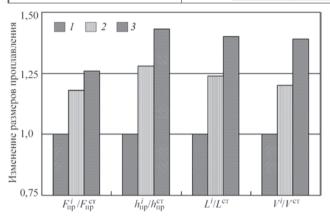


Рис. 3. Соотношение расчетных размеров зоны проплавления при наплавке (лента  $60\times0,5$  мм): I — на подслой из стали 42CrMo4; 2 — на сталь 20X13; 3 — на подслой из стали 08X17H12M2

Значительный интерес представляет влияние состава и свойств металла подложки на соотношение расчетных размеров зоны проплавления. При наплавке ленточным электродом 60×0,5 мм размеры зоны проплавления стали 20Х13 в 1,25 раза, а стали 08Х17Н12М2 — более чем в 1,35 раза, соответственно, превышают эти показатели для стали 42CrMo4 (рис. 3). Еще в большей мере отличается объем расплавленного металла. Сравнение расчетных и экспериментальных данных о влиянии состава и свойств стали 25Х1М1Ф и 08Х17Н12М2 на площадь и глубину проплавления при наплавке ленточным электродом 45×0,7 мм (табл. 3) подтверждает адекватность методики расчета. Уточнение прогноза геометрии зоны проплавления путем применения предложенной расчетной методики позволяет обосновать изменения параметров режима наплавки при разработке технологии восстановления роликов МНЛЗ. С этим связан дифференцированный подход к выбору режима, при котором значения погонной энергии наплавки поверхностного слоя и подслоя различны и определяются их составом и свойствами [10].

#### Выводы

1. При изготовлении и восстановлении роликов МНЛЗ наплавкой поверхностного слоя ленточным электродом размеры зоны проплавления зависят от химического состава и теплофизических свойств основного металла (материала ролика), а

при наплавке на подслой — от состава и свойств подслоя.

2. При наплавке на подслой из мартенситно-ферритной высокохромистой стали и, в большей степени, на подслой из аустенитной хромоникелевой стали, расчетные значения площади поперечного сечения и глубины проплавления, объема расплавленного металла возрастают по сравнению с наплавкой на материал ролика (перлитную сталь) и на подслой из низкоуглеродистой низколегированной стали.

#### Список литературы

- 1. Рябцев И. А., Бабинец А. А., Рябцев И. И. (2011) Влияние пластичного подслоя на термическую стойкость многослойного наплавленного металла. *Автоматическая сварка*, 10, 22–25.
- 2. Рябцев И. А., Сенченков И. К. (2013) Теория и практика наплавочных работ. Киев, Экотехнология.
- 3. Кирчу И. Ф., Степанова Т. В., Супрун М. В. (2015) Перспективы применения стали с нитрованадиевым упрочнением для роликов слябовых МНЛЗ взамен стали 25X1М1Ф. Металл и литье Украины, 1, 18–22.
- 4. Домбровский Ф. С., Лещинский Л. К. (1995) *Работоспо-собность наплавленных роликов машин непрерывного литья заготовок*. Киев, Институт электросварки им. Е. О. Патона.
- 5. (2014) Cored Wires for Cladding and Thermal Metal Spraying. Welding Alloys Group.
- Mills K. C. (2002) Recommended Values of Termophysical Properties for Selected Commercial Alloys. Cambridge, England: Woodhead Publishing.
- Peet M. J., Hasan H. S., Bhadeshia H. K. (2011) Prediction of thermal conductivity of steel. *International Journal of Heat* and Mass, 54, 2602–2616.
- 8. Матвиенко В. Н., Мазур В. А., Лещинский Л. К. (2015) Оценка формы и размеров сварочной ванны при наплавке составным ленточным электродом. *Автоматическая сварка*, **9**, 30–33.
- 9. Мазур В. А., Лещинский Л. К., Матвиенко В. Н. (2018) Влияние теплофизических свойств основного металла на геометрию зоны проплавления при наплавке ленточным электродом. Сварочное производство, 3, 10–14.
- Лещинський Л. К., Матвієнко В. М., Мазур В. О. (2017) Україна, Пат. 116526, МПК В23К 9/04. Спосіб наплавлення роликів машин безперервного лиття заготовок.

#### References

- 1. Ryabtsev, I.A., Babinets, A.A., Ryabtsev, I.I. (2011) Effect of sub-layer on heat resistance of multilayer deposited metal. *The Paton Welding J.*, **10**, 18-21.
- 2. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K. (2013) *Theory and practice of surfacing operations*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
- 3. Kirchu, I.F., Stepanova, T.V., Suprun, M.V. (2015) Prospects of application of steel with nitrovanadium hardening for rolls of slab CCMB instead of steel 25Kh1M1F. *Metall i Litio Ukrainy*, 1, 18-22 [in Russian].

#### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- Dombrovsky, F.S., Leshchinsky, L.K. (1995) Operability of deposited rolls of continuous casting machines for billets. Kiev, PWI [in Russian].
- 5. (2014) Cored wires for cladding and thermal metal spraying. Welding Alloys Group.
- 6. Mills, K.C. (2002) Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys. England, Cambridge, Woodhead Publishing.
- 7. Peet, M.J., Hasan, H.S., Bhadeshia, H.K. (2011) Prediction of thermal conductivity of steel. Int. J. of Heat and Mass, 54, 2602-2616.
- Matvienko, V.N., Mazur, V.A., Leshchinsky, L.K. (2015) Evaluation of shape and sizes of weld pool in surfacing using combined strip electrode. The Paton Welding J., 9, 28-31.
- Mazur, V.A., Leshchinsky, L.K., Matvienko, V.N. (2018) Influence of thermophysical properties of base metal on geometry of penetration zone in strip electrode surfacing. Svarochn. Proizvodstvo, 3, 10-14 [in Russian].
- 10. Matvienko, L.K., Mazur, V.O. (2017) Method of surfacing of rolls of continuous casting machines. Pat. 116526, Ukraine, Int. Cl. B23K 9/04 [in Ukrainian].

#### РОЗРАХУНОК РОЗМІРІВ ЗОНИ ПРОПЛАВЛЕННЯ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ РОЛИКІВ МАШИН БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК

#### В. М. МАТВІЄНКО, Л. К. ЛЕШІНСЬКИЙ, В. О. МАЗУР

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет». 87500, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7. E-mail: matvivenkovn@gmail.com

Показано, що при наплавленні роликів машин безперервного лиття заготовок на розміри зони проплавлення впливають хімічний склад та теплофізичні властивості матеріалу ролика або наплавленого підшару. Представлено розрахункові значення площі поперечного перерізу та глибини проплавлення, об'єму розплавленого металу, що отримані чисельним моделюванням на основі рішення нелінійного тривимірного диференціального рівняння теплопровідності з урахуванням апроксимованої температурної залежності коефіцієнта теплопровідності. Встановлено розрахунком і підтверджено експериментом, що розміри зони проплавлення збільшуються при наплавленні стрічковим електродом під флюсом на підшар з мартенситно-феритної багатохромистої сталі і ще більшою мірою — на підшар з аустенітної хромонікелевої сталі в порівнянні з наплавленням на матеріал ролика або на підшар з низьковуглецевої низьколегованої сталі. Бібліогр. 10, табл. 3. рис. 3.

Ключові слова: ролик машини безперервного лиття заготовок, основний метал, наплавлення під флюсом, стрічковий електрод, зона проплавлення, розміри, чисельне моделювання, наплавлений шар, підшар, хімічний склад, теплофізичні властивості, коефіцієнт теплопровідності

#### CALCULATION OF PENETRATION ZONE DIMENSIONS IN SURFACING OF ROLLS OF MACHINES FOR CONTINUOUS CASTING OF BILLETS

#### V.N. MATVIENKO, L.K. LESHCHINSKY, V.A. MAZUR

State Higher Eductation Instittue Pryazovskyi State Technical University 7 Universitetskaya Str., 87500, Mariupil, Ukraine. E-mail: matvivenkovn@gmail.com

It is shown that in surfacing of rolls in machines for continuous casting of billets (MCCB) the dimensions of penetration zone are affected by chemical composition and thermal physical properties of the material of roller or deposited sublayer. The calculated values of cross-sectional area, penetration depth and volume of the molten metal are presented obtained by numerical modeling on the basis of the solution of the nonlinear three-dimensional differential equation of thermal conductivity, taking into account the approximated temperature dependence of thermal conductivity coefficient. It was established by calculation and confirmed by experiment that the dimensions of penetration zone increase in surfacing by strip electrode under flux on a sublayer of martensitic-ferrite high-chromium steel and in a higher extent on a sublayer of austenitic chromium-nickel steel as compared to surfacing on the material, or on a sublayer of low-carbon low-alloyed steel. 10 Ref., 3 Tab., 3 Fig.

Keywords: roll of machine for continuous casting of billets, base metal, submerged surfacing, strip electrode, penetration zone, dimensions, numerical simulation, deposited layer, sublayer, chemical composition, thermophysical characteristics, thermal conductivity coefficient

Поступила в редакцию 14.05.2018

#### Международная конференция

#### СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ-2018

(инновационные технологические решения и передовые системы автоматизации)

#### 19-21 сентября 2018, Одесса

Организаторами конференции выступают группа компаний TeraWatt Group (ООО «М Технология», ООО «Азов Контролз», ООО «Автоматизация ТераВатт Груп», TeraWatt Solutions GmbH) и ООО «Стил Ворк».

Конференция посвящена особенностям и основным тенденциям развития металлургической отрасли.

В ходе конференции будут рассмотрены, проанализированы современные вызовы и задачи доменного, коксохимического, агломерационного производств, а также особенности функционирования современного газоочистного оборудования.

Место проведения: г. Одесса, ул. Маразлиевская, 1/20 (гостиница «Парк Шевченко»).

DOI: http://dx.doi.org/10.15407/as2018.07.07

УДК 621.791.927.93

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ШЛАКОВОЙ И МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ВАНН ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПРОЦЕССЕ В ТОКОПОДВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

#### Ю. М. КУСКОВ, В. Г. СОЛОВЬЕВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведены эксперименты по изучению вращения шлаковой и металлической ванн при электрошлаковом процессе в токоподводящем кристаллизаторе. Установлено, что вращение металлической ванны может происходить как за счет сил трения от вращающейся шлаковой ванны, так и за счет электромагнитных сил, воздействующих на расплавленный металл. Определяющее влияние на возникновение вращательного эффекта в ваннах оказывает рабочий ток, проходящий через токоведущую секцию кристаллизатора. Библиогр. 13, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: вращение, шлаковая и металлическая ванны, электрошлаковый процесс, токоподводящий кристаллизатор

Электромагнитное воздействие на электрошлаковый процесс показало, что при определенных условиях с его помощью удается не только увеличить коэффициент плавления расходуемого электрода, но и изменять структуру кристаллизующегося металла [1–3]. При этом основной целью большинства исследований является решение именно второй задачи, без оценки физических явлений, происходящих во время взаимодействия рабочего тока и тока магнитного поля.

Практически первой работой, в которой рассматривался процесс возникновения вращения в металлической ванне, является работа [4]. На основании исследований, выполненных на физической модели и оценки полученных результатов в ней, был сделан следующий вывод: «металлическая ванна может приводиться во вращение только за счет сил трения, возникающих на границе контакта с вращающейся шлаковой ванной».

С другой стороны, в работах [1, 5, 6] показано, что с помощью внешних магнитных полей в металлической ванне за счет воздействия объемных электромагнитных сил можно создавать электровихревые течения и вибрацию расплава, а также его вращение независимо от движения шлака по его поверхности.

Разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона токоподводящий кристаллизатор (ТПК) представляет собой секционное устройство, состоящее из нерасходуемого электрода кольцевого типа, выполненного в виде одновиткового индуктора, и формирующей секции, являющейся, по сути, обычным кристаллизатором [7, 8]. Между этими секциями может быть установлена дополнительная промежуточная секция, предупреждающая попадание жидкого металла из формирующей секции на токоведущую.

Электрошлаковый процесс в ТПК должен сопровождаться теми же электромагнитными явлениями, которые происходят в обычном кристаллизаторе при использовании любой технологии плавления металла — сварке, наплавке, переплаве и воздействии дополнительного внешнего магнитного поля. Тем не менее применение ТПК, в котором его токоведущая секция не является внешним источником магнитных полей и представляет собой элемент электрической цепи, обеспечивающей протекание электрошлакового процесса с плавлением подаваемого в шлаковую ванну переплавляемого металла того или иного вида, может влиять на характер взаимодействия рабочего тока и магнитного поля ТПК.

Изучению этого влияния, в частности, на особенности вращения шлаковой и металлической ванн, и посвящена эта статья.

В общем виде в случае электрошлакового процесса в ТПК, взаимодействие осевой составляющей магнитного поля  $B_z$  (формируемого токоподводящей секцией) с радиальной составляющей электрического тока в шлаковой ванне  $I_r$  должно приводить к формированию азимутально-направленной электромагнитной силы  $F_{\omega}$ , вращающей шлак вокруг оси ванны.

Причем этот эффект может проявляться не только в виде углового перемещения слоев шлака, но и в формировании воронки в шлаке по центру кристаллизатора. Так, например, при торцевой электрошлаковой наплавке (ЭШН) в ТПК диаметром 180 мм с использованием расходуемого электрода диаметром 40 мм и при токе кристаллизатора порядка 2,4...2,6 кА глубина воронки составляла более 50 мм (при глубине шлаковой

Влияние режима кольцевой ЭШН на скорость вращения шлаковой ванны (флюс АН-75)

Режи	ім наплавки	Скорость вращения,
U, B	$I_{\scriptscriptstyle  m TIIK}$ , к ${ m A}$	об./мин
28	2,02,6	30
40	3,43,7	3540
42	3,63,9	3645
38	3,54,0	4050
32	4,64,9	60

ванны приблизительно 110 мм) с ее максимальным диаметром под торцом электрода, равном около 50...70 мм. В связи с такими размерами воронки электрод приходилось вводить вовнутрь воронки до соприкосновения его поверхности со шлаковой ванной.

Аналогичная ситуация имеет место и в металлической ванне. Однако вращательный эффект проявляется в значительно меньшей мере, так как составляющие  $B_z$  и  $I_r$  в металлической ванне значительно меньше, чем в шлаковой.

Вращательный эффект наблюдается при использовании расходуемых электродов, бестоковых заготовок, а также дискретной присадки как при торцевой, так и при кольцевой ЭШН. Определяющим фактором, влияющим на вращение шлаковой ванны, является ток  $(I_{\text{тик}})$ , проходящий через токоведущую секцию кристаллизатора.

В таблице представлены результаты кольцевой ЭШН дискретной присадкой заготовки диаметром 170 мм в уширенном ТПК диаметром 255/215 мм.

Разработчик конструкции ТПК Г. В. Ксендзык считал, как и в работе [4], что вращение металлической ванне передается за счет сил трения от вращающейся шлаковой ванны [9].

Сравнительные плавки электрода большого сечения в обычном кристаллизаторе и дискретной присадки в ТПК показали, что в структуре металла, полученного переплавом присадки, величина зерна имеет примерно в три раза меньшие размеры [10]. Однако следует отметить, что при плавке в ТПК сложно установить, какая доля влияния на эти структурные изменения приходится на инокулирующее воздействие частиц присадки, а какое

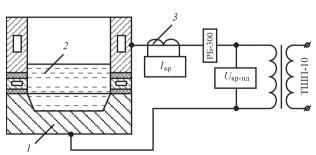


Рис. 1. Схема физической модели оценки поведения шлаковой и металлической ванн в ТПК: I — заглушка-поддон; 2ртуть; 3 — измерительный трансформатор тока

происходит за счет магнитного вращения металлической ванны.

Применение при наплавке жидкого присадочного металла (ЭШН ЖМ) [11, 12] позволило показать, что даже без инокуляции расплава структура получаемых слитков характеризуется мелкозернистым строением [13]. Однако авторы статьи не рассматривают влияния вращения на структурообразование кристаллизующегося металла. Более того, металл, полученный ЭШН ЖМ, сравнивается не с металлом электрошлаковой плавки с расходуемым электродом, а с металлом, выплавленным по традиционной технологии литья. Поэтому основное преимущество металла ЭШН ЖМ связывают с высокой скоростью его кристаллизации.

Для более глубокого понимания поведения шлаковой и металлической ванн в условиях плавки в ТПК было решено провести эксперименты на физической модели согласно рис. 1. ТПК диаметром 60 мм с нижней секцией, выполненной в виде заглушки-поддона с выемкой по ее центру, заполняли ртутью глубиной около 40 мм. Источником питания служил трансформатор ТШП-10. Величину тока  $I_{\rm kp}$  регулировали балластным сопротивлением РБ-300. Было установлено, что при подаче с клемм источника питания напряжения  $U_{\mbox{\tiny KD-\Pi \sc I}}$  от 15 до 30 В на токоведущую секцию ТПК и заглушку происходит вращение ванны ртути с небольшим ее пульсированием.

Таким образом, взаимодействие магнитных полей, формируемых протекающим в ртути рабочим током и токоведущей секцией кристаллизатора, способствует появлению вращательного эффекта в ртути (металлическая ванна) совместно со шлаковой ванной. Дополнительные данные были получены в реальном электрошлаковом процессе. С этой целью в ТПК диаметром 180 мм на стальной затравке диаметром 170 мм и толщиной 20 мм была наведена шлаковая ванна, обеспечивающая нормальную работу кристаллизатора и стабиль-



Рис. 2. Расплавленная поверхность затравки поддона после 10-минутного электрошлакового процесса в ТПК

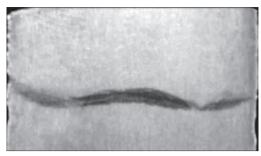


Рис. 3. Форма металлической ванны в наплавляемом металле, образующейся при электрошлаковом переплаве (наплавке) дискретной присадки в ТПК

ное ее существование при токах 2,3...2,5 кА. При этом угловую скорость вращения шлака АНФ-29 изменяли от 72 до 106 об./мин в течение 10 мин. После этого источник питания ТШП-10 отключали, шлаковую шапку после ее остывания удаляли из кристаллизатора и проводили осмотр затравки. Осмотр показал, что за время эксперимента поверхность затравки оплавляется приблизительно на 8...10 мм и формируется в виде «блюдца» с поднятыми по периферии приблизительно на 10 мм краями. При виде сверху на оплавленную поверхность затравки (рис. 2) видны полосы от вращения оплавленного металла, причем центральная часть затравки мало затронута вращательным движением, т. е. практически наблюдается вращение по кольцу. Такой характер вращения отражается и на формировании металлической ванны наплавляемого металла — она может приобретать форму типа «сомбреро» (рис. 3).

#### Выводы

- 1. Вращение металлической ванны в ТПК может происходить как за счет сил трения от вращающейся шлаковой ванны, так и за счет электромагнитных сил, непосредственно воздействующих на расплавленный металл.
- 2. Определяющее влияние на возникновение вращательного эффекта в металлической ванне оказывает рабочий ток, проходящий через токоведущую секцию ТПК.
- 3. Центробежные силы, перемещающие расплавленный металл к периферии (стенкам) кристаллизатора имеют минимальную величину в его центре, что приводит к неодинаковым условиям формирования металлической ванны и ее кристаллизации.

#### Список литературы

- 1. Трочун И. П., Черныш В. П. (1965) Магнитное управление кристаллизацией при электрошлаковом процессе. Сварочное производство, 11, 3–5.
- Топилин В. В., Клюев М. М., Фомичева Н. П., Гребцов Ю. Г. (1968) Измельчение макроструктуры слитков при электрошлаковом переплаве сплавов. Спец. электрометаллургия, 1, 23-8.
- 3. Патон Б. Е. и Медовар Б. И. (ред.) (1986) Металлургия электрошлакового процесса. Киев, Наукова думка.

- Максимович Б. И. (1962) Влияние электромагнитного вращения шлаковой ванны на кристаллизацию металла при электрошлаковом переплаве высоколегированных сталей и сплавов. Электротермия, 5, 9-12.
- 5. Компан Я. Ю., Щербинин Э. В. (1989) Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами. Москва, Машиностроение.
- 6. Протоковилов И. В., Порохонько В. Б. (2015) Физическое моделирование процесса плавления расходуемого электрода при ЭШП в условиях внешнего электромагнитного воздействия. Современная электрометаллургия, 1, 8–12.
- 7. Ксендзык Г. В., Фрумин И. И., Ширин В. С. (1964) Токоподводящий кристаллизатор. СССР, А. с. № 264427.
- 8. Ксендзык Г. В., Фрумин И. И., Ширин В. С. (1969) Устройство для электрошлакового переплава. СССР, A. c. № 337026.
- 9. Ксендзык Г. В. (1975) Токоподводящий кристаллизатор, обеспечивающий вращение шлаковой ванны. Спец. электрометаллургия, **27**, 32–40.
- 10. Кусков Ю. М., Скороходов В. Н., Рябцев И. А., Сарычев И. С. (2001) Электрошлаковая наплавка. Москва, ООО «Наука и технологии».
- 11. Кусков Ю. М. (1996) Электрошлаковая наплавка цилиндрических заготовок жидким присадочным материалом в токоподводящем кристаллизаторе. Автоматическая сварка, 6, 52.
- 12. Медовар Б. И., Чернец А. В., Медовар Л. Б. и др. (1995) Электрошлаковая наплавка жидким присадочным металлом. Пробл. спец. электрометаллургий, 1, 6–11.
- Медовар Б. И., Чернец А. В., Медовар Л. Б. и др. (1997) ЭШН ЖМ – как способ получения тонкой структуры наплавленного слоя из быстрорежущей стали. Там же, 1.3-4.

#### References

- 1. Trochun, I.P., Chernysh, V.P. (1965) Magnetic control of solidification in electroslag process. Svarochn. Proizvodstvo, **11**, 3-5 [in Russian].
- 2. Topilin, V.V., Klyuev, M.M., Fomicheva, N.P. et al. (1968) Refinement of microstructure of ingots in electroslag remelting of alloys. Spets. Elektrometallurgiya, 1, 23-8 [in Russianl
- 3. Paton, B.E., Medovar, B.I. (eds) (1986) Metallurgy of electroslag process. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
- 4. Maksimovich, B.I. (1962) Influence of electromagnetic rotation of slag pool on solidification of metal in electroslag remelting of high-alloy steels and alloys. Elektrotermiya, 5, 9-12 [in Russian].
- 5. Kompan, Ya.Yu., Shcherbinin, E.V. (1989) Electroslag welding and melting with controlled MGD-processes. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- 6. Protokovilov, I.V., Porokhonko, V.B. (2015) Physical modeling of process of consumable electrode melting in ESR under conditions of external magnetic action. Sovrem. Elektrometall., 1, 8-12 [in Russian].
- 7. Ksyondzyk, G.V., Frumin, I.I., Shirin, V.S. (1964) Currentsupplying mold. USSR author's cert. 264427 [in Russian].
- 8. Ksyondzyk, G.V., Frumin, I.I., Shirin, V.S. (1969) Device for electroslag remelting. USSR author's cert. 337026 [in Russian1.
- 9. Ksvondzyk, G.V. (1975) Current-supplying mold providing rotation of slag pool. Spets. Elektrometallurgiya, 27, 32-40 [in Russian].
- 10. Kuskov, Yu.M., Skorokhodov, V.N., Ryabtsev, I.A. et al. (2001) Electroslag surfacing. Moscow, OOO «Nauka i Tekhnologii» [in Russian].
- 11. Kuskov, Yu.M. (1996) Electroslag surfacing of cylindrical billets with liquid filler material in current-supplying mold. Avtomatich. Svarka, 6, 52 [in Russian].
- Medovar, B.I., Chernets, A.V., Medovar, L.B. et al. (1995) Electroslag surfacing with liquid filler metal. Probl. Spets. Elektrometallurgiya 1, 6-11 [in Russian].
- 13. Medovar, B.I., Chernets, A.V., Medovar, L.B. et al. (1997) ESS LM as a method for producing of thin structure of deposited layer from rapid steel. *Ibid.*, 1, 3-4 [in Russian].

#### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИВЧЕННЯ ОБЕРТАННЯ ШЛАКОВОЇ ТА МЕТАЛЕВОЇ ВАНН ПРИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОМУ ПРОЦЕСІ В СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

#### Ю. М. КУСКОВ, В. Г. СОЛОВЙОВ

IEЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведено експерименти по вивченню обертання шлакової і металевої ванн при електрошлаковому процесі в струмопідвідному кристалізаторі. Встановлено, що обертання металевої ванни може відбуватися як за рахунок сил тертя від обертової шлаковой ванни, так і за рахунок електромагнітних сил, що впливають на розплавлений метал. Визначальний вплив на виникнення обертального ефекту в ваннах надає робочий струм, що проходить через струмоведучу секцію кристалізатора. Бібліогр. 13, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: обертання, шлакова і металева ванни, електрошлаковий процес, струмопідвідний кристалізатор

#### EXPERIMENTAL STUDY OF SLAG AND METAL POOL ROTATION IN THE ELECTROSLAG PROCESS IN CURRENT-SUPPLYING MOULD

#### Yu.M. KUSKOV, V.G. SOLOVJOV

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Experiments on studying the rotation of slag and metal pools in the electroslag process in current-supplying mould were conducted. It is found that metal pool rotation can occur both due to the forces of friction from the rotating slag pool, and due to electromagnetic forces applied to the molten metal. Working current flowing through the mould current-conducting section, has a decisive influence on generation of the rotating effect. 13 Ref., 1 Tabl., 3 Fig.

Keywords: rotation, slag and metal pool, electroslag process, current-conducting mould

Поступила в редакцию 07.05.2018



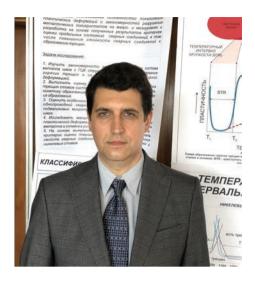
## 60 лет электрошлаковому переплаву

Начало развития способа ЭШП приходится на середину 1940-х гг. В то время специалисты Института электросварки им. Е. О. Патона АН УССР вопреки мнению многочисленных оппонентов показали, что решением проблемы надежности сварных конструкций является повышение чистоты и однородности структуры основного металла [Медовар Б. И., Латаш Ю. В. (1965) Электрошлаковый переплав. Киев, Наукова думка]. Эта идея послужила толчком для проведения систематических работ по улучшению качества стали. Начиная с 1954 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона под руководством академика Б. Е. Патона группа ученых в лице д-ра техн. наук Б. И. Медовара, канд. техн. наук Ю. В. Латаша и инженера Б. Н. Максимовича проводила исследования по разработке способов улучшения качества стали. Результаты глубоких научных исследований качества металла слитков в несколько килограммов, наплавленных на аппаратах электрошлаковой сварки, стали началом по внедрению в производство способа ЭШП.

В 1957 г. в г. Свердловске (сейчас г. Екатеринбург) на Всесоюзном совещании сталеплавильщиков Б. Е. Патон, Б. И. Медовар и Ю. В. Латаш сделали доклад «Электрическая выплавка высоколегированной стали сплавов в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе». Так, на стыке двух областей техники — сварки и металлургии родился новый прогрессивный процесс — электрошлаковый переплав.

К юбилею ЭШП издан специальный выпуск журнала «Современная электрометаллургия» № 2, 2018, полностью посвященный исследованиям электрошлакового процесса, который можно заказать в редакции журнала «Автоматическая сварка».

## ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

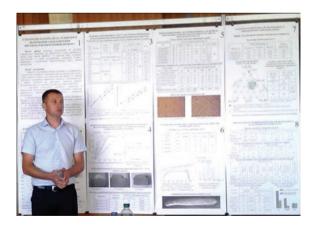


Н. О. Червяков (Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины) 15 мая 2018 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Высокотемпературная деформация и разрушение сварных соединений стабильноаустенитных сталей и никелевых сплавов». Научный консультант диссертанта академик НАН Украины, д-р техн. наук, проф. К. А. Ющенко. В качестве официальных оппонентов выступили: д-р техн наук, проф. В. В. Квасницкий (зав. кафедрой сварочного производства, НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского), д-р техн наук, доц. В. В. Перемитько (декан металлургического факультета, Днепровский ГТУ) и д-р техн. наук, проф. Б. А. Ляшенко (зав. лабораторией упрочнения поверхностей элементов конструкций, Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко).

Работа посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния в шве и зоне термического влияния при дуговой сварке стабильноаустенитних сталей и жаропрочных никелевых сплавов, приводящего к образованию горячих трещин, а также созданию научных основ управления термодеформационными процессами с целью получения сварных соединений без дефектов. Предложен и реализован комплексный подход по оценке склонности к образованию горячих трещин при сварке плавлением конструкционных материалов с аустенитной структурой, включающий экспериментальные и расчетные методики. Это позволило выявить основные факторы, определяющие предрасположенность к возникновению трещин соответствующего типа и, целенаправленно, совершенствовать технологические процессы сварки конструкционных материалов с ГЦК-решеткой.

С использованием стандартизованных методик и оборудования для исследования чувствительности к образованию горячих трещин изучены условия образования горячих трещин в металле аустенитных швов в зависимости от их химического состава и темпа нарастания деформаций. Установлено, что основным типом трещин при многопроходной сварке современных никелевых сплавов системы легирования Ni-Cr-Fe промышленными сварочными проволоками с пониженным содержанием примесных элементов являются трещины провала пластичности. Причиной образования трещин являются деформационные процессы и достижения критического уровня напряженно-деформированного состояния в соответствующих зонах сварного соединения.

Исследованы пути повышения стойкости сварных соединений против образования горячих трещин при сварке плавлением аустенитных сталей и жаропрочных никелевых сплавов. С помощью разработанных математических моделей для оценки термонапряженного состояния на макро- и мезоуровнях при одно- и многослойном выполнении швов проведена оценка кинетики развития термодеформационных процессов в сварных соединениях. Экспериментальным и расчетным путем установлены зависимости между критической деформацией и устойчивостью различных по химическому составу швов к образованию горячих трещин. Показано, что выбор системы легирования швов может способствовать оптимизации термодеформационных процессов при сварке и предупреждению образования горячих трещин.



Т. Б. Майданчук (Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины) 30 мая 2018 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Электродные материалы и технологии сварки и наплавки высокооловянистой бронзы БрОФ10-1». Научный руководитель диссертанта канд. техн. наук, стар. науч. сотр. В. М. Илюшенко (вед. науч. сотр. ИЭС им. Е. О. Патона). В качестве официальных оп-

понентов выступили: д-р техн. наук, проф. О. Г. Быковский (Запорожский НТУ) и канд. техн. наук А. Н. Сливинский (доцент, НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»).

Диссертационная работа посвящена разработке новых сварочных материалов, обеспечивающих состав наплавленного металла типа бронзы БрОФ10-1 и комплекс служебных свойств, а также совершенствованию технологий дуговой сварки и наплавки высокооловянных бронз данными материалами.

В работе определены коэффициенты перехода и оптимальное содержание легирующих (олово, фосфор, никель) компонентов в сердечнике композитной и порошковой проволок, а также в покрытых электродах, при которых обеспечиваются химический состав наплавленного металла, соответствующего бронзе типа БрОФ10-1. За счет введения оптимального количества мрамора достигается минимальное газонасыщение наплавленного металла без снижения стабильности процесса наплавки. Экспериментальным путем установлено, что для улучшения отделения шлаковой корки в состав порошковой проволоки целесообразно добавлять циркон в количестве 2,0...5,0 %.

Выбрана газошлаковая система покрытия электродов, состоящая из мрамора, криолита и кремниефтористого натрия, построена диаграмма фазового равновесия и определено поле оптимального содержания данных компонентов. Показано, что за счет использования натрий-калиевого жидкого стекла, введения большего количества металлических порошков в покрытие, а также применения медного стержня можно улучшить сварочно-технологические и санитарно-гигиенические характеристики покрытых электродов.

Для борьбы с проникновениями высокооловянной бронзы в сталь предложено ограничивать эффективную погонную энергию значением до 450 кДж/м при использовании разработанных сварочных материалов.

Определены оптимальные режимы сварки и наплавки разработанными сварочными материалами. За счет оптимизации режимов автоматизированной двухэлектродной наплавки на сталь и выбора межэлектродного расстоянии достигнуто снижение содержания железа в наплавленном металле ниже 3,0 %. Показано, что при использовании медного стержня увеличивается производительность процесса наплавки, на 7,0...15,0 % снижается проплавление основного металла, а также уменьшается удельное количество теплоты на расплавление единицы массы наплавленного металла.

Установлено, что металл, наплавленный как порошковой проволокой, так и покрытыми электродами имеет значительно более высокие показатели механических свойств по сравнению с литейной бронзой БрО10Ф1Л. Определено, что введение в состав порошковой проволоки модификаторов улучшает в 1,5...2,1 раза антифрикционные свойства наплавленного металла за счет изменения формы и измельчения структурных составляющих по сравнению с литой бронзой.

Технология наплавки на сталь и заварки дефектов литья разработанными сварочными материалами аттестована для внедрения на OAO «Турбоатом» (г. Харьков) при изготовлении и ремонте деталей гидротурбин.

# TOFD MAN<sup>™</sup> — система для тестирования протяженных сварных швов

**TOFD MAN™** — это новейшее решение для эффективного тестирования протяженных сварных соединений трубопроводов, резервуаров для нефти и газа, цистерн, корпусов судов, мостов и т. д., используя метод TOFD.

Система является беспроводной (WiFi-канал), наилучшее соотношение сигнал/шум, отличное решение для контроля с использованием промышленного альпинизма, онлайн анализ данных на ноутбуке или планшете, программное обеспечение, дружественное к сенсорным экранам, простая настройка и замена преобразователей.



Более детальная информация находится по ссылке: www.ndt.com.ua

## МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА «CBAPKA/WELDING 2018»

С 24 по 27 апреля 2018 г. в конгрессно-выставочном центре «Экспофорум» Санкт-Петербурга при содействии Немецкого сварочного общества (DVS) и Китайского машиностроительного общества (СМЕЅ) прошла 19-я Международная выставка «CBAPKA/WELDING 2018».

В работе выставки приняли участие более 90 компаний из 10 стран (РФ, Беларусь, Германия, Китай, Италия, Турция, Чехия и др.) и их представительств.

На выставке были представлены образцы сварочного оборудования и сварочных материалов.

В рамках выставки была проведена Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы повышения эффективности сварочного производства».

На конференции были заслушаны доклады, в том числе:

- заместителя генерального директора НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей» д-ра техн. наук Ильина А. В. «О работах ЦНИИ КМ «Прометей» в области сварки»;
- управляющего директора АО «ОДК-Авиадвигатель» чл.-кор. РАН Иноземцева А. А. «Актуальные проблемы сварочной отрасли в сфере двигателестроения»;
- главного сварщика НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей» д-ра техн. наук Горбача В. Д. «Вопросы актуализации фонда научно-технической документации по сварке и родственным технологиям в судостроении»;
- доктора К. Middeldorfa, SLV GSI (Германия) «Современные тенденции технологий со-

единения. Значение сварочной технологии. Четвертая промышленная революция «Индустрия 4.0» для сварки и родственных технологий»;

- заведующего кафедрой «Теория и технология сварки материалов» СПб ГПУ им. Петра Великого д-ра техн. наук Паршина С. Г. «Приоритетные научные и технологические направления для цифрового сварочного производства».

Кроме того, ПАО «Газпром» выступил организатором конференции «Современные технологии сварки, оборудование и материалы для строительства и ремонта магистральных и промысловых трубопроводов».

На конференции с докладами выступили: главный сварщик ПАО «Газпром» Вышемирский Е. М., заместитель генерального директора НАКС Жабин А. Н., технический директор НАКС Чупрак А. И., а также представители ВНИИ ГАЗ, МГТУ им. Н. Э. Баумана, РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина и ряда других предприятий и организаций.

Во время работы выставки также были проведены следующие мероприятия:

- конкурс дипломных проектов студентов сварочных кафедр вузов;
- -семинар-школа «Новое в квалификации сварочных процедур. Промышленная революция – «Индустрия 4.0»;
- мастер-класс и семинар «Повышение квалификации мастеров производственного обучения по сварке»;
- конференция «Индустрия 4.0. Инновационные решения по управлению сборочно-сварочными процессами».

И. М. Лившиц

# ЗАПОРІЗЬКИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ-2018

22 травня 2018 р. у виставковому центрі «Козак-Палац» м. Запоріжжя відбулося відкриття Запорізького промислового форуму, який об'єднав 26 міжнародну спеціалізовану виставку промислових рішень «Машинобудування. Металургія-2018», спеціалізовану виставку-конференцію варних технологій «Литво», 11 спеціалізовану виставку-конференцію конструкційних матеріалів «Композити та Склопластики» і конференцію та експозицію «Зварювання-2018: виробництво та застосування». Це один з найбільших в Україні промислових форумів, що презентує новинки в

галузях металургії, ливарних технологій, машинобудування, композиційних матеріалів, енергетики, електротехніки, автоматизації, зварювання, ІТ-рішень, об'єднує серію науково-практичних конференцій, майстер-класів, практикумів, кооперативних зустрічей.

Більш ніж 160 учасників Запорізького промислового форуму представили свої експозиції.

У ВЦ «Козак-Палац» свою продукцію та технології презентували як великі підприємства, так і малий та середній бізнес. У їх числі — ме-



Фрагмент роботи форуму

талургійний комбінат «Запоріжсталь», акціонерне товариство «Мотор Січ», компанії «Триада-Сварка», «Електротехмаш», ТМ «Аваттом», «ІТ-сплави», «Лідер-Електрик», «Рол Гранд», «ТВ-Сплав», «Югсталь», «ТАТА» та багато інших. Поряд з запоріжцями демонстрували свої стенди представники інших областей України та зарубіжні партнери з Ізраїлю, Італії, Німеччини, Польщі, Туреччини, Чехії, Швейцарії, Швеції. Було представлено машини, механізми та технологічне обладнання, інструменти та оснащення, контрольно-вимірювальні прилади, електротехніка, гідравліка, верстати, технології зварювання.

Відкрила Запорізький промисловий форум-2018 Всеукраїнська конференція «Зварювання-2018»: виробництво та застосування». Захід організовано за підтримки Запорізької облдержадміністрації, Запорізької торгово-промислової палати, Запорізького національного технічного університету. Метою конференції була консолідація дій освіти, науки, бізнесу та промисловості щодо впровадження інноваційних зварювальних технологій та покращення стану зварювального виробництва. У конференції взяли участь понад 100 представників провідних промислових підприємств, бізнесу, наукових та навчальних організацій, відбулись презентації наукових досягнень українських та зарубіжних технічних рішень, втілених на сучасних підприємствах, їх демонстрація на виставці; формування «портфелю замовлень» кадрів для навчальних закладів регіону, інноваційний формат за участі провідних експертів та аналітиків в галузі зварювання. Такий формат дозволив вирішити основні проблеми взаємозв'язку промисловості, бізнесу, освіти та науки; сформувати напрямки вирішення цих питань та зазначити вектори подальшого розвитку інженерії зварювання в запорізькому регіоні.



Робочий момент конференції

Другий день конференції пройшов на базі Запорізького індустріально-політехнічного училища № 23. Гості відвідали навчальні кабінети, майстерні, де навчаються майбутні зварювальники, ознайомились з перспективами подальшої діяльності закладу, підвели підсумки конференції. Цей захід дозволив сформулювати логічну послідовність формування компетенції зварювальника завдяки залученню молодих фахівців усіх рівнів: робочі спеціальності, молодші спеціалісти, студенти, бакалаври, магістри, аспіранти та докторанти.

«Запорізький промисловий форум-2018 презентував унікальну перспективу розвитку як Запорізького краю, так і всієї держави», відмітив виконавчий директор Запорізького обласного об'єднання промисловців та підприємців «Потенціал» Валерій Крайній. «Гордість, – сказав він, — переповнює мене за нас, Запорізький край, і за ту велику роботу, яку організатори форуму зробили сьогодні. Ці три дні, протягом яких проходив Запорізький промисловий форум-2018, будуть унікальними не тільки для Запорізької області, а й для всієї України, для зарубіжних партнерів, які приїхали до нас на цей захід. Є абсолютно позитивні кроки, які торкаються розвитку науки, техніки, нової технології на навчально-технічних конференціях, які будуть працювати в ці дні, я думаю, ми знайдемо партнерів, які зроблять все, щоб Запорізький край, унікальній промисловий та індустріальний край, мав розвиток, мав нові технології і мав прекрасне майбутнє. Дякую Вам за те, що Ви з нами!»

При підведенні підсумків було прийнято рішення про організацію та проведення конференції такого формату на постійній основі.

Пост-реліз

# КОНФЕРЕНЦИЯ «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО И ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ»

29-31 мая 2018 г. в Москве в ГНЦ АО «НПО «ЦНИИТМАШ» состоялась Всероссийская научная конференция «Сварка и родственные технологии для изготовления оборудования специального и ответственного назначения».

В ней приняли участие ученые и специалисты из ведущих научных центров России, промышленных предприятий, преподаватели университетов, представители бизнеса и др., всего около 100 человек.

С приветствием к участникам конференции обратились К. А. Косырев (АО «НПО «ЦНИИТ-МАШ»), В. П. Разин («Атомэнергомаш»), А. В. Дуб (АО «Наука и Инновации»).

Работа конференции включала пленарное и секционные заседания. Тематика секций:

Секция I. Сварочные материалы и технологии нового поколения, перспективы политики импортозамещения в области сварки и родственных технологий;

Секция II. Технологии и оборудование лучевых методов сварки, аддитивные технологические процессы, специальные методы нанесения покрытий;

Секция III. Совершенствование сварочного оборудования как средство повышения качества и конкурентоспособности отечественных изделий ответственного и специального назначения;

**Секция IV**. Сварка в твердой фазе.

На пленарном заседании были заслушаны доклады на темы: «Развитие сварки и родственных технологий в АО «НПО «ЦНИИТМАШ» (Ю. С. Волобуев, дир. Института сварки АО «НПО «ЦНИИТМАШ»; «Роль новых материалов и технологий в создании перспективного реакторного оборудования» (А. В. Дуб, зам. ген. дир. АО «Наука и Инновации»); «Состояние и перспективы развития сварочного производства» (В. А. Казаков, президент ООО «Издательский центр «Технология машиностроения»); «Международный подход к сертификации сварщиков и персонала неразрушающего контроля» (Н. Н. Волкова, дир. НУЦ «Контроль и диагностика»; «Отраслевой портал «Сварка и родственные технологии в составе Государственной информационной системы

промышленности» (В. А. Селуянов, совет. Департамента и инвестиционного машиностроения Минпромторга РФ); «Совершенствование технологий сварки и наплавки на основе методов адаптивного импульсного управления энергетическими параметрами режима для производства и ремонта конструкций ответственного назначения в условиях низких климатических температур» (Ю. Н. Сараев, гл. науч. сотр. Института физики прочности и материаловедения Сибирского отд. РАН); «Комплексные решения ЭСАБ для изготовления сосудов давления энергетической отрасли «АЭС» (В. В. Ширяев, А. Б. Беликов, ООО «ЭСАБ»); «Современные технологические процессы сварки и наплавки на транспорте» (С. Ю. Петров, нач. НТЦ «Сварка на транспорте» ВО «РУТ»).

Среди докладов, представленных на І-й секции, большой интерес вызвали сообщения на темы: «О системном подходе к решению проблемы свариваемости хладостойких мостовых сталей» (Б. Ф. Якушин, В. П. Тихонов, С. В. Потапов, В. С. Килёв, МГТУ им. Н. Э. Баумана); «Новые керамические флюсы для сварки, наплавки и объекты их применения в машиностроении и энергомашиностроении» (О. С. Волобуев, К. А. Денисов, С. Ю. Волобуев, АО «НПО «ЦНИИТМАШ»); «О результатах испытаний сварочных материалов для сварки и наплавки оборудования атомных энергетических установок» (Д. Ю. Похилов, И. М. Лившиц, И. И. Власов, Н. П. Романов, ООО «Ижорские сварочные материалы»).

Следует отметить, что в работе І-й секции приняли участие специалисты 7 предприятий, входящих в ассоциацию «Электрод» — ООО «Техпром», ООО «Высокие технологии», ООО «Ижорские сварочные материалы», ЗАО «ЭЛЗ», ООО «Магнитогорский электродный завод», ЗАО «Завод сварочных материалов», «Судиславльский ЗСМ».

В заключение участникам конференции была предоставлена возможность ознакомиться с производственной и экспериментальной базой АО «НПО «ЦНИИТМАШ» и стендовыми докладами.

Пост-релиз

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА»

С 31 мая по 1 июня 2018 г. в Роза Хутор (под г. Сочи) некоммерческим партнерством «Национальное Промышленное Сварочное Общество» (НП «НПСО») при поддержке ООО «НИИМонтаж» (г. Краснодар) проведена научно-техническая конференция «Сварочные материалы и оборудование для сварки. Перспективы производства».

В конференции приняли участие свыше 50 специалистов, представляющих предприятия, организации и центры России, занятые в сфере разработки и производства сварочных материалов и оборудования, а также центральные и региональные отделения НАКС, высшие учебные заведения.

Открыл конференцию директор НП «НПСО» С. А. Штоколов. С приветствием к участникам конференции обратились генеральный директор НАКС А. И. Прилуцкий и президент ассоциации «Электрод» Е. Н. Палиевская.

В пленарном режиме в течение двух дней участники конференции заслушали 19 докладов. Среди них:

«Состояние и перспективы производства сварочных порошковых проволок на ОАО «Электросварка» (M. B. Kapacee, «ИТС», г. Санкт-Петербург);

«Технологическая модернизация сварочных автоматов модульной конструкции» ( $A.~M.~\Phi u$ вейский, ООО «ШТОРМ», г. Екатеринбург);

«Абинский электрометаллургический завод - новый производитель сварочных материалов» (А. Ю. Дзюба, ЦЗЛ «АЭМЗ», г. Абинск, Краснодарский край);

«Производство керамических флюсов на ПАО ЧТПЗ» (Н. А. Кайчева, Челябинский трубный завод);

«Новые электроды производства ООО «РО-ТЕКС» для сварки магистральных трубопроводов» (О. В. Дзюба, ООО «РОТЕКС», г. Краснодар);

«Сварочные электроды производства ООО «Астрон-Сварка» (А. П. Мажирин, Уральский электродный завод, г. Екатеринбург);

«Разработка модификатора с целью повышения хладостойкости сварных соединений при отрицательных (до -70 °C) температурах» (T. P.Литвинова, АО ФНПЦ «Титан-Баррикады», г. Волгоград);

«Разработка присадочных порошковых проволок, обеспечивающих модифицирование металла шва наноразмерными частицами карбидов вольфрама и титана» (А. С. Панкратов, ФГАУ НУЦСК при МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва);

«Методологические особенности разработки порошковых проволок на предприятии ООО «ВЭЛДНОВА» (Д. В. Строителев, ООО «ВЭЛ-ДНОВА», г. Краснодар);

«Влияние механической активации компонентов электродных покрытий на механические, сварочно-технологические свойства и экономические показатели» (В. Л. Князьков, ООО «Кузбасский центр сварки и контроля);

«Снижение диффузионно-подвижного водорода — эффективный путь повышения качества сварных соединений» (О. В. Дзюба, ООО «РО-ТЕКС», г. Краснодар);

«Новые разработки группы компаний ЗАО НПФ ИТС и завода СЭЛМА в области сварочной техники и технологий» (В. М. Карасев);

«Технологическое оборудование для производства покрытых электродов» (А. Г. Кузнецов, ООО «РОТЕКС», Московская область);

«Автоматизированные установки портальной резки и сварки производства компании АСО-ИК» (А. А. Сигаев, ООО «АСОИК»);

«Особенности разработки наплавочных порошковых проволок с легированием на основе карбида титана» (Р. Л. Пломодьяло, КубГТУ);

«Опыт АО «Краснодаргазстрой» применения сварочных материалов при строительстве объектов ПАО «Газпром»» (С. Н. Гаврилов, АО «Краснодаргазстрой», г. Краснодар);

«Особенности ручной дуговой сварки электродами с покрытием в щелевую разделку» (В. Л. Князьков, ООО «Кузбасский центр сварки и контроля», г. Кемерово);

«Применение отечественных и импортных сварочных материалов группой компаний «Южтехмонтаж»» (В. А. Нестеров, «Южтехмонтаж», г. Ростов-на-Дону);

«Разработка и внедрение многослойных двухкомпонентных флюсовых подкладных лент для односторонней сварки» (В. Н. Бродягин, ООО «АЦГХ», г. Москва).

Пост-релиз

# МЕЖДУНАРОДНЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ФОРУМ В ТАЛЛИННЕ

7-8 июня 2018 г. в г. Таллинне прошел Международный форум на тему «Мобильность в сфере обеспечения обучения в области сварки и родственных процессов в рамках «Индустрия 4.0». Организаторами форума выступили GSI SLV Baltikum, DVS Regional Association Baltikum, Международный институт сварки (МИС) и Европейская федерация сварки (ЕФС). В нем приняли участие свыше 60 специалистов из Германии, Эстонии, Литвы, Латвии, Украины, а также представители Италии (МИС) и Португалии (ЕФС).

Украину на форуме представляли сотрудники Международного учебно-аттестационного центра ИЭС им. Е. О. Патона, НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», предприятие «Орион-групп» и Крюковского вагоностроительного завода. Работа форума включала пленарные доклады, а также участие в круглых столах и работе секций. Одним из направлений тематики форума явилось обсуждение программ обучения специалистов сварочного профиля.

Подобные программы должны быть достаточно гибкими, чтобы дать возможность слушателю самостоятельно устанавливать темп обучения и учитывать опыт его работы в области сварочного производства наряду с квалификациями, полученными в учебных заведениях. Примером таких программ является система подготовки и аттестации сварщиков, разработанная Международным институтом сварки. Доклад представителей МУАЦ ИЭС им. Е. О. Патона был посвящен успехам во внедрении этой программы на национальном уровне. На сегодня соответствующими министерствами утвержден стандарт профессионального образования и межотраслевая квалификационная характеристика интегрированной профессии «Сварщик». Стандарт предусматривает модульную систему обучения, поэтому может быть с легкостью трансформирован в программу профессионального образования, базирующуюся на опыте работы кандидата. Также новая программа предусматривает возможность для училищ проводить независимую аттестацию на предприятиях, заинтересованных в выпускниках, с привлечением аттестационных комиссий Украинского аттестационного комитета сварщиков. Примером такого сотрудничества стала программа ВПУ № 25 г. Кременчуг и Крюковского



Участники форума (слева направо): Х.-Г. Гросс (Германия), Е. П. Чвертко и П. П. Проценко (Украина)

вагоностроительного завода. Была дана краткая характеристика Закона об образовании, принятого в 2017 г. Коренным его отличием от всех предыдущих стало официальное признание профессионального образования и определение ответственностей, связанных с разработкой и утверждением соответствующих стандартов. Отмечено, что в 2018 г. Кабинетом министров Украины профессия «сварщик» была внесена в перечень приоритетных для государства. На данный момент в перечне 25 профессий из общего числа порядка 450. В текущем году 25 училищ получат финансирование от государства на общую сумму порядка 120 млн грн на переоборудование материально-технической базы и переподготовку персонала с целью полного перехода на обучение по указанному стандарту профессионального образования.

Во время выступления были представлены результаты гармонизации учебных программ с различными квалификационными уровнями в Украине с международными.

Секционные заседания были посвящены внедрению на национальных уровнях программ обучения, переподготовки, аттестации и классификации персонала сварочного производства, повышению гибкости и доступности таких программ, а также проблемам разработки оборудования и производственных систем в рамках концепции «Индустрия 4.0» и переводу предприятий на работу с ними.

Е. П. Чвертко

# МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ТИТАН 2018. ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ В УКРАИНЕ»

11–13 июня 2018 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (г. Киев) прошла Международная конференция «Титан 2018. Производство и применение в Украине». Ее организаторами выступили Национальная академия наук Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, АО «Мотор Сич», ПАО «Институт титана», Запорожский ГТУ, Международная Ассоциация «Сварка». Конференция была посвящена 100-летию Национальной академии наук Украины. В ней приняли участие свыше 120 человек из 40 организаций. В их числе известные ученые ряда академических институтов Украины: академики Л. М. Лобанов, Г. М. Григоренко, О. М. Ивасишин, С. А. Фирстов, З. Т. Назарчук, члены-корреспонденты С. В. Ахонин и В. М. Нестеренков, профессора учебных заведений, руководители и ведущие специалисты государственных и коммерческих предприятий.

В конференции приняли участие также зарубежные специалисты из Физико-технического института НАН Беларуси, Польского института сварки, Sichuan Henghui New Material, Китай, Sichuan Technical Exchange Center, Китай, Sichuan Vanadium & Titanium Industrial Technology Institute, Китай, Panzhihua Innovation and Startup S&T Development, Китай, Panzhihua Iron and Steel Group, Китай, Panzhihua University, Китай, ASTEC Engineering GmbH, Австрия, Astron Ltd, Новая Зеландия.

Конференцию открыл зам. директора ИЭС академик Л. М. Лобанов. Он отметил актуальность тематики конференции, высокую значимость достижений украинских ученых и специалистов в этой области, поблагодарил иногородних и зарубежных участников за приезд и пожелал всем плодотворной работы.

На конференции в пленарном режиме были заслушаны 16 докладов. Большой интерес вызвал доклад академика О. М. Ивасишина из Института металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины «Основные тенденции в развитии порошковой металлургии и 3D технологий титана». Основной задачей материаловедения титановых сплавов является разработка новых технологических подходов, которые бы обеспечивали снижение себестоимости производства титановых изделий при сохранении уникального комплекса физико-механических характеристик этих материалов. Применение порошковых технологий в производстве титановых сплавов и изделий является эффективным способом снизить их себестоимость, повысить конкурентоспособность с другими конструкционными материалами и, в результате, расширить сферу практического использования титана. Докладчик рассказал о современных технологиях порошковой металлургии титана, которые обеспечивают получение изделий с требуемыми физико-механическими свойствами, не уступающими свойствам материалов, полученных традиционными методами литья и горячей деформации. Значительный практический интерес представляют последние разработки в области аддитивных технологий титана, направленные на снижение отходов производства при получении высококачественных изделий для различных областей техники и медицины. В докладе обсуждено влияние задействованных технологических подходов на микроструктуру, содержание примесей и, как результат, комплекс свойств полученных титановых сплавов, композитов и изделий из них.

В докладе академика С. А. Фирстова (Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины) «Некоторые тенденции в разработке новых сплавов титана» отмечено, что определенную активность в публикациях, посвященных новым сплавам на основе титана, привлекают два направления — жаропрочные и жаростойкие сплавы титана и сплавы титана биомедицинского назначения.

В первой группе представляют интерес сплавы титана, легированные, кроме других «привычных» элементов (алюминий, олово, цирконий и др.) бором и кремнием, а также интерметаллидные сплавы титана и сплавы титана, упрочненные интерметаллидами.

Основываясь на сходстве диаграмм фазовых равновесий сплавов системы титан-кремний и железо-углерод, предложено рассматривать так называемые титановые стали и титановые чугуны. Термомеханическая обработка первой группы сплавов с содержанием кремния до 3 % позволяет повысить предел текучести при температуре 700 °C до 650 МПа при достижении прочности при комнатной температуре свыше 1150 МПа. При этом жаростойкость таких сплавов существенно превосходит жаростойкость,









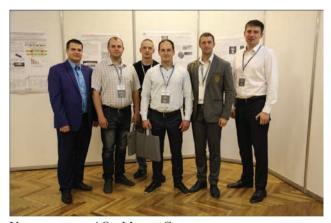
Выступления академиков О. М. Ивасишина, С. А. Фирстова, чл.-корр. В. М. Нестеренкова, акад. З. Т. Назарчука



Чл.-корр. С. В. Ахонин (в центре) с сотрудниками и коллегами

например, сплава Т16242. В «титановых сталях», варьируя содержание других легирующих элементов, можно в широких пределах изменять морфологию мартенситных фаз, регулировать прокаливаемость.

В «титановых чугунах» можно обеспечить высокую жаропрочность. Предел текучести



Участники из АО «Мотор Сич» во время сессии стендовых докладов

при 800 °C достигает 330 МПа и выше. Возможно существенно повысить модуль Юнга до 160 ГПа и выше. Представляет интерес образование тройных нанодисперсных эвтектических структур.

В случае сплавов титана биомедицинского применения обычно решается задача получения сплавов с модулем Юнга, приближающихся к модулю Юнга костного материала, для увеличения биомеханической совместимости. Однако при этом снижение модуля неизбежно влечет понижение прочностных характеристик.

Поэтому для конкретных применений необходима оптимизация прочностных и упругих характеристик. Для обеспечения биосовместимости предложена разработка сплавов, легированных «нетоксичными» или даже «полезными» для человеческого организма элементами. Здесь, как и в случае жаропрочных материалов, привлекает внимание «титановая сталь», легированная оптимальным количеством кремния. Показано, что введение кремния позволяет резко повысить бисовместимость титановых имплантатов, в сравнении с известным сплавом ВТ6, содержащим «токсичные» алюминий и ванадий, и, даже, чистым титаном.

Одной из важнейших задач является переход к 3D прототипированию, для чего необходимо решать задачи получения гранул нужной дисперсности из новой группы сплавов.

В докладе чл.-кор. НАН Украины *С. В. Ахонина* (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины) «Развитие металлургии титана и сплавов на его основе в Украине» рассмотрены особенности







Во время посещения ГП НПЦ «ТИТАН» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины



У стенда Запорожского титано-магниевого комбината металлургического производства титана и титановых полуфабрикатов в Украине.

Титан является уникальным конструкционным материалом. Благодаря высокой удельной прочности сплавы на основе титана нашли широкое применение в авиа- и ракетостроении, производстве военной техники. Хорошая коррозионная стойкость титана обусловливает его значительное использование в химическом и энергетическом машиностроении, при изготовлении теплообменного оборудования и морской техники. Отличная совместимость титана с биологическими тканями определяет его применение при создании эндопротезов.

Украина является одной из пяти стран мира, которые имеет полный цикл производства титана от добычи титансодержащих руд, их обогащения и производства губчатого титана до выплавки слитков титановых сплавов и произ-



У стенда издательства ИЭС

водства практически полного спектра титановых полуфабрикатов — отливок, поковок, прутков, труб и проволоки.

Основой металлургического передела титана в Украине является технология электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью, которая отличается рядом преимуществ по сравнению с традиционным способом получения слитков – вакуумно-дуговым переплавом:

- полное исключение из технологического цикла операции прессования расходуемого электрода, которая требует специального прессового оборудования большой мощности;
- возможность производства слитков не только круглого, но и слитков-слябов прямоугольного сечения, используемых в качестве заготовки для производства листового проката;



Участники конференции у входа в центральный корпус ИЭС

- гарантированное удаление тугоплавких неметаллических включений в промежуточной емкости и повышение за счет этого качества металла слитков;
- получение структурно и химически однородных слитков с равноосной структурой;
- увеличение выхода годного металла за счет сокращения количества переплавов (один вместо двух-трех).

Разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины технологические процессы электронно-лучевой плавки дают возможность получать высококачественные слитки титана и его сплавов с однородной бездефектной структурой. Разработанные технологии позволяют за счет использования более дешевого исходного сырья и увеличения сквозного выхода годного металла снизить себестоимость титановых полуфабрикатов, а, следовательно, повысить конкурентоспособность и расширить области применения титана в различных отраслях промышленности.

Доклад на тему «ЭЛС тонкостенных гофрированных несущих авиационных конструкций из титанового сплава и оценка их сопротивления усталости» представил К. С. Хрипко (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины). В нем показаны экономические преимущества применения ЭЛС и ее технологические особенности при изготовлении балочных конструкций.

В докладе С. П. Панова «Titanium smelting in the loboratory disk botton casting furnace» (Astron Ltd, New Zeland) приведены экспериментальные исследования по созданию новой технологии получения титановых изделий, либо отработки новых составов титановых сплавов в печи с данным съемом изделия массой до 100 кг. В печи переплавляется таблетка титановой губки с использованием индукционного нагрева.

А. В. Овчинников (Запорожский ГТУ МОН Украины) в докладе «Применение титана в аддитивных технологиях» рассказал об основных способах формирования изделий методами аддитивных технологий. По его мнению в Запорожском регионе реальна организация научно-производственного кластера аддитивных технологий как за счет наличия производственной базы сырьевых материалов (ЗТМК, ЗМОЗ), так и за счет научно-исследовательских организаций.

Доклад на тему «Титан и аддитивное производство» представил Д. В. Ковальчук (ЧАО «НВО «Червона хвиля», Киев). В нем был представлен анализ существующих технологий аддитивного производства титановых сплавов, соответствующих технических, технологических и экономических проблем, путей их решения.

Были также заслушаны доклады на темы:

«Концептуальные решения производственного цикла изготовления деталей из титановых сплавов при помощи аддитивных технологий» (Янко Т. Б., Доценко Р. Б., ПАО «Институт титана», НПП «Электромаш», Запорожье);

«High Speed Friction Welding of Titanium Alloys — Structure and Properties of Joints» (Damian Miara<sup>1</sup>, Jolanta Matusiar<sup>1</sup>, Adam Pietras<sup>1</sup>, Masiej Krystian<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Insytut Spawalnictwa, Gliwice, Poland, <sup>2</sup>Austrian Institute of Technology, Vienna, Aistia);

«Влияние структурно-фазового состояния титановых сплавов на их механические свойства в зависимости от метода и скорости испытаний» (Марковский П. Е., Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Киев);

«Комплексно-легированные сплавы на основе алюминидов титана  $\gamma TiAl/\alpha_2 Ti_3Al \gg (\Phi upcmos)$  $C. A.^{1}$ , Горная И. Д. $^{1}$ , Подрезов Ю.  $H.^{1}$ , Бондарь А. А.  $^{1}$ , Романко П. М.  $^{1}$ , Голтвяница В. С.  $^{2}$ , Шереметьев А. В.<sup>3</sup>, <sup>1</sup>Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев,  ${}^{2}OOO$  «Риал»,  ${}^{3}\Gamma\Pi$  «Ивченко-Прогресс», Запорожье);

«Теоретическое описание равновесных диаграмм состояния и фазовых превращений титановых сплавов системы титан-алюминий» (Костин В. А., Григоренко Г. М., Григоренко С. Г., ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев);

«Особенности производства ленточных литых заготовок марки BT-1 или GRADE 2 из низкосортного губчатого титана» (Калинюк А. Н., Дереча А. Я., Тэлин В. В., Коляда А. Ф., Костенко В. И., Иванов Н. М. (ООО «Стратегия БМ», Киев);

«Микроструктура и свойства многослойных материалов на основе сплава Ti-6Al-4V, полученных по порошковой технологии» (Ивасишин О. М.<sup>1</sup>, Марковский П. Е.<sup>1</sup>, Саввакин Д.  $\Gamma$ .<sup>1</sup>, Стачюк А. А. $^{1}$ , Приходько С. В. $^{2}$ ,  $^{1}$ Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Киев, <sup>2</sup>Инженерно-материаловедческий факультет, Университет Калифорнии, Лос-Анджелес, США).

На конференции были представлены также 45 стендовых докладов. С ними можно было ознакомиться до и после окончания пленарных докладов конференции и во время перерывов.

Во время работы конференции, в рамках экспозиции ИЭС, была проведена выставка «Производство и сварка титана», в которой приняли участие Запорожский титано-магниевый комбинат, ЧАО «НВО «Червона Хвиля», ГП НТЦ «Патон-Армения» ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, ООО «Витова», ООО «Мелитэк-Украина», ООО «Спектро-Украина». Большой интерес у участников конференции вызвала уникальная экспозиция художественных изделий из титана, которую представил художник-сварщик Дмитрий Кушнирук.

Участники конференции имели возможность познакомиться с направлениями издательской деятельности ИЭС, в том числе с журналами «Автоматическая сварка», «Современная электрометаллургия», «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», «The Paton Welding Journal», а также с книгами и сборниками по сварке и производству титана. Особый интерес вызвал четвертый выпуск сборника «Титан. Технологии. Оборудование. Производство» (Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2017. – 254 с.) Сборник включает более сорока статей, опубликованных в основном в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за период 2014-2016 гг. по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов (предыдущие три выпуска сборника «Титан. Технологии. Оборудование. Производство», включающие статьи из журналов «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за периоды 2001–2004, 2005–2010, 2011– 2013 гг. находятся в открытом доступе на сайте www.patonpublishinghouse.com/rus/compilations).

По завершению пленарных докладов для участников конференции была организована прогулка на теплоходе по р. Днепр, во время которой были продолжены дискуссии и обсуждения основной темы конференции: титан металл настоящего и будущего. В непринужденной обстановке можно было задать вопросы академикам, директорам институтов и предприятий и, что важно, получить на них ответы.

13 июня была организована ознакомительная поездка для участников конференции на ГП НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Предприятие специализируется на производстве с помощью электронно-лучевого переплава слитков титана и его сплавов, а также жаропрочных сплавов. Большой интерес вызвала технология оплавления поверхности готовых слитков ЭЛП, которая заменяет последующую механическую обработку слитков.

К концу сентября 2018 г. будут изданы труды конференции «Титан 2018. Производство и применение в Украине», которые можно заказать в редакции журнала «Автоматическая сварка» или получить в открытом доступе на сайте издательства ИЭС им. Е.О. Патона по ссылке: http://patonpublishinghouse.com/eng/proceedings.

Доброжелательная, гостеприимная, творческая обстановка конференции способствовала развитию полезных дискуссий, установлению деловых контактов. Участники конференции выразили единодушное одобрение предложению о необходимости проведения конференции «Титан 2018. Производство и применение в Украине» на постоянной основе.

Организационный комитет конференции выражает благодарность и признательность ПАО «Институт Титана», ЧАО НВО «Червона Хвиля», НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона и Центру электронно-лучевой сварки ИЭС им. Е. О. Патона за благотворительную помощь, оказанную для проведения конференции «Титан 2018. Производство и применение в Украине».

В. Н. Липодаев

Подписано к печати 19.06.2018. Формат 60×84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24. Печать ООО «ДИА». 03022, г. Киев-22, ул. Васильковская, 45.

## Сессия Научного совета по новым материалам при Комитете по естественным наукам Международной ассоциации академий наук

16-17 мая 2018 г. в Киеве в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины прошла очередная ежегодная сессия Научного совета по новым материалам при Комитете по естественным наукам Международной ассоциации академий наук (МААН). В заседании сессии приняли участие ученые и специалисты в области материаловедения от национальных академий наук, вузов и предприятий Беларуси и Украины.

Пленарное заседание сессии 17 мая 2018 г. открыл академик НАН Украины И. В. Кривцун (Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина). Игорь Витальевич отметил, что это уже 23 сессия Научного совета и в этом году ее программа посвящена конструкционным и функциональным композиционным материалам, их получению и практическому применению. Всего в этом году на пленарном заседании сессии Научного совета по новым материалам представлено 8 докладов. Он также проинформировал участников сессии о том, что 16 мая состоялось заседание секции «Конструкционные и функциональные наноматериалы для медицины» Научного совета по новым материалам. И. В. Кривцун передал участникам сессии пожелания плодотворной работы от президента МААН, президента НАН Украины, директора ИЭС им. Е. О. Патона академика Б. Е. Патона.

Затем выступил академик НАН Беларуси П. А. Витязь. Он обратил внимание участников на то, что с 2018 г. штаб-квартира МААН будет работать в Минске. В сентябре 2018 г. планируется провести в г. Минске юбилейную сессию МААН. П. А. Витязь пригласил участников сессии Научного совета по новым материалам принять участие в этой сессии.

Первым на пленарном заседании был заслушан доклад «Функционализированные полиолефины и многофункциональные композиты на их основе», представленный чл.-кор. НАН Беларуси С. С. Песецким (Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Беларусь). Основная часть доклада была посвящена современному состоянию и перспективам применения полимеров и композитов на их основе в XXI веке. Докладчик отметил, что в настоящее время в мире производится несколько десятков млн т. этилена и его производство непрерывно увеличивается. Были приведены примеры применения новых полимеров в технике. В Беларуси наиболее широко применяются смесевые полимерные композиты в конструкциях автотракторной техники.

«Наночастицы металлов в водных растительных экстрактах: метод получения и структура» - тема доклада академика НАН Украины *Б. А. Мовчана* (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина). Отмечено, что процессы испарения и конденсации различных веществ в вакууме дают возможность получения новых материалов и покрытий с микро- и наноразмерной структурой. Прогресс в области новых конструкционных и функциональных материалов определяют композиционные материалы с наноразмерными структурными элементами в интервале 1...100 нм. При этом происходит дальнейшее совершенствование композиционных материалов с наночастицами серебра, в первую очередь для медицины. Как альтернатива существующим химическим методам синтеза наночастиц разрабатываются биологические методы синтеза наночастиц в растительных экстрактах.

В ИЭС разработан двухстадийный метод обработки растительных объектов. Источник нагрева — электронно-лучевая пушка. На первой стадии производится физическое осаждение дискретных островковых покрытий металлов из паровой фазы в вакууме на поверхность отдельных частиц растений (зерен, листьев, цветков, стеблей). На второй стадии выполняется водная экстракция этих комплексов с образованием композитов — экстракт с наночастицами осажденного металла.

Представленные в докладе результаты исследований демонстрируют технологическую возможность и экономическую целесообразность получения наноструктурных композиций

растительных экстрактов с наночастицами металлов. Электроннно-лучевая технология испарения и конденсации и существующее оборудование открывают широкую перспективу промышленного производства этих материалов для медицины, пищевых продуктов и экологии.

Д-р техн. наук М. Л. Хейфец представил на сессии доклад «Сверхтвердые инструментальные материалы: синтез и применение на основе мультифрактальной параметризации, физико-химического и наноструктурного анализа», подготовленный учеными Беларуси и Украины. Для проведения исследований использовали разработанный авторами многофункциональный атомно-силовой микроскоп и сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) с компьютерной обработкой полученных данных. Использование компьютерной обработки позволяет выполнить визуализацию СЗМ-изображений в двух- и трехмерном представлении; совместить трехмерную топографию поверхности с данными карты свойств; настроить цветовую палитру изображения пользователем; произвести расчет статистических параметров СЗМ-изображений; произвести фрактальный анализ поверхности и построить ее многослойное изображение (нанотомография).

Доклад «Перспективные функциональные материалы с памятью формы» был представлен чл.-кор. НАН Украины Ю. Н. Ковалем (Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, г. Киев, Украина).

К настоящему времени выяснены основные закономерности проявления эффекта памяти формы (ЭПФ) и некоторые «полезные» свойства таких материалов – сверхупругость, демпфирующая способность, возможность преобразования тепловой энергии в механическую, значительная плотность энергии. Основными материалами с ЭПФ, получившими практическое применение, являются нитинол (NiTi), сплавы на медной основе. Однако эти материалы имеют ряд недостатков: деградация свойств при увеличении числа циклов проявления ЭПФ; частота срабатывания при термическом ЭПФ не превышает 1 Гц; верхняя температура возможного использования ограничена 100 °C; наличие вредных для человеческого организма элементов при биомедицинском использовании.

При разработке новейших высокотемпературных сплавов с памятью формы удалось перейти к качественно новой концепции многокомпонентных материалов с высокой энтропией смешения, что обеспечивает высокую стабильность памяти формы. Такая стабильность позволяет выйти на новый уровень применения материалов с памятью формы не только в автомобилестроительной, авиакосмической, энергетической или добывающей отраслях промышленности, но и расширить их медицинское применение.

Чл.-кор. НАН Украины О. Н. Григорьев (ИПМ им. И. Н. Францевича НАН Украины, г. Киев, Украина) представил на сессии доклад «Ультравысокотемпературная керамика — разработка и применение». Ультравысокотемпературная керамика (УВТК) — это материалы на основе борида циркония с добавкой карбида кремния, который обеспечивает защиту от окисления.

Рабочие температуры в окислительной среде: реальные — до 1800...2000 °C при ресурсе не менее десятков часов; планируемые — до 2700 °C.

Такая керамика применяется в энергетике, охране окружающей среды, химической промышленности и др.

«Поликристаллический сверхтвердый материал киборит: свойства и применение» — тема доклада д-ра техн. наук Н. П. Беженара (Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина). Киборит (кубический нитрид бора — КНБ) — второй по твердости материал после алмаза; он характеризуется высокой износостойкостью, термостабильностью, химической стойкостью.

Замена киборитом инструментов из твердого сплава (ВК8, Т5К10, Т15К6) позволила решить следующие задачи: значительно увеличить скорость резания, доведя ее до уровня 80...120 м/мин (минимум в 10 раз); при этом трудоемкость обработки снижается в 2...6 раз; получить шероховатость обрабатываемой поверхности Ra 3,2...1,6 (уровень шлифовки); высокоскоростная обработка пластинами из КНБ на порядок снижает усилия резания, что предотвращает преждевременный износ дорогостоящих станков: токарная обработка инструментом из КНБ позволяет исключить применение плазменного подогрева при обработке брони, что снижает общие затраты на механическую обработку, уменьшает расход электроэнергии, исключает затраты на приобретение и ремонт плазмотронов.

Наряду с использованием в режущем инструменте и конструкционных изделиях, киборит эффективен в инструменте для сварки трением с перемешиванием (СТП).

Д-р техн. наук В. П. Лихошва (Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, Украина) выступил на сессии с докладом «Композиционные и пористые материалы на основе замороженных металлических суспензий». Основная задача исследований — на основе гибридных литейно-лазерных методов формирование металлического суспензионного расплава с равномерно распределенными композитными включениями (металлическими, неметаллическими или порами) с последующей фиксацией полученного структурного состояния скоростным охлаждением (замораживанием).

В результате исследований разработано оборудование, которое позволяет получать композиционные и пористые материалы. С использованием этого оборудования получены образцы алюминиевого сплава АК7, армированного частицами стали Р6М5, и образцы этого сплава различной плотности (в зависимости от содержания пор).

Доклад «Структура и свойства функциональных нанокомпозитов на основе полиэлектролитных комплексов и наночастичек Cu и Ag», представленный канд. физ.-мат. наук В. Л. Демченко (Институт химии высокомолекулярных соединений НАН Украины, г. Киев, Украина), был посвящен исследованию особенностей структурной организации и антимикробных свойств нанокомпозитов, содержащих наночастицы меди и серебра. В результате исследований разработаны методы получения медь- и серебросодержащих полимерных нанокомпозитов технологически простыми и дешевыми способами — химическим (NaBH4, аскорбиновая кислота) и термохимического восстановления ионов металлов в полимерных пленках, которые могут быть перспективными для применения в различных областях медицины и пищевой промышленности.

Участники сессии имели возможность в ходе дискуссии обменяться мнениями о представленных докладах, о состоянии работ в области разработки новых материалов в своих странах, оценить работу Научного совета по новым материалам, высказать пожелания по ее улучшению. Проводимые ежегодно сессии Научного совета по новым материалам МААН позволяют сохранять и развивать творческие связи между учеными различных стран, способствуют интенсификации информационного обмена между ними.

И. А. Рябцев

## Конференция «ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ 2018»

17-19 сентября 2018 г.

г. Санкт-Петербург

Тематика конференции:

- физические основы и математическое моделирование лучевых технологий. CAD-CAM-CAE системы;
- оборудование и технологии сварки, наплавки и термообработки;
- оборудование и технологии аддитивного производства;
- оборудование и технологии резки, прошивки отверстий и обработки поверхности;
- метрология, системы измерений и дефектоскопия;
- ▶ лучевые технологии индустрии 4.0.

Официальные языки конференции: английский, русский

www.ilwt-stu.ru



# MU CTBOPIOEMO TE, ЩО З'ЄДНУЄ ТА ОБ'ЄДНУЄ

НАЙБІЛЬШИЙ ВИРОБНИК ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ В УКРАЇНІ

БІЛЬШЕ НІЖ 75 МАРОК ДІАМЕТРОМ 0,9-6 мм ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ, НАПЛАВЛЕННЯ, **НАПИЛЕННЯ** 

www.weldtech-group.com

Национальная академия наук Украины Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины Международная Ассоциация «Сварка»

IX международная конференция

«Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины

Украина, Одесса, отель «Курортный», 10-14 сентября 2018 г.

#### Оргкомитет

Международная Ассоциация «Сварка», ул. Казимира Малевича, 11, г. Киев, 03150 тел./факс: (38044) 200-82-77; E-mail: journal@paton.kiev.ua; http://pwi-scientists.com/rus/mmi2018

> Национальная академия наук Украины Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики Международная Ассоциация «Сварка»

> > XXII международная конференция

«Современные методы и средства

неразрушающего контроля и технической диагностики»

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины

Украина, Одесса, отель «Курортный», 10-14 сентября 2018 г.

Генеральный спонсор ЗАО «УкрНИИНК»

Оргкомитет

Международная Ассоциация «Сварка», ул. Казимира Малевича, 11, г. Киев, 03150 тел./факс: (38044) 200-82-77; E-mail: journal@paton.kiev.ua; http://pwi-scientists.com/rus/nktd2018

# **Институт титана**

#### ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ИНСТИТУТ ТИТАНА»

специализируется в области разработки техники, технологии и проектировании предприятий для производства цветных и редких металлов, решает вопросы расширения, реконструкции и модернизации объектов производственного назначения.

#### Институт титана выполняет:

- научные исследования
- технологические разработки
- опробование сырья
- проектно-конструкторские разработки

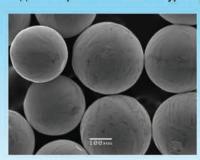
#### оказывает техническую помощь при строительстве, монтаже и освоении технологий производства по следующим направлениям:

- титановые шлаки для получения титана губчатого и пигментного диоксида титана
  - тетрахлорид титана и его очистка
  - титан губчатый
  - порошки титана, изделия из титановых порошков
  - редкие металлы цирконий, ванадий, скандий, галлий
  - полупроводниковые материалы
  - тяжелые металлы цинк, свинец, никель
  - десульфурация чугуна гранулированным магнием
  - нержавеющая сталь (метод газокислородного рафинирования (ГКР)
  - защита окружающей среды, разработка нормативной документации
  - стандартизация, сертификация, метрология, аналитический кон-

троль, стандартные образцы, аккредитация аналитических лабораторий



Порошки сферические и порошки, полученные по технологии гидрирования-дегидрирования титана губчатого и титансодержащих материалов необходимого гранулометрического состава (40-100 мкм) для аддитивных технологий, синтеза изделий методами порошковой металлургии, наплавки, напыления



Пористые спеченные изделия для очистки различных агрессивных сред, а также для фильтрации питьевой и минеральной воды

#### Институт сертифицирован по международному стандарту ISO 9001:2015 ПАО «Институт Титана»

Проспект Соборный, 180, г. Запорожье, Украина, 69035 Тел.: +38 (061) 289-91-00; факс: +38 (061) 289-91-30 E-mail: common@timag.org http://www.timag.org













## XVII МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ

20-23 листопада 2018

Київ

Міжнародний промисловий форум — найбільша промислова виставка в Україні. У 2005 р. вона була зареєстрована у Міжнародній Асоціації Виставкової Індустрії (UFI), що є найвищим рівнем світового визнання для виставки.

Міжнародний промисловий форум включає спеціалізовані виставки у галузі металообробки, машинобудування та суміжних областей, а також насичену програму науково-практичних конференцій, семінарів, презентацій учасників форуму.

Учасниками виставки є провідні промислові підприємства України, близького та далекого зарубіжжя. Шорічно під час форуму презентуються новітні промислові технології, обладнання, інструмент, комплектуючі, послуги.

У рамках форуму міжнародні спеціалізовані виставки:

- ◆ УкрЗварювання (технології, обладнання та матеріали)
- Металообробка (металообробні технології, обладнання)
- ◆ УкрВторТех (комісійна техніка, обладнання)
- ♦ УкрЛитво (обладнання та технології для ливарного виробництва)
- ◆ Гідравліка. Пневматика
- ♦ Підшипники
- ◆ УкрПромАвтоматизація
- ♦ Підйомно-транспортне, складське обладнання
- ◆ Зразки, стандарти, еталони, прилади (контрольно-вимірювальні прилади, лабораторне та випробувальне обладнання, метрологія, сертифікація)
- ◆ Безпека виробництва







Запрошуємо учасників та гостей Промислового форуму на стенд журналу «Автоматическая сварка», який вже 70 років видає ІЕЗ ім. Є. О. Патона. За результатами проведення виставки «УкрЗварювання» у 2017 р. в журналі «Автоматическая сварка», № 1, 2018 р. був надрукован огляд технологій та устаткування з термічного різання металів: http:// patonpublishinghouse.com/rus/journals/as/2018/01.

> Міжнародний виставковий центр www.iec-expo.com.ua/uk/prf-2018.html

## Календарь июля

#### **1** июля 1957



Родился Юрий Станиславович Коробов, профессор, заслуженный изобретатель РФ. При его участии разработаны и внедрены новые конструкции держателей к сварочным полуавтоматам, технологии сварки под флюсом обечаек, наплавки осей балансиров спецтехники. Под его руководством разработана технология напыления электрометаллизацией стального покрытия на алюминиевую основу изнашиваемой поверхности катка гусеничного тягача. Разработана и научно обоснована концепция повышения качества покрытий при электродуговой металлизации на основе анализа результатов моделирования физико-химических процессов и изучения свойств покрытий.

#### **Ч**2 июля 1929



Американский изобретатель и бизнесмен Эдвард Бадд (1870-1946) получил патент на технологию сварки в автомобилестроении. Эдвард Бадд был пионером массового производства цельнометаллических автомобильных кузовов, основав собственную фирму «Эдвард Бадд Мэньюфэкчюринг Компани». Отдавая предпочтение рамным металлическим конструкциям, Эдвард Бадд исходил не только из того, что они прочнее деревянных, но еще и технологичнее. Эдвард Бадд впервые применил точечную сварку в автомобилестроении.

#### **Ч**3 июля 1960



В начале июля 1960 г. Тамара Михайловна Слуцкая (1907–1987), представитель Патоновской школы, впервые разработала самозащитные активированные электродные материалы для дуговой сварки. Ею были разработаны основы легирования проволок редкоземельными и редкими металлами, благодаря чему азот связывался в тугоплавкие нитриды.

#### **Ч**4 июля 1981

На испытание вышла самая большая в мире советская атомная подводная лодка — тяжелый ракетный подводный крейсер стратегического назначения проекта 941 «Акула» длиной более 170 м. Прочные корпуса были сварены из секций (обечаек) цилиндрической, конической и эллиптической формы с толщиной стенок 75 мм. Подобная подводная лодка в это же время создавалась в США и, впоследствии, получила название «Огайо».



#### **Ч**5 июля 1931



Скончался Оскар Чельберг (1870-1931) — шведский изобретатель и промышленник, основатель компании ESAB в 1904 г. Оскар Чельберг изобрел покрытие электрода, используемого при ручной дуговой сварке, погружением оголенной стальной проволоки в смесь карбонатов и силикатов. Целью покрытия является защита расплавленного металла от воздействия кислорода и азота, присутствующих в атмосфере. Его пионерские разработки положили начало исследованиям по созданию надежных сварочных электродов. Сегодня ESAB производит сварочные материалы, оборудование для сварки и резки металла практически для всех отраслей промышленности.

ь

<sup>\*</sup> Материал подготовлен компанией ООО «СТИЛ ВОРК» (г. Кривой Рог) при участии редакции журнала. Календарь публикуется ежемесячно, начиная с выпуска журнала «Автоматическая сварка» № 11, 2017 г.

#### **Ч** 6 июля 1935

Начато строительство немецкого тяжелого крейсера «Адмирал Хиппер». После Версальского договора Германия была ограничена в строительстве крупнотоннажных судов. Чтобы официально соответствовать ограничениям по весу, в конструкции подобного типа корабля были включены несколько радикальных инноваций. Конструкторы стали первыми использовать для крупных военных кораблей сварку вместо клепки. Из-за их тяжелого вооружения из восьми 203-мм орудий и маленьких размеров англичане начали называть подобные суда «карманными линкорами». Корпус корабля был построен из поперечных стальных рам; более 90% конструкции соединяли с помощью → сварки, которая уменьшила на 15 % общую массу корпуса судна.



#### **7** июля 1962

На экспериментальном всепогодном истребителе-перехватчике Е-166 КБ «МиГ» был установлен абсолютный рекорд скорости — 2681 км/ч. Этот полет совершил летчик-испытатель Г. К. Мосолов. В отличие от американцев, выбравших в качестве основного материала своего самолета-разведчика титановый сплав, ОКБ А. И. Микояна остановило свой выбор на различных марках стали. Ее применение позволило отказаться от клепаных конструкций в пользу сварных. Это, в свою очередь, потребовало создания новых технологических циклов с учетом применения различных способов сварки при крупнопанельной сборке. Экспериментальная эксплуатация самолета Е-166 позволила полу-Нчить важный опыт полетов при больших сверхзвуковых скоростях.



#### **Ч**8 июля 1761



Родился Василий Владимирович Петров (1761–1834) — русский физик-экспериментатор, электротехник-самоучка, академик Петербургской академии наук. Одним из выдающихся успехов ученого стало открытие в 1802 г. явления электрической дуги и доказательство возможности ее практического применения для целей плавки, сварки металлов, восстановления их из руд и для освещения. Сконструировал в 1802 г. большую гальваническую батарею, состоящую из 2100 медно-цинковых элементов с электродвижущей силой около 1700 В.

#### **Ч**9 июля 2014

Первый запуск с космодрома «Плесецк» ракеты-носителя семейства «Ангара», которая способна вывести на орбиту до 35 т груза. Требованиям прочности и герметичности сварных швов топливных баков наиболее полно удовлетворяла аргонодуговая сварка. Во время постройки ракеты-носителя «Ангара» предполагается постепенно вводить для применения сварку трением с перемешиванием. Ракета-носитель «Ангара» заменяет устаревшую модель «Протон-М».



### **10 июля 1905**

При разгоне собрания рабочих был убит Лука Иванович Борчанинов (1837– 1905) — рабочий Мотовилихского завода, один из первых в России сварщиков. Он работал под руководством Николая Гавриловича Славянова, изобретателя дуговой сварки металлов. Вместе с рабочим Петром Аспидовым сопровождал Славянова на Четвертую электрическую выставку в Санкт-Петербурге, где они оборудовали временную мастерскую и демонстрировали процесс восстановления металлических деталей с помощью электросварки. Участвовал в постройке крупнейшего в России и Европе буксира «Редедя, князь Косогский», где впервые в истории судостроения вместо клёпки использовалась сварка.



#### **Ч** 11 июля 1979

С орбиты сошла, завершив свою работу «Скайлэб» — первая и единственная американская орбитальная станция. В течение полета были проведены эксперименты по оценке влияния невесомости на качество сварных соединений. выполненных электронно-лучевой сваркой. На станции «Скайлэб» был оборудован комплекс, который включал многоцелевые электрические печи и электронно-лучевую установку. Были проведены эксперименты по исследованию расплавленного металла, фотографированию поведения прокаливаемых материалов в невесомости, изучению роста кристаллов, обработке несмешивающихся сплавов, пайке нержавеющей стали.



#### **1**2 июля 1929

ь

Состоялся первый в истории авиации полет германской гигантской летающей лодки «Дорнье Do-X». Самолет предназначался для эксплуатации на дальних пассажирских авиалиниях. 20 октября 1929 г. в ходе 40-минутного демонстрационного полета этот самолет взлетел с Боденского озера со 169 пассажирами на борту. Этот рекорд остался непревзойденным в первой половине XX века. Из-за невысоких летных характеристик самолет на линии не вышел, лишь совершил в 1930-1932 гг. несколько демонстрационных полетов в Африку, Северную и Южную Америку. С целью экономии веса для соединения алюминиевых деталей использовали сварку.



#### **13 июля 1936**

Спущен на воду эскадренный миноносец проекта 7 «Гневный» — головной корабль так называемой сталинской серии, строившихся для советского Военно-Морского Флота во второй половине 1930-х годов. Один из самых массовых типов эскадренных миноносцев в истории советского флота. Толщина обшивки корпуса составляла 5-9 мм, настила палуб — 3-10 мм, водонепроницаемых переборок — всего 3-4 мм. В основном конструкции были клепаными, но при монтаже переборок, платформ под нижней палубой и ряда других элементов применялась электросварка.



#### **14 июля 1969**

Спуск под воду обитаемого подводного аппарата, предназначенного для исследования средних глубин Гольфстрима (до 1000 м), мезоскафа «Бен Франклин». Сконструирован Жаком Пикаром. Особое внимание уделялось сварным швам. Были проведены многочисленные проверки и экспертизы, прежде чем было разрешено использовать аппарат. Для сварки использовались электроды, легированные марганцем и молибденом.



#### **15 июля 2010**



Летом 2010 г. подготовлена к изданию книга «Патоновская школа». В ней представлена информация о всемирно известной патоновской научно-инженерной школе в области сварки и родственных технологий, которая была создана выдающимся ученым академиком Е. О. Патоном и развита достойным продолжателем его дела академиком Б. Е. Патоном. Освещено становление и развитие этой школы, приведены сведения о ее известных представителях.

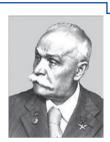
#### **Ч** 16 июля 1961



Указом Президиума Верховного Совета СССР за большие успехи в развитии ракетной промышленности, науки и техники, успешное выполнение первого в мире полета советского человека в космическое пространство на корабле-спутнике «Восток» М. К. Янгелю повторно присвоено звание Героя социалистического труда.

#### **Ч** 17 июля 1964

Постановлением СМ УССР от 12.06.1964 г. № 595 и постановлением Президиума АН УССР от 17.07.1964 г. № 188 учреждена премия им. Е. О. Патона НАН Украины — за выдающиеся научные работы в области создания новых металлических материалов и методов их обработки. Это один из немногих примеров, когда премия названа в честь ученого-сварщика.



#### **□** 18 июля 1955

В Диснейленде было открыто развлекательное сооружение: модель космической ракеты под названием Moonliner. С 1955 по 1962 гг. Moonliner находилась в первой футуристической экспозиции. Она также была примером нового подхода к современным рекламным носителям. Для постройки 27-метровой алюминиевой ракеты была применена сварка в инертных газах. Интересным является то, что с развитием ракетостроения такие же методы сварки были использованы при производстве реальных космических ракет. Постройка такого сооружения еще до запуска первого спутника Земли вызвала широкий резонанс у публики.



#### **1**9 июля 1900

Состоялось открытие Парижского метрополитена. Открытие было приурочено к началу Всемирной выставки 1900 г. Парижский метрополитен один из старейших метрополитенов в Европе (четвертый после лондонского, будапештского и метрополитена в Глазго). Непревзойденные в то время возможности термитной сварки были наглядно продемонстрированы при прокладке путей Парижского метрополитена.



#### **Ч**20 июля 1966

Командир экипажа Нил Армстронг и пилот Эдвин Олдрин американского космического корабля «Апполон-11» посадили лунный модуль на Луну. Выполнение этого проекта не могло быть достигнуто без применения современных технологий сварки.



#### **Ч**21 июля 2007

Небоскреб высотой 829,8 м «Бурдж-Халифа» в процессе строительства официально признан самым высоким строением в мире. Торжественная церемония открытия состоялась 4 января 2010 г. в крупнейшем городе Объединенных Арабских Эмиратов — Дубае. Сварочные технологии были особенно востребованы во время строительства, начиная от фундамента, заканчивая самой верхней точкой. где все крепилось либо болтами, либо электродуговой сваркой. Является одним из рекордов и демонстрирует, каких размеров могут достигать сооружения, создаваемые при помощи сварки. Шпиль «Бурдж-Халифа» — это сложная стальная конструкция с множеством колонн и сварных балок.



#### **Ч** 22 июля 1872



Родился Владимир Федорович Миткевич (1872-1951) — выдающийся русский и советский ученый-электротехник, академик АН СССР, В 1901 г. предложил для преобразования переменного тока в постоянный схемы однофазного двухполупериодного выпрямителя (двухполупериодный с двумя обмотками) и трехфазного однополупериодного выпрямителя (однополупериодный с нулевым выводом). В. Ф. Миткевич первым в мире предложил применять трехфазную дугу для сварки металлов.

#### **Ч** 23 июля 1995



Скончался Наум Александрович Лангер (1910–1995) — ученый химик-аналитик, представитель Патоновской школы. Он внес значительный вклад в развитие методов защиты от коррозии сварных соединений. Им предложены оригинальные электрохимические методы исследования коррозионной стойкости сварных соединений. Они позволяют прогнозировать устойчивость соединений при работе в средах с высокой коррозионной активностью. Лангером исследованы условия возникновения особо угрожающей коррозии сварных соединений — так называемой ножевой коррозии, а также определены пути ее устранения. Результаты ряда работ нашли применение в промышленности.

#### **Ч**24 июля 1967

Состоялось открытие Арки в Сент-Луисе, также известной под названием «Врата на запад» — мемориала, являющегося визитной карточки Сент-Луиса. Ее высота 192 м в самой высокой точке, ширина ее основания также 192 м. Арка является самым высоким памятником на территории США. Строители вместе с компанией «Lincoln Electric» успешно изготовили и соединили 142 части одного из самых сложных строительных сооружений в истории США. При сооружении использовалась ручная дуговая сварка, полуавтоматическая сварка в среде защитных газов, а также сварка под флюсом.



#### **25 июля 1984**

В открытом космосе за бортом орбитальной станции «Салют-7» были проведены эксперименты по электронно-лучевой сварке с помощью сварочного аппарата УРИ (универсальный ручной инструмент), разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона. Этот аппарат позволял осуществлять сварку, резку, пайку металла, нанесение покрытий. Космонавты Владимир Джанибеков и Светлана Савицкая вышли в открытый космос для выполнения сварочных технологических работ. В течение трех с половиной часов космонавты провели весь комплекс запланированных экспериментов.



#### **Ч**26 июля 1845

В первый рейс через Атлантику отправился пароход «Великобритания» с цельнометаллическим корпусом. Судно отличалось огромными размерами: его длина составила почти 100 м. На «Великобритании» впервые вместо гребных колес был использован гребной винт — это стало настоящим событием в судостроении. При создании огромного коленчатого вала для судна был использован новый усовершенствованный «сварочный молот», изобретенный Жозепом Стенсером.



#### **—** 27 июля 1942

Американский истребитель «Мустанг NA-73X» принял первый воздушный бой. Необходимость ускоренного производства военной техники вынуждало применять сварку еще шире. Было подсчитано, что при переходе на сварку в самолете массой 4 т, где обычно требовалось поставить до 100 000 заклепок по 112,5 мг каждая, достигается экономия по массе примерно 10 %. При этом улучшаются аэродинамика, герметичность и коррозионная стойкость, а время изготовления всей конструкции сокращается на 60 %.



#### **Ч** 28 июля 1883

Родился Виктор Петрович Вологдин (1883—1950) — советский ученый и инженер, пионер применения электросварки в судостроении. Спроектировал и построил первое в СССР цельносварное судно. Был сооружен буксирный катер серии «ЖС» (железный сварной). Оказалось, что корпус судна стал легче, трудоемкость создания судна сократилась на треть.



#### **29 июля 1993**

Выдано свидетельство о регистрации Общества сварщиков Украины. Оно было создано в ноябре 1992 г. по инициативе Института электросварки им. Е. О. Патона (Киев). Организация объединяет всех ученых, преподавателей, специалистов, мастеров и рабочих в области сварки и родственных процессов в Украине. Главная задача общества — информационная, консультационная, правовая поддержка всех работников, занятых в сварочном производстве Украины.



#### **Ч** 30 июля 1904

Началось самое продолжительное сражение Русско-Японской войны — оборона Порт-Артура (30 июля—23 декабря 1904). Моряки русского флота и рабочие Балтийского судоремонтного завода, находившиеся в осажденном городе, успешно применяли дуговую сварку угольным электродом при ремонте повреждений корпусов кораблей.



#### **Ч**31 июля 1962

Скончался Нильс Миллер (1899—1962), оставив после себя крупную фирму «Miller Electric». В 1920-х гг. почти вся дуговая электросварка осуществлялась при помощи громоздкого и дорогостоящего трехфазного генератора. В 1929 г. Нильс Миллер понял необходимость создания небольшого и недорогого сварочного аппарата, работающего от электросети. Компания «Miller Electric» была создана в 1935 г. В следующем году Эл Мюлдер, главный инженер «Miller Electric», изобрёл первый в мире промышленный высокочастотный сварочный аппарат на переменном токе. Это изобретение значительно улучшило качество сварочных работ, сделало возможным применение сварки на переменном токе.

