

**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. И. 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**

<i>Головко В. В.</i> Возможности наномодифицирования дендритной структуры металла сварных швов .....	3
<i>Рейдемейстер А. Г., Калашник В. А., Кныш В. В., Соловей С. А.</i> Сопротивление усталости сварных элементов грузовых вагонов новой конструкции, изготовленных из сталей класса прочности С345 и С390 .....	8
<i>Сараев Ю. Н., Лунев А. Г., Киселев А. С., Гордынец А. С., Тригуб М. В.</i> Комплекс для исследования процессов дуговой сварки .....	15

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ**

<i>Нестеренков В. М., Орса Ю. В., Хрипко К. С., Махненко О. В.</i> Технология ЭЛС авиационных конструкций из титановых сплавов .....	25
<i>Ахонин С. В., Белоус В. Ю., Селин Р. В.</i> Воздействие термического цикла аргонодуговой сварки на структуру и свойства псевдо-β-титановых сплавов .....	32
<i>Марков И. Б., Петрик И. А., Селиверстов А. Г., Марченко Ю. А.</i> Ремонт крупногабаритных лопаток вентилятора газотурбинного двигателя .....	39
<i>Бабинец А. А., Рябцев И. А., Панфилов А. И.</i> Материалы для индивидуальной бронезащиты (Обзор) .....	45
<i>Размышляев А. Д., Выдмыш П. А., Агеева М. В.</i> Методика определения индукции управляющего магнитного поля в зоне ванны при дуговой сварке .....	51

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

В Международном институте сварки .....	56
Диссертации на соискание ученой степени .....	57

**ХРОНИКА**

Сварочное оборудование ПАТОН™ на выставке в Польше ...	60
Конференция «Неразрушающий контроль – 2018» .....	61

**Информация**

<i>Зарубежные партнеры.</i> Профессор Ян Пилярчик .....	62
Интервью с А. И. Панфиловым — директором Департамента сварки ООО «Стил Ворк» .....	65
Календарь августа .....	67

# Автоматичне Зварювання

# Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Published 12 times per year since 1948

Головний редактор **Б. Є. Патон**

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

## ЗМІСТ

## CONTENTS

### НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL

- Головко В. В.* Можливості наномодифікування дендритної структури металу зварних швів.....3
- Рейдемейстер А. Г., Калашник В. А., Книш В. В., Соловей С. О.* Опір втомі зварних елементів вантажних вагонів нової конструкції, виготовлених із сталей класу міцності С345 та С390.....8
- Сараєв Ю. М., Луньов А. Г., Кісельов А. С., Гординець А. С., Тригуб М. В.* Комплекс для дослідження процесів дугового зварювання.....15

- Golovko V. V.* Possibilities of nanomodification of dendrite structure of weld metal .....3
- Reidemeister A. G., Kalashnik V. A., Lnysh V. V., Solovej S. A.* Fatigue resistance of welded elements of freight cars of a new design made from steels of S345 and S390 grade.....8
- Saraev Yu. N., Lunev A. G., Kiselev A. S., Gordynets A. S., Trigub M. V.* Complex for investigation of arc welding processes .....15

### ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

### INDUSTRIAL

- Нестеренков В. М., Орса Ю. В., Хрипко К. С., Махненко О. В.* Технологія ЕПЗ авіаційних конструкцій з титанових сплавів .....25
- Ахонін С. В., Білоус В. Ю., Селін Р. В.* Вплив термічного циклу аргонодугового зварювання на структуру та властивості псевдо- $\beta$ -титанових сплавів .....32
- Марков І. Б., Петрик І. А., Селіверстов О. Г., Марченко Ю. А.* Ремонт великогабаритних лопаток вентилятора газотурбінного двигуна .....39
- Бабінець А. А., Рябцев І. О., Панфілов А. І.* Матеріали для індивідуального бронезахисту (Огляд) .....45
- Размишляєв О. Д., Видмиш П. О., Агєєва М. В.* Методика визначення індукції керуючого магнітного поля в зоні ванни при дуговому зварюванні .....51

- Nesterenkov V. M., Orsa Yu. V., Khripko K. S., Makhnenko O. V.* Technology for EBW of aircraft structures of titanium alloys.....25
- Akhonin S. V., Belous V. Yu., Selin R. V.* Influence of the thermal cycle of argon-arc welding on the structure and properties of pseudo  $\beta$ -titanium alloys.....32
- Markov I. B., Petrik I. A., Seliverstov A. G., Marchenko Yu. A.* Repair of large-size blades of fan of gas-turbine engine.....39
- Babinets A. A., Ryabtsev I. A., Panfilov A. I.* Materials for individual armor protection (Review) .....45
- Razmyshlyaev A. D., Vydmysh P. A., Ahieieva M. V.* Methodology of determination of induction of controlled magnetic field in pool zone during arc welding.....51

### КОРОТКІ ПОВІДОМЛЕННЯ

### BRIEF INFORMATION

- У Міжнародному інституті зварювання.....56
- Дисертації на здобуття наукового ступеня.....57

- At the International Institute of Welding .....56
- Dissertation for a scientific degree .....57

### ХРОНІКА

### NEWS

- Зварювальне обладнання ПАТОН™ на виставці в Польщі .....60
- Конференція «Неруйнівний контроль – 2018» .....61

- PATON™ welding equipment at the Exhibition in Poland.....60
- Conference «Non-destructive Testing – 2018» .....61

### ІНФОРМАЦІЯ

### INFORMATIONS

- Зарубіжні партнери.* Професор Ян Пілярчик.....62
- Інтерв'ю з А. І. Панфіловим — директором Департаменту зварювання ТОВ «Стіл Ворк».....65
- Календар серпня.....67

- Foreign partners.* Prof. Yan Pillarchik .....62
- Interview with A.I.Panfilov, Director of Welding Department of OJSC «Steel Work» .....65
- Calendar for August.....67

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

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

#### Адреса редакції

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

#### 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

## ВОЗМОЖНОСТИ НАНОМОДИФИЦИРОВАНИЯ ДЕНДРИТНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ ШВОВ

**В. В. ГОЛОВКО**

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

Показана возможность использования тугоплавких дисперсных соединений для наномодифицирования металла сварных швов. Приведены результаты расчета оптимального размера частиц модификаторов для условий сварочной ванны. Установлено влияние тугоплавких частиц на параметры первичной структуры металла швов. Увеличение размера дендритов, отмеченное в результате введения в сварочную ванну соединений карбида титана и оксида циркония, сопровождается изменением соотношения между содержанием верхнего и нижнего бейнита при сохранении доли мартенсита и аллотриоморфного феррита. В результате увеличиваются как показатели пластичности, так и вязкости металла швов. Библиогр. 14, табл. 4, рис. 3.

*Ключевые слова:* сварка плавлением, модифицирование металла шва, нанодисперсные частицы, размер частиц, размер дендритов, микроструктура, механические свойства

Стальной прокат остается основным материалом при изготовлении сварных металлоконструкций и в ближайшее время сохранит свою позицию в этой сфере. Постоянно растущие требования к надежности и работоспособности конструкций в сочетании с необходимостью снижения затрат на их изготовление вызвали интенсивный рост применения инновационных решений в сталепрокатном производстве. Современные низколегированные высокопрочные стали имеют субмикронную или микронную структуру, что обеспечивает их высокие служебные свойства, однако, практика показала, что усложнение технологии производства проката вызывает увеличение количества проблем, возникающих при его сварке.

Формирование структуры металла швов начинается в ходе кристаллизации сварочной ванны от границ частично оплавившихся зерен основного металла, но в этом процессе нарушается принцип наследственности. Так, например, при сварке металла с размером зерен до 10 мкм формируется шов, в котором размер зерен может достигать 100 мкм и более. Такое несоответствие связано с тем, что в процессе проката стальная заготовка проходит сложнейшую термомеханическую обработку с различным режимом повторного нагрева и цикличности приложенных усилий с целью получения мелкозернистой структуры. Сварной шов формируется как литой металл, который не подвергается такой обработке, поэтому для измельчения его структуры требуются другие технологические приемы. Для измельчения структуры металла швов низколегированных сталей традиционно используются, помимо варьирования параметрами режима сварки, технологии легирования, микролегирования и модифицирования. Появившись в

конце 1950-х годов и с выходом на рынок проката высокопрочных низколегированных сталей, эти технологии развивались и совершенствовались до последнего времени, однако, на сегодня они значительно исчерпали свои возможности. Как показала практика, повышение уровня легирования приводит к снижению показателей пластичности и вязкости металла, а увеличение содержания модификаторов может привести к охрупчиванию границ зерен. Дальнейшее развитие требует применения новых технологий формирования мелкозернистой структуры металла швов.

Традиционно для этих целей используют процессы модифицирования, которые хорошо изучены, детально описаны (например, в монографии [1]) и широко используются на практике. Развитие разрешающей способности оборудования, используемого для металлографических исследований, способствовало росту публикаций в области наноматериалов и нанотехнологий, в том числе наномодифицирования [2–5].

Процессы модифицирования позволяют изменять величину и форму первичных кристаллов, а проведенные в последние годы исследования [6–10] показали, что использование нанотехнологий, основанное на особенностях физико-химических и поверхностных свойств порошковых материалов, может оказать существенное модифицирующее влияние за счет высокой удельной поверхности наноматериалов и высокой энергетической активности наночастиц.

Исходя из отличий гидродинамической обстановки в сварочной ванне от металлического расплава при выплавке стали, основные возможности влияния на формирование дендритной структуры металла швов связаны с наличием высокоскоростных конвективных потоков у фронта кристалли-

Таблица 1. Время диссоциации включений, с

Инокулянт	Размер включений, мкм									
	1,0	2,0	5,0	10	20	40	80	120	160	200
TiC	0,05	0,21	1,34	5,35	21,40	85,61	342,46	770,53	1369,8	2140,4
TiN	0,01	0,06	0,35	1,40	5,60	22,40	89,61	201,62	358,4	560,1
TiO <sub>2</sub>	0,03	0,13	0,83	3,33	13,32	53,29	213,15	479,59	852,6	1332,3

зации, термокапиллярного движения в междендритном пространстве и величиной межфазного натяжения на границе растущего дендрита с металлическим расплавом. Если на первых два фактора можно влиять за счет изменения параметров режима сварки, то последний в значительной мере зависит от наличия поверхностно-активных тугоплавких соединений в слое металлического расплава перед фронтом растущего дендрита. Для повышения эффективности такого влияния размер тугоплавких частиц должен соответствовать размеру вершины растущего дендрита. В процессе кристаллизации ванны при сварке низколегированных высокопрочных сталей формируются дендриты размером 30...40 мкм, на поверхности которых возникают новые центры инициации роста (ветви второго порядка) размером около 10 мкм [11]. Эффективность введения в сварочную ванну (инокулирования) тугоплавких частиц зависит от их размеров, так как слишком мелкие частицы, в связи с высокой интенсивностью их диссоциации в расплаве, могут не оказать влияния на кристаллизацию металла, а слишком большие способны проявить себя как крупные неметаллические включения [5]. Для выбора оптимального размера инокулянтов необходимо определить возможное время существования дисперсных частиц в расплаве металла, т. е. время, в течение которого они могут оказывать влияние на формирование кристаллической структуры сварного шва.

Для выполнения расчетов воспользуемся методикой, предложенной в работе [12]. При сварке низколегированных сталей большое внимание уделяется влиянию неметаллических включений, содержащих соединения титана, на структуру и свойства металла швов. В этой связи рассмотрим возможность использования в качестве дисперсных инокулянтов некоторых тугоплавких соединений титана, физико-химические характеристики которых представлены ниже и использованные для выполнения термодинамических расчетов.

**Физико-химические характеристики**

Плотность, ·10 <sup>3</sup> , кг/м <sup>3</sup> :	
сталь .....	7
TiC .....	5,4
TiN .....	5,4
TiO <sub>2</sub> .....	4,25
Содержание в металле шва, мас. % (кг/м <sup>3</sup> ):	
Ti .....	0,04 (2,8)
C .....	0,07 (4,9)
N .....	0,01 (0,7)
O .....	0,06 (4,2)

Коэффициент диффузии в стали, ·10 <sup>-9</sup> м <sup>2</sup> /с:	
Ti .....	8
C .....	7,9
N .....	3,8
O .....	4,5
Константа равновесия реакции диссоциации при 1873 К:	
TiC .....	-0,475
TiN .....	2,515
TiO <sub>2</sub> .....	-2,485
Коэффициент активности в металле шва:	
Ti .....	8,70
C .....	0,29
N .....	0,11
O .....	1,0

Для проведения термодинамических расчетов была принята схема, в соответствии с которой вокруг тугоплавкого включения радиусом r<sub>0</sub>, находящегося в стальном расплаве, образуется переходной слой, содержащий [i]<sub>пов</sub> элементов, входящих в состав включения.

Время полной диссоциации включения t рассчитываем из выражения

$$t = \frac{r_0^2 A_i \rho_B}{2 A_B D_i ([i]_{пов} - [i]_0)}$$

где A<sub>i</sub> и A<sub>B</sub> — атомные массы элемента, входящего в состав включения и самого включения; [i]<sub>0</sub> и D<sub>i</sub> — содержание элемента в металлическом расплаве и коэффициент его диффузии в этом расплаве; ρ<sub>B</sub> — плотность включения.

По данным, приведенным в литературе [13], время существования сварочной ванны в зависимости от параметров режима сварки может находиться в пределах от 2 до 15 с. В табл. 1 приведены результаты расчета времени, необходимого для полной диссоциации инокулянтов в стальном расплаве при отсутствии перемешивания.

Наличие интенсивных потоков расплавленного металла в сварочной ванне, скорость которых может на порядок превышать скорость сварки [13], значительно повышают скорость диссоциации частиц. Оценочные расчеты, выполненные по методике [12], показывают, что активность процессов диссоциации в этом случае может возрасти на два порядка по сравнению со стационарными условиями.

Исходя из полученных в результате проведенных расчетов данных, можно сделать следующие выводы: во-первых, для сохранения инокулянтов как активных центров влияния на процессы кристаллизации металла сварочной ванны целесообразно вводить их в виде дисперсных частиц

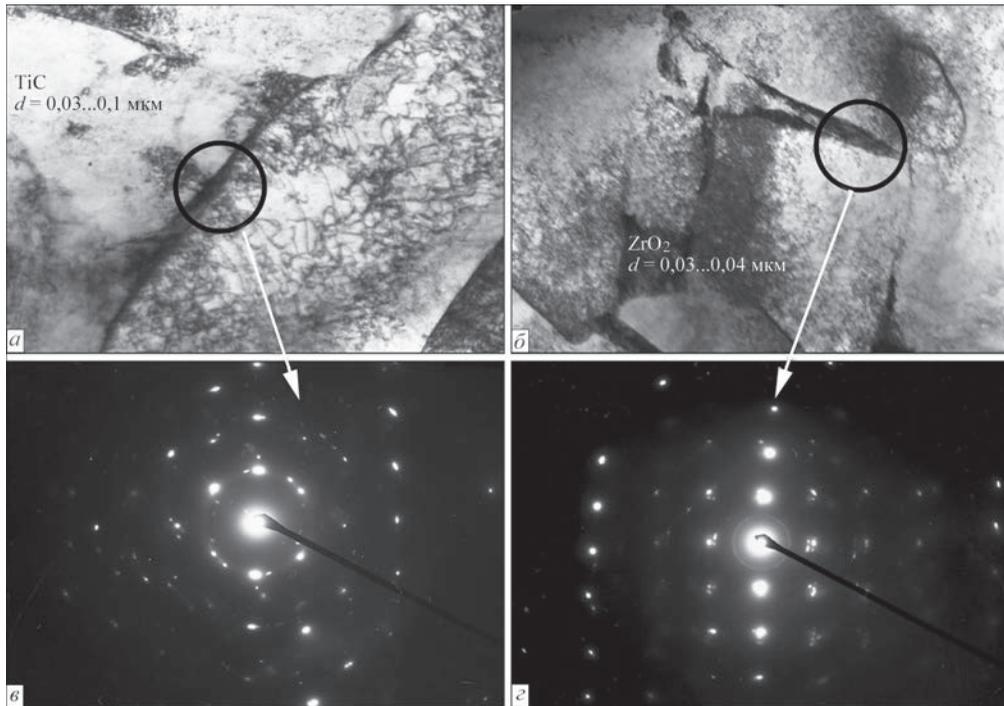


Рис. 1. Тонкая структура металла сварных швов типа 12ГН2ХМ, содержащих включения TiC (а,  $\times 37000$ ),  $ZrO_2$  (б,  $\times 20000$ ); в, г — дифракционная картина участков с включениями

тугоплавких кристаллических соединений размером не менее 0,2 мкм (200 нм); во-вторых, использование для этих целей соединений TiN не позволяет достигнуть поставленных целей, так как включения размером до 50 мкм практически полностью растворяются в стальном расплаве, а присутствие в структуре металла швов более крупных включений может вызвать снижение уровня показателей их пластичности и вязкости.

В процессе роста твердой фазы в металлическом расплаве на межфазной границе образуется слой металла с повышенным содержанием ликвирующих элементов, который определяет энергию межфазного взаимодействия на границе «жидкое – твердое», а, следовательно, величину переохлаждения и скорость кристаллизации, в соответствии с выражением

$$\Delta T = \frac{\sigma_{l-s} T_l}{r \rho q_s},$$

где  $\sigma_{l-s}$  — величина межфазного натяжения на границе «жидкое–твердое»;  $T_l$  — температура ликвидуса металлического расплава;  $r$  — критический радиус зародыша твердой фазы;  $\rho$  и  $q_s$  — плотность и удельная теплота кристаллизации металла.

При контакте тугоплавкого включения с границей растущего дендрита меняется состав пограничного слоя за счет обогащения продуктами диссоциации включения, что может быть описано выражением

$$\Delta T = \frac{m C_0 (1-k)}{k D},$$

где  $m$  — тангенс угла наклона линии ликвидуса сплава;  $C_0$  — исходное содержание примеси в расплаве;  $k$  и  $D$  — коэффициенты распределения и диффузии примеси в расплаве.

Изменяя величину межфазного натяжения на границе «жидкое – твердое», включения могут влиять на скорость роста и морфологию дендритов в затвердевающем металле, и чем ближе будут размеры центров инициации роста дендрита и неметаллического включения, тем более заметным будет это влияние.

На рис. 1 показаны образцы структуры металла швов, полученных при дуговой сварке высокопрочной низколегированной стали с введением в сварочную ванну тугоплавких неметаллических включений. Проводили исследования образцов наплавленного металла, полученных без введения наномодификаторов (швы НМ-0), а также с введением тугоплавких соединений карбида титана (швы TiC) и оксида циркония (швы  $ZrO_2$ ). Частицы оксида циркония и карбида титана размером до 200 нм вводили через сердечник порошковой проволоки, которую подавали в сварочную ванну в виде присадки. Металлографические исследования с использованием просвечивающей электронной микроскопии\*, выполненные на приборе JEM-200 CX (фирмы JEOL) при ускоряющем напряжении 200 кВ показали, что введенные дисперсные включения не диссоциируют полностью в жидком металле и располагаются на границах

\* Исследования выполнены д-ром техн. наук Л. И. Маркашовой.

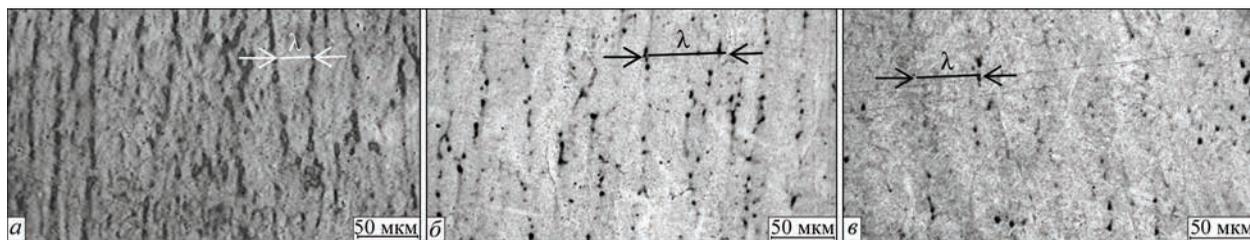


Рис. 2. Дендритная структура металла сварных швов: а — NM-0; б — TiC; в — ZrO<sub>2</sub> (λ — размеры столбчатых дендритов)

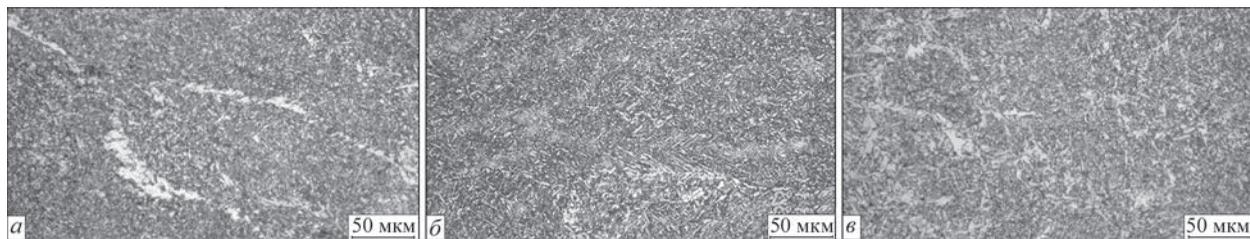


Рис. 3. Вторичная структура металла сварных швов: а — NM-0; б — TiC; в — ZrO<sub>2</sub>

Таблица 2. Содержание основных структурных составляющих металла швов

Шов	Доля составляющих в микроструктуре швов, %			
	Бн	Бв	М	Ф
NM-0	25	60	10	5
ZrO <sub>2</sub>	65	20	10	5
TiC	50	30	10	10

зерен вторичной структуры. При введении в сварочную ванну дисперсных тугоплавких соединений размером не более 200 мкм на границах зерен вторичной структуры были выявлены соответствующие соединения размером от 30 до 100 нм, что свидетельствует о достаточно высокой стойкости этих включений как в жидких, так и в твердых стальных растворах.

Для выяснения вопроса о возможном влиянии этих включений на дендритную структуру исследовали первичную структуру металла шва на полированных образцах, протравленных в кипящем насыщенном растворе пикрата натрия (C<sub>6</sub>H<sub>2</sub>(NO<sub>2</sub>)<sub>3</sub>ONa) в воде. Исследовали микроструктуру последнего прохода металла многопроходного шва (литая структура). Образцы вырезали в направлении, перпендикулярном продольной оси шва, таким образом, чтобы на поверхности шлифа было видно дендриты, которые вырастали в направлении наибольшего термического градиента в сварочной ванне. При исследо-

Таблица 3. Механические свойства металла швов

Шов	σ <sub>в</sub>	σ <sub>0,2</sub>	δ	ψ	KCV, Дж/см <sup>2</sup> при T, °C			
	МПа				%			
NM-0	788	739	11,4	35	20	0	-20	-40
ZrO <sub>2</sub>	645	556	21	60	60	58	57	52
TiC	728	665	19	61	116	96	98	82
					82	72	63	52

Таблица 4. Химический состав металла швов

Шов	C	Si	Mn	S	P	Ni	Mo	Al	Ti	Zr
NM-0	0,050	0,290	1,32	0,024	0,014	2,19	0,27	0,039	0,019	н/о
ZrO <sub>2</sub>	0,053	0,138	0,94	0,020	0,024	1,55	0,23	0,021	0,005	0,06
TiC	0,046	0,340	1,39	0,021	0,019	1,70	0,24	0,033	0,011	н/о

вании первичной структуры по изображениям, полученным методом оптической металлографии\*\*, которые выполнены на оптическом микроскопе НЕОРНОТ 30, определяли размеры столбчатых дендритов (размеры λ на рис. 2).

Результаты анализа показали, что присутствие в сварочной ванне наноразмерных тугоплавких соединений оказывает модифицирующий эффект на размеры дендритов. Если в исходном металле (шов NM-0) усредненная ширина дендритов составляла 25 мкм, то в результате введения наноразмерных соединений карбида титана (шов TiC) и оксида циркония (шов ZrO<sub>2</sub>) этот показатель возрос до уровня 44 и 37 мкм, соответственно.

Изменение морфологии дендритов сказалось на формировании вторичной структуры (рис. 3, табл. 2) и уровне механических свойств металла швов (табл. 3). Из приведенных в табл. 2–4 данных видно, что введение наномодификаторов практически не сказалось на химическом составе металла швов, но при этом заметно изменился состав их структурных составляющих.

Увеличение размера дендритов, отмеченное в результате введения в сварочную ванну соединений карбида титана и оксида циркония, сопровож-

\*\* Исследования выполнены канд. техн. наук Д. Ю. Ермоленко.

ждається изменением соотношения между содержанием бейнита верхнего (Бв) и нижнего (Бн) при сохранении доли мартенсита (М) и аллотриоморфного феррита (Ф). В результате увеличиваются как показатели пластичности, так и вязкости металла швов (табл. 3).

В настоящей работе не рассматривались вопросы, связанные с технологией ввода модификаторов в сварочную ванну, выбором их типа, размеров и состава. Эти вопросы относятся к тематике последующих исследований. В данной работе отражены возможности использования тугоплавких дисперсных соединений для наномодифицирования металла сварных швов.

### Список литературы/References

1. Goldshtejn, Ya.E., Mizin, V.G. (1986) *Modification and microalloying of cast iron and steel*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Hashimoto, M. (2005) Advances in nano-level materials characterization technology. *Nippon Steel Technical Report*, 91(1), 2-6.
3. Suito, H., Ohta, H., Morioka, S. (2006) Refinement of solidification microstructure and austenite grain by inclusion particles. *ISIJ Int.*, 46(6), 840-846.
4. Davydov, S.V. (2006) Nanomodifier as a tool of genetic engineering of structural state of cast iron melt. In: *Proc. of Casting Council No. 1 on Modification as an Effective Method for Improvement of Quality of Cast Irons and Steels*. Chelyabinsk, Chelyabinsky Dom Pechati [in Russian].
5. Ryabtsev, I.A., Kondratiev, I.A., Gadzyra, N.F. et al. (2009) Effect of ultra-dispersed carbides contained in flux-cored wires on properties of heat-resistant deposited metal. *The Paton Welding J.*, 6, 10-13.
6. Saburov, V.P., Eremin, E.N., Cherpanov, A.N., Minnekhanov, G.N. (2002) *Modification of steels and alloys by disperse inoculants*. Omsk, Izd. OmGTU [in Russian].
7. Bolshakov, V.I., Kalinin, A.V. (2016) Particularities of structure formation of modified Si-Mn steels. *Stroitelstvo, Materialovedenie, Mashinostroenie*, 89, 24-29 [in Russian].
8. Borisenko, V.E., Tolochko, N.K. (2008) *Nanomaterials and nanotechnologies*. Minsk, Izd. Tsentr BRU [in Russian].
9. Golovin, Yu.I. (2003) *Introduction to nanotechnology*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
10. Bolshakov, V.I., Tushinsky, L.I. (2010) *Structural theory of hardening of structural steels and other materials*. Dnepropetrovsk, Izd. Svidler.
11. Vanovsek, W., Bernhard, C., Fiedler, M., Posch, G. (2012) Influence of aluminum content on the characterization of microstructure and inclusions in high-strength steel welds. *Weld. World*, 57(1), 73-83.
12. Cherepanov, A.N., Afonin, Yu.V., Malikov, A.G., Orishich, A.M. (2008) About application of refractory compounds in laser welding and treatment of metals and alloys. *Tyazholoe Mashinostroenie*, 4/2, 25-26 [in Russian].
13. Grigoryan, V.A., Stomakhin, A.Ya., Ponomarenko, A.G. et al. (1989) *Physicochemical calculations of electric steel-making processes*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
14. Erokhin, A.A. (1973) *Principles of fusion welding. Physicochemical fundamentals*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

## МОЖЛИВОСТІ НАНОМОДИФІКУВАННЯ ДЕНДРИТНОЇ СТРУКТУРИ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ ШВІВ

**В. В. ГОЛОВКО**

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

Показана можливість використання тугоплавких дисперсних сполук для наномодифікування металу зварних швів. Наведено результати розрахунку оптимального розміру часток модифікаторів для умов зварювальної ванни. Встановлено вплив тугоплавких частинок на параметри первинної структури металу швів. Збільшення розміру дендритів, зазначене в результаті введення в зварювальну ванну з'єднань карбиду титану та оксиду цирконію, супроводжується зміною співвідношення між вмістом верхнього та нижнього бейниту при збереженні частки мартенситу та аллотриоморфного фериту. В результаті збільшуються як показники пластичності, так і в'язкості металу швів. Бібліогр. 14, табл. 4, рис. 3.

*Ключові слова:* зварювання плавленням, модифікування металу шва, нанодисперсні частки, розмір часток, розмір дендритів, мікроструктура, механічні властивості

## POSSIBILITIES OF NANOMODIFICATION OF DENDRITE STRUCTURE OF WELD METAL

**V. V. GOLOVKO**

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Possibility of application of refractory disperses compounds for nanomodification of weld metal was shown. The results of calculation of the optimum size of modifier particles for weld pool conditions are given. Effect of the refractory particles on the parameters of weld metal primary structure was determined. Increase of dendrite size, noted as a result of addition into a weld pool of titanium carbide and zirconium oxide compounds, is accompanied by change of relationship between content of upper and lower bainite preserving fraction of martensite and xenomorphic ferrite. Indices of ductility as well as toughness of weld metal increase as a result. 14 Ref. , 4 Tabl. , 3 Fig.

*Keywords:* fusion welding; weld metal modification, nanodisperse particles, particle size, dendrite size, microstructure, mechanical properties

Поступила в редакцію 05.07.2018

## СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СТАЛЕЙ КЛАССА ПРОЧНОСТИ С345 И С390

**А. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР<sup>1</sup>, В. А. КАЛАШНИК<sup>1</sup>, В. В. КНЫШ<sup>2</sup>, С. А. СОЛОВЕЙ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна,  
49010, г. Днепр, ул. Лазаряна, 2. E-mail: [dnuzt@diit.edu.ua](mailto:dnuzt@diit.edu.ua)

<sup>2</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Изложены результаты экспериментально-расчетных исследований сопротивления усталости натуральных образцов шкворневого узла и узла заделки стойки боковой стены полувагона модели 12–4106–01. Установлено, что их эксплуатационный ресурс определяется сопротивлением усталости сварных соединений элементов конструкций узлов. Предел выносливости для них составляет от 12,1 МПа (узел заделки стойки боковой стены) до 33,6 МПа (шкворневой узел). Установлены участки зарождения усталостных трещин, закономерности их развития и пределы выносливости конструкции. Значения пределов выносливости, как показал расчет напряженного состояния кузова вагона, обеспечивают эксплуатацию до появления усталостной трещины в течение 34,1 и 57,0 лет для шкворневого узла и узла заделки стойки боковой стены, соответственно. Библиогр. 9, табл. 2, рис. 8.

*Ключевые слова:* сварные элементы грузовых вагонов, шкворневой узел, узел заделки стойки боковой стены, сопротивление усталости, напряженное состояние

Наиболее повреждаемыми элементами полувагонов в эксплуатации являются узлы сочленения элементов рамы и стоек боковых стен. Снижение нагруженности этих узлов, создающее предпосылки для увеличения срока службы и снижения затрат на ремонт вагонов, является первоочередной задачей при создании подвижного состава нового поколения. В этой связи ПАО «Днепровагонмаш» разработана модель полувагона 12–4106–01 со стойками боковой стены трубчатой конструкции, которая предполагает увеличение прочности последних. Общий вид узла приведен на рис. 1.

Прочностные характеристики элементов вагона улучшены также за счет применения сталей классов прочности С345 (стойки) и С390 (шкворневой узел).

В связи с изменением конструкции, применением материалов с улучшенными прочностными характеристиками назначенный срок службы был увеличен до 32 лет, что следовало подтвердить результатами работ по оценке ресурса.

Ранее подобные задачи рассматривались в статьях [1–4]. В работе [4] впервые рассмотрена задача исследования усталостной прочности заделки стойки боковой стены, в работе [1] показано, что действующие нормативы для оценки усталостной прочности не в полной мере отражают реальные условия эксплуатации и определены пути дальнейшего развития расчетно-экспериментальной оценки усталостной прочности кузовов грузо-

вых вагонов. В работах [2, 3] приведены результаты исследований усталостной прочности заделки стойки боковой стены с улучшенными прочностными характеристиками для полувагонов с осевыми нагрузками 23,5 и 25 тс.

Днепропетровским национальным университетом железнодорожного транспорта имени ака-



Рис. 1. Узел заделки стойки боковой стены (1) полувагона модели 12–4106–01 (2)

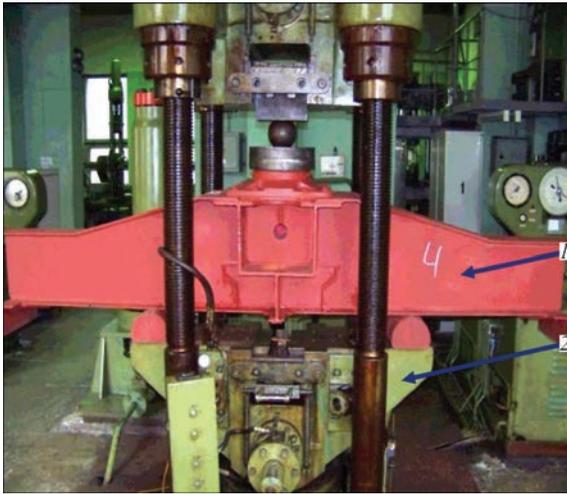


Рис. 2. Образец шкворневого узла № 4 (1) в испытательной машине ZDM–200ру (2)

демика В. Лазаряна (ДНУЖТ) по заказу ПАО «Днепровагонмаш» выполнен комплект работ по оценке ресурса узлов, включающий в себя стендовые испытания натуральных образцов узлов полувагона для оценки напряженно-деформированного состояния и сопротивления усталости, а также расчетно-экспериментальную оценку ресурса узлов.

Срок службы узла до появления усталостных повреждений в соответствии с действующей нормативной документацией [5–8] оценивают по гипотезе Пальмгрена–Майнера, полагая, что кривая усталости состоит из двух участков с показателями  $m_1$  и  $m_2 = 2m_1 - 1$ , разделенных точкой  $N_0 = 10^7$  (базовое число циклов). Этой точке соответствуют напряжения  $\sigma_{a,N}$  — предел выносливости конструкции.

Цель проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины экспериментальных исследова-



Рис. 3. Образец узла заделки стойки боковой стены № 4 (1), установленный на платформе (2) в испытательной машине ZDM–10ру (3)

ний состояла в выявлении участков конструкции с наихудшими показателями сопротивления усталости и определении величины предела выносливости  $\sigma_{a,N}$  для них. Порядок проведения экспериментальных исследований изложен в работе [9]. Из-за ограниченного объема экспериментальных данных кривую усталости не строили, приняв рекомендованное в нормативной документации значение показателя  $m_1 = 3$  [5].

Было изготовлено по четыре натуральных образца шкворневого узла и узла заделки стойки боковой стены. Три образца каждого вида были подвергнуты испытаниям на усталость до разрушения, на оставшемся образце провели тензометрию для валидации конечно-элементных моделей узлов. Размещение образцов в гидропульсаторных машинах ZDM–200ру (шкворневой узел) и ZDM–10ру (узел заделки стойки боковой стены) показано на рис. 2, 3. Испытания проводили при синусоидальном переменном цикле нагружения. Максимальные и минимальные нагрузки задавали так, чтобы разрушение (потеря несущей способности) образца происходило в условиях упругого напряженно-деформированного состояния в области многоциклового усталости (до 5 млн циклов нагружения). Поскольку в нормативной документации [5, 7] при оценке сопротивления усталости средние напряжения цикла во внимание не принимают, то значения асимметрии цикла нагружения (отношение наименьшей нагрузки к наибольшей) шкворневого узла и узла заделки стойки боковой стены отличались (задавали исходя из возможностей испытательных машин). Частота нагружения шкворневого узла и узла заделки стойки боковой стены составляла 5,5 и 7,0 Гц, соответственно, и задавалась исходя из технических характеристик испытательных машин ZDM–200ру и ZDM–10ру.

В процессе проведения испытаний регистрировали число циклов нагружения до появления трещин, их расположение и размер, а также число циклов до разрушения образца.

Поскольку процесс зарождения и развития усталостных трещин во всех трех образцах шкворневого узла был идентичен, то, для примера, ниже приведена кинетика усталостного разрушения только шкворневого узла № 4. Образец шкворневого узла № 4 испытывали при циклическом нагружении ( $P_{\min} = 98,1$  кН и  $P_{\max} = 883$  кН) с частотой 5,5 Гц. Расстояние между опорами составляло 1400 мм. При 797 тыс. циклов обнаружено: трещина у вершины накладке на вертикальный лист вблизи хребтовой балки (трещина Т5) длиной 20 мм и трещина между вертикальным листом шкворневой балки и стенкой Z-хребтовой балки (трещина Т6) длиной 25 мм (рис. 4). После 1029 тыс. циклов была выявлена трещина на



Рис. 4. Трещины в шкворневом узле (образец № 4): 1 — трещина T5; 2 — T6; 3 — T7; 4 — T8; 5 — T9 по другую сторону от хребтовой балки от трещины T6

нижнем горизонтальном листе шкворневой балки у двутавра хребтовой балки (трещина T7) длиной 35 мм. После наработки 1126 тыс. циклов перемен напряжений длина трещины T5 осталась неизменной 20 мм, трещина T6 развилась до 35 мм, а T7 стала развиваться как в вертикальном направлении (по боковой стенке шкворневого узла) до 10 мм, так и в горизонтальном (по нижнему поясу) — до 55 мм. При 1282 тыс. циклов трещина T7 по вертикали развилась до 40 мм, а по горизонтали до 90 мм, также выявлена новая трещина между вертикальным листом шкворневой балки и двутавром хребтовой балки (трещина T8) длиной 55 мм. После 1458 тыс. циклов длина трещины T5 осталась неизменной 20 мм, T6 развилась по основному материалу вертикального листа шкворневой балки до 45 мм, T7 развилась в вертикальном направлении до 80 мм, а в горизонтальном до 130 мм, трещина T8 развилась до 180 мм. При наработке 2346 тыс. циклов обнаружена трещина между вертикальным листом шкворневой балки и стенкой Z-хребтовой балки (трещина T9) длиной 50 мм (с противоположной стороны от T6). После наработки 2815 тыс. циклов длина трещи-

ны T5 составила 22 мм, T6 — 150 мм, T7 как по вертикали, так и по горизонтали достигла длины 150 мм, T8 — 180 мм, T9 — 120 мм. Процесс активного разрушения шкворневого узла начался после 2971 тыс. циклов нагружения: трещина T6 развилась до 250 мм, а трещина T9 — до 180 мм. При 2995 тыс. циклов трещина T6 достигла длины 320 мм, а T9 — 300 мм), а при 3031 тыс. циклов произошло разрушение образца.

Поскольку процесс зарождения и развития усталостных трещин во всех трех образцах заделки стойки боковой стены был идентичен, то для примера ниже приведена кинетика усталостного разрушения только заделки стойки боковой стены № 4. Образец заделки стойки боковой стены № 4 испытан при циклическом нагружении ( $P_{\min} = 41,2$  кН и  $P_{\max} = 68,7$  кН) с частотой 7,0 Гц. При 325 тыс. циклов нагружения выявлены усталостные трещины T1 и T2 в соединении поперечной балки (накладки над верхней полкой) с нижней обвязкой длиной 18 мм и 15 мм, соответственно, а также трещина T3 в соединении усиливающего уголка стойки боковой стены с нижней обвязкой длиной 10 мм (рис. 5). В дальнейшем

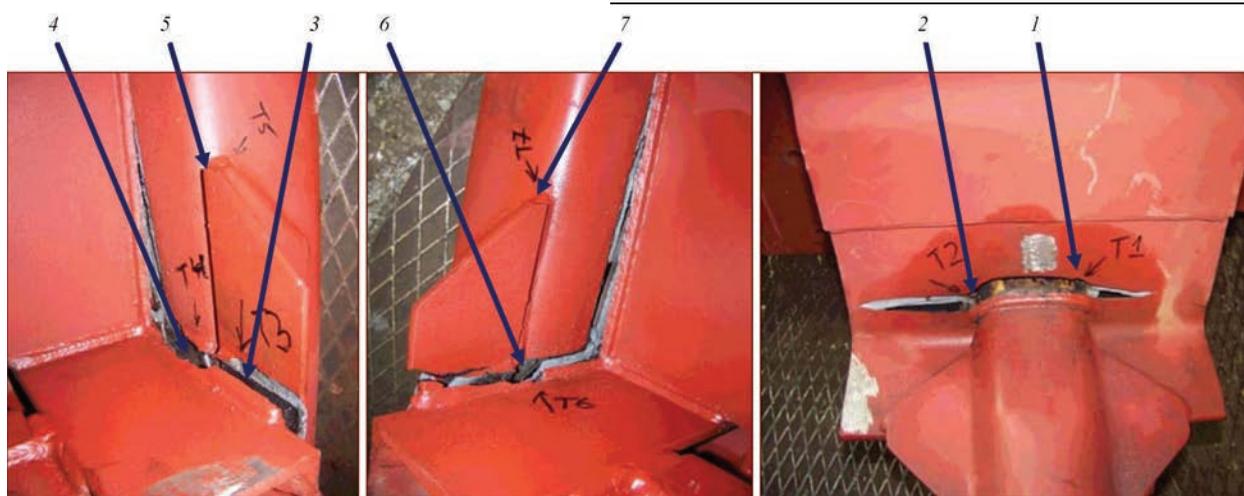


Рис. 5. Трещины в узле заделки стойки боковой стены (образец № 4): 1, 2 — в соединении поперечной балки (накладки над верхней полкой) с нижней обвязкой (трещины T1 и T2, соответственно); 3 — в соединении усиливающего уголка стойки боковой стены с нижней обвязкой (трещина T3); 4, 6 — в соединении стойки боковой стены с нижней обвязкой (трещины T4 и T6, соответственно); 5, 7 — вверху усиливающего уголка стойки боковой стены (трещины T5 и T7, соответственно)

при 931 тыс. циклов нагружения трещина T1 развилась до 25 мм, T2 до 50 мм, длина трещины T3 не изменилась. При 1550 тыс. циклов нагружения произошло объединение трещин T1 и T2, при этом их общая длина составила 110 мм, трещина T3 развилась до 22 мм, выявлены новые усталостные трещины: T4 и T6 в соединении стойки боковой стены и нижней обвязки (с двух сторон), соответственно, длиной 10 и 38 мм; трещины T5 и T7 вверху усиливающего уголка стойки боковой стены, соответственно, длиной 7 и 10 мм. После наработки 2227 тыс. циклов нагружения длина трещины T1+T2 осталась 110 мм, трещина T3 развилась до 25 мм, T4 до 14 мм, T5 до 10 мм, T6 до 70 мм и T7 до 10 мм. При 2414 тыс. циклов нагружения трещина T1+T2 развились до 120 мм, трещина T3 объединилась с трещиной T4 (общая длина 52 мм), трещина T5 развилась до 10 мм, T6 до 85 мм и T7 до 12 мм. После наработки 2793 тыс. циклов нагружения длина трещины T1 + T2 осталась 120 мм, трещина T3 + T4 развилась до 55 мм, T5 до 10 мм, T6 до 115 мм и T7 до 15 мм. При 3351 тыс. циклов нагружения трещина T1 + T2 развилась до 125 мм, трещина T3 + T4 до

66 мм, трещина T5 до 10 мм, T6 до 130 мм и T7 до 15 мм. При 3872 тыс. циклов нагружения произошло разрушение образца.

Обобщенная картина развития трещин и разрушения показана на рис. 6. Места зарождения трещин обозначены синими метками. Сначала трещины развиваются вдоль сварного шва (зеленые стрелки), достигнув его границы, переходят на соседний сварной шов или на основной металл (желтые стрелки). Черным цветом на рис. 6, а показана трещина, которая зарождается на начальном этапе испытаний, разрушает сварной шов между малым двутавром хребтовой и шкворневой балкой, после чего ее развитие прекращается. К потере несущей способности образца она не приводит. Дальнейший анализ проведен для точек зарождения трещин (соответственно нижняя и верхняя синяя метка на рис. 6). Результаты испытаний (число циклов до зарождения трещины и до разрушения образца) приведены в табл. 1.

Полученные результаты дают возможность оценить предел выносливости по силе  $P_{a,N}$  (точное определение: доля образцов, разрушенных силой  $P_{a,N}$  за базовое число циклов  $N_0 = 10^7$ , со-



Рис. 6. Развитие трещин: а — в шкворневом узле; б, в — в узле заделки стойки боковой стены

Т а б л и ц а 1. Результаты усталостных испытаний узлов полувагона модели 12-4106-01

Номер образца	Параметры цикла нагружения, кН		Циклическая долговечность, тыс. циклов	
	$P_{max}$	$P_{min}$	до появления трещины (точка)	до разрушения образца
Шкворневой узел				
2	903	98,1	679 (1) 975 (2)	6432
3	903	98,1	771 (1) 1820 (2)	3327
4	883	98,1	1029 (1) 797 (2)	3031
Узел заделки стойки боковой стены				
1	68,7	41,2	284 (1) 1752 (2)	5225
3	68,7	41,2	139 (1) 877 (2)	2913
4	68,7	41,2	325 (1) 1550 (2)	3872

ставляет  $1 - \alpha = 0,95$ ). Пусть  $P_j, N_j$  — нагрузка и количество циклов до разрушения для  $j$ -го образца. Для приведения нагрузки к базовому количеству циклов используем «верхнюю» часть кривой усталости с показателем  $m_1, \bar{P}_j = P_j(N_j / N_0)^{1/m_1}$ . На основании [5, п. 6.3.3.1] предел  $P_{a,N}$  составляет

$$P_{a,N} = M[P] + Z_{1-\alpha}\sigma[P], \quad (1)$$

где  $M[P], \sigma[P]$  — оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения;  $Z_{1-\alpha}$  — квантиль уровня  $1-\alpha$  для нормального распределения с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

Предел выносливости (по напряжениям)  $\sigma_{a,N}$  — это напряжения, обусловленные действием силы  $P_{a,N}$ . Для их определения были разработаны конечно-элементные модели исследуемых узлов. Распределение напряжений в образцах от приложенных рабочих нагрузок приведены на рис. 7, 8.

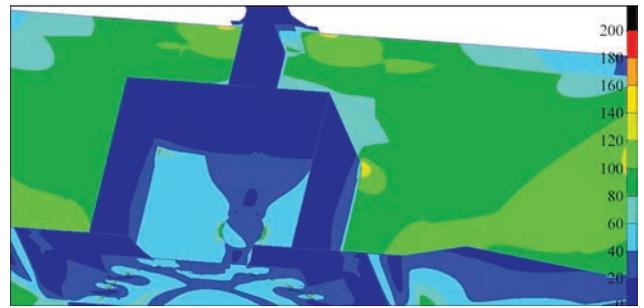


Рис. 7. Напряжения в шкворневом узле от приложенной рабочей нагрузки  $P = 883$  кН, МПа

Т а б л и ц а 2. Пределы выносливости сварных соединений узлов полувагона модели 12-4106-01

Точки	Предел выносливости $\sigma_{a,N}$ , МПа	
	Шкворневой узел	Узел заделки стойки боковой стены
1	32,2	12,1
2	33,6	19,0

Выполненным расчетом подтверждено, что в точках, где зарождаются трещины (рис. 6, синие метки), напряжения максимальны.

Для проверки достоверности результатов моделирования проведена тензометрия образцов. Измерены напряжения в 15-ти точках на шкворневом узле и в 8-ми точках на узле заделки стойки боковой стены.

Экспериментально установленные значения пределов выносливости  $\sigma_{a,N}$  исследованных узлов приведены в табл. 2. Минимальные пределы выносливости для них составляют 12,1 МПа (узел заделки стойки боковой стены) и 33,6 МПа (шкворневой узел). Установленные значения предела выносливости, как показал расчет напряженного состояния кузова вагона, обеспечивают эксплуатацию до появления усталостной трещины в течение 34,1 и 57,0 лет для шкворневого узла и узла заделки стойки боковой стены, соответственно.

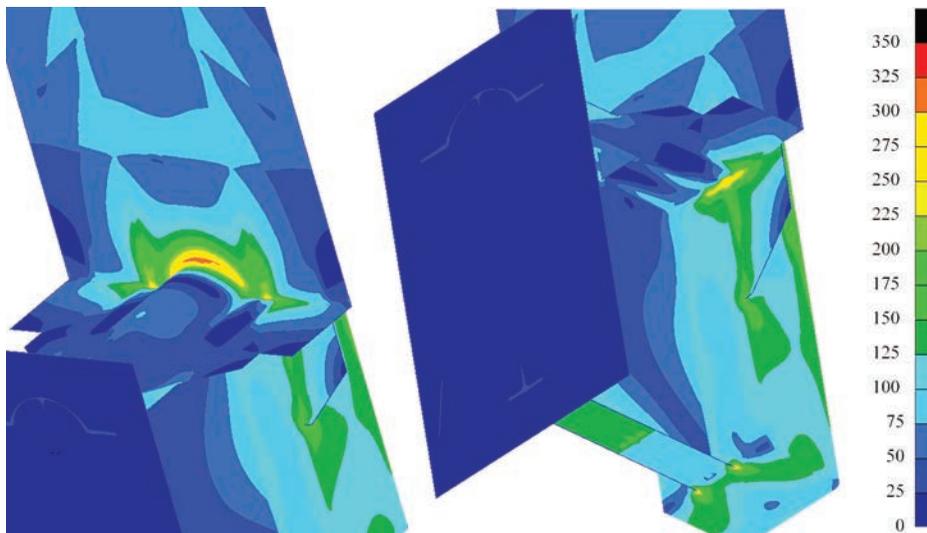


Рис. 8. Напряжения в узле заделки стойки боковой стены от приложенной рабочей нагрузки  $P = 68,73$  кН, МПа

## Выводы

1. На основании проведенных экспериментально-расчетных исследований сопротивления усталости натуральных образцов шкворневого узла и узла заделки стойки боковой стены полувагона модели 12–4106–01 установлено, что их эксплуатационный ресурс определяется сопротивлением усталости сварных соединений элементов конструкций узлов. Предел выносливости для них составляет от 12,1 МПа (узел заделки стойки боковой стены) до 33,6 МПа (шкворневой узел).

2. Установлено, что в исследованных узлах полувагона модели 12–4106–01 усталостные трещины возникают в двух наиболее напряженных зонах. Установленные значения пределов выносливости, как показал расчет напряженного состояния кузова вагона, обеспечивают эксплуатацию до появления усталостной трещины в течение 34,1 и 57,0 лет для шкворневого узла и узла заделки стойки боковой стены, соответственно.

## Список литературы

1. Битюцкий А. А. (2009) Анализ развития методов оценки усталостной прочности несущих конструкций кузовов грузовых вагонов. *Исследование усталостной прочности узлов и выбор параметров новых грузовых вагонов: сб. науч. тр.* Битюцкий А. А. (ред.). Санкт-Петербург, Инженерный центр вагоностроения, **7**, 6–13.
2. Хиллов И. А., Афанасьев А. Е. (2009) Выбор параметров узла заделки стойки боковой стены полувагона. *Там же*, **7**, 34–43.
3. Битюцкий А. А., Афанасьев А. Е. (2009) Исследование усталостной прочности заделок стоек боковой стены новой конструкции кузова полувагона. *Там же*, **7**, 54–61.
4. Плоткин В. С., Дружинин С. С., Ченцов Е. И. (1978) Исследование усталостной прочности заделок стоек 4-х осных цельнометаллических полувагонов. *Сб. науч. тр. ВНИИВ*, **35**, сс. 21–26.
5. ГОСТ 33211–2014 (2016) *Вагоны грузовые. Требования к прочности и ходовым качествам*. Москва, Стандартинформ.

6. (1983) *Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)*. Москва, ГосНИИВ-ВНИИЖТ.
7. (1996) *Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)*. Москва, Гос. НИИВ-ВНИИЖТ.
8. РД 24.050.37–95. *Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества*.
9. (2017) Полувагон модели 12–4106–01. *Программа и методика исследований ресурса шкворневого узла и узла заделки стойки боковой стены полувагона*. ПМ 100–17/ИЦ.

## References

1. Bityutsky, A.A. (2009) Analysis of development of methods for evaluation of fatigue strength of load-carrying structures of freight car bodies. In: *Study of fatigue strength of assemblies and selection of parameters of new freight cars: Transact.* Ed. by A.A. Bityutsky. St.-Petersburg, Inzhenerny Tsent Vagonostroeniya, **7**, 6-13 [in Russian].
2. Khilov, I.A., Afanasiev, A.E. (2009) Selection of parameters of side wall rack sealing assembly of a gondola car. In: *Study of fatigue strength of assemblies and selection of parameters of new freight cars: Transact.* Ed. by A.A. Bityutsky. *Ibid.*, **7**, 34-43 [in Russian].
3. Bityutsky, A.A., Afanasiev, A.E. (2009) Study of fatigue strength of side wall rack sealing assemblies of new design of a gondola car body. *Ibid.*, **7**, 54-61 [in Russian].
4. Plotkin, V.S., Druzhinin, S.S., Chentsov, E.I. (1978) Study of fatigue strength of sealing assemblies of 4-axle all-metal gondola cars. In: *Transact. of VNIIV*, **35**, 21-26 [in Russian].
5. (2016) GOST 33211-2014: *Freight cars. Requirements to strength and running characteristics*. Moscow, Standartinform [in Russian].
6. (1983) *Norms for calculation and design of new and modernized cars (non self-propelled) of 1520 mm track railways of the Ministry of Railroads*. Moscow, GosNIIV-VNIIZhT [in Russian].
7. (1996) *Norms for calculation and design of cars (non self-propelled) of 1520 mm track railways of Ministry of railroads*. Moscow, GosNIIV-VNIIZhT [in Russian].
8. RD 24.050.37-95: *Freight and passenger cars. Testing methods on strength and running characteristics* [in Russian].
9. (2017) *Gondola car of 12-4106-01 model. Program and procedure of testing of service life of the pivot assembly and side wall rack sealing assembly of a gondola car*. PM 100-17/ITs [in Russian].

## ОПІР ВТОМІ ЗВАРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ, ВИГОТОВЛЕНИХ ІЗ СТАЛЕЙ КЛАСУ МІЦНОСТІ С345 ТА С390

А. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР<sup>1</sup>, В. А. КАЛАШНИК<sup>1</sup>, В. В. КНИШ<sup>2</sup>, С. О. СОЛОВЕЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.  
49010, м Дніпро, вул. Лазаряна, 2. E-mail: dnuzt@diit.edu.ua

<sup>2</sup>ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Викладено результати експериментально-розрахункових досліджень опору втомі натурних зразків шкворневого вузла і вузла закладення стійки бокової стіни напіввагона моделі 12-4106-01 встановлено, що їх експлуатаційний ресурс визначається опором втомі зварних з'єднань елементів конструкцій вузлів. Межа витривалості для них становить від 12,1 МПа (вузол закладення стійки бокової стіни) до 33,6 МПа (шкворневий вузол). Встановлено ділянки зародження втомних тріщин, закономірності їх розвитку та межі витривалості конструкції. Значення меж витривалості, як показав розрахунок напруженого стану кузова вагона, забезпечують експлуатацію до появи втомної тріщини протягом 34,1 і 57,0 років для шкворневого вузла і вузла закладення стійки бокової стіни, відповідно. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 8.

*Ключові слова*: зварні елементи вантажних вагонів, шкворневий вузол, вузол закладення стійки бокової стіни, опір втомі, напружений стан

FATIGUE RESISTANCE OF WELDED ELEMENTS OF FREIGHT CARS  
OF A NEW DESIGN MADE FROM STEELS OF S345 AND S390 GRADE

A.G. REIDEMEISTER<sup>1</sup>, V.A. KALASHNIK<sup>1</sup>, V.V. KNYSH<sup>2</sup>, S.A. SOLOVEJ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Acad. V. Lazaryan Dnipropetrovsk National University of Railway Transport.

2 Lazaryan Str., 49010, Dnipro. E-mail: dnuzt@diit.edu.ua

<sup>2</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper presents the results of experimental and computational studies of fatigue resistance of full-scale samples of the pivot assembly and side wall rack sealing assembly of a gondola car of 12-4106-01 model. It is found that their operating life is determined by fatigue resistance of welded joints of structural elements of the assembly. Their fatigue strength is equal from 12.1 MPa (side wall rack sealing assembly) up to 33.6 MPa (pivot assembly). Sections of fatigue cracks initiation, regularities of their propagation and fatigue strength of structures were established. As shown by calculation of the car body stressed state, the fatigue strength values ensure operation for 34.1 and 57.0 years, for the pivot assembly and side wall rack sealing assembly, respectively, before appearance of the fatigue crack. 9 Ref., 2 Tabl., 8 Fig.

*Keywords: welded elements of freight cars, pivot assembly, side wall rack sealing assembly, fatigue resistance, stressed state*

Поступила в редакцию 26.05.2018

Национальное агентство контроля сварки  
Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
**Международная научно-техническая конференция**  
**«СВАРКА И КОНТРОЛЬ-2018»**  
18 – 21 сентября 2018 г., Пермь

**Цель конференции:** создание единого информационного пространства для обмена опытом, интеграции мировых достижений в области сварки, сварочных технологий, сварочного оборудования и контроля качества, а также внедрения инновационных технологий в сварочном производстве.

Работа конференции будет спланирована как единое мероприятие, объединяющее работу дискуссионных зон с различной тематикой.

На конференции будут заслушаны и обсуждены доклады ученых из разных стран о наиболее важных научных достижениях в области сварки и родственных процессов: технологии и оборудования сварки, нанесении покрытий, пайки, новых материалов, неразрушающего контроля, технической диагностики, гибридной сварки, аддитивных технологий.

В рамках конференции будет проходить общероссийский съезд членов НАКС. На съезде будут обсуждаться вопросы безопасности производства, разработка и обсуждение профессиональных стандартов и этапы внедрения независимой оценки квалификации в сварочном производстве в регионах РФ.

Историко-культурная часть конференции будет проходить в доме-музее Н. Г. Славянова, где впервые в рамках выездной выставки музейного комплекса Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого будет представлен «Второй стакан Славянова»

**Адрес оргкомитета:**

614990, г. Пермь, Комсомольский просп., 29,

ПНИПУ, Сварка2018

e-mail: svarka@pstu.ru

## КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Ю. Н. САРАЕВ<sup>1</sup>, А. Г. ЛУНЕВ<sup>1</sup>, А. С. КИСЕЛЕВ<sup>2</sup>, А. С. ГОРДЫНЕЦ<sup>2</sup>, М. В. ТРИГУБ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН.

634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4. E-mail: litsin@ispms.tsc.ru.

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический институт.

634004, г. Томск, просп. Ленина, 30. E-mail: kas@tpu.ru

<sup>3</sup>Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН.

634055, г. Томск, площадь акад. Зуева, 1. E-mail: trigub@tpu.ru

В работе представлены результаты разработки и изготовления уникального исследовательского комплекса для изучения быстротекущих процессов тепломассопереноса при дуговой сварке плавящимся электродом. Показаны преимущества разработанного комплекса перед традиционно применяемыми с использованием кино- и видеокамер с теневым принципом регистрации характеристик тепломассопереноса. Исследовали быстротекущие процессы с применением высокоскоростной видеосъемки с подсветкой дугового промежутка лучом Cu-VI-лазера, улучшающего визуализацию изучаемого объекта — процесса плавления и переноса каждой капли электродного металла в условиях интенсивного светового излучения от электрической дуги. В статье приведены поясняющие схемы, алгоритмы управления, видеокдры отдельного сварочного микроцикла, примеры записи осциллограмм и графические представления изменений их количественных значений. Библиогр. 13, табл. 1, рис. 14.

*Ключевые слова:* сварка, наплавка, видеосъемка, плавление, тепломассоперенос, лазер, управление, стабильность, электрическая дуга, сварка плавящимся электродом

Процессы нагрева и плавления сварочного электрода или проволоки, формирования и переноса капель электродного металла при сварке во многом определяют стабильность прочностных свойств неразъемных соединений. Характер плавления и переноса электродного металла при сварке плавлением определяется большим количеством физических явлений: тепло- и массопереноса, газо- и термодинамики, электромагнитных процессов, протекающих в дуге, на поверхности и в объеме электрода, расплавленных капель как основного, так и электродного металла [1–3].

Анализ работ, посвященных кинетике плавления электродного металла, показывает, что перенос металла с электрода в сварочную ванну происходит в виде капель разного диаметра [4, 5]. Механизм переноса зависит от многих факторов: силы тяжести, действующей на каплю, силы поверхностного натяжения жидкого металла, электромагнитных сил, давления паров испаряющегося металла и других. Исследование кинетики плавления и переноса электродного металла в сварочную ванну неразрывно связано с регистрацией быстротекущих процессов. В зависимости от применяемого способа сварки плавящимся электродом характер плавления и переноса может изменяться. Прежде всего это связано с различием в действии на каплю электродного металла, находящуюся на торце электрода, комплекса сил, определяющих не только частоту перехода электродно-

го металла в сварочную ванну, но и длительность пребывания расплавленного металла под высокотемпературным воздействием электрической дуги. Последнее всецело определяет интенсивность микрометаллургических реакций в капле и ванне, от которой зависят качественные и прочностные свойства формируемого неразъемного соединения [6, 7].

На протяжении длительного времени одним из основных методов исследований быстротекущих процессов плавления и переноса электродного металла является скоростная видеосъемка, которая, как правило, осуществляется синхронно с регистрацией основных энергетических параметров технологического процесса. При всем многообразии методов визуализации процессов плавления и переноса электродного металла в сварочную ванну, до сих пор малоизученными являются быстротекущие процессы на стадии плавления и перехода расплавленного металла в сварочную ванну каждой капли электродного металла. Это ограничивает наши представления о механизмах тепломассопереноса, требует разработки и реализации новых экспериментальных комплексов. Отмеченное обстоятельство свидетельствует об актуальности проводимых исследований, результаты которых позволят получить новый высокоэффективный инструмент в изучении сложных процессов тепломассопереноса, сопровождающих формирование неразъемных соединений.

Целью работы являлось изучение особенностей быстропротекающих процессов теплопереноса при формировании неразъемных соединений методами дуговой сварки плавящимся электродом с подсветкой дугового промежутка лучом лазера для дополнения современных представлений о наиболее эффективных методах повышения стабильности и эффективности существующих технологий.

**Методика и техника экспериментальных исследований.** В качестве примера реализации направления, при котором можно обеспечить достижение выше сформулированной цели, может быть исследовательский комплекс, представленный на рис. 1.

Регистрация параметров технологического процесса осуществляется следующим образом. С помощью специального программного обеспечения (ПО) задается алгоритм выполнения сварного соединения (или наплавки), задание передается с персонального компьютера (ПК) на контроллер. Контроллер управляет перемещением стола с образцом и запускает процесс сварки. После задержки 1-2 с с момента начала сварки контроллер подает сигнал (Trigger) начала записи на высокоскоростную видеокамеру и плату сбора данных, записывающую энергетические параметры (ток, напряжение). Каждый кадр высокоскоростной видеозаписи синхронизируется с импульсами лазера посредством блока синхронизации [8–10]. Импульсы синхронизации также обеспечивают постановку меток на осциллограммах тока и напряжения для точного совмещения осциллограмм с кадрами видеозаписи [11]. Остановка записи производится по сигналу от контроллера.

Комплекс подразумевает использование инфракрасной тепловизионной камеры для записи тепловых полей в процессе сварки (наплавки). Расшифровка термограмм позволяет получить информацию о кинетике распространения тепла, скорости остывания сварочной ванны и зоны термического влияния, размерах сварочной ванны и ЗТВ, изменении их температуры во времени [12, 13].

**Роботизированная сварочная платформа.** Возможность получения повторяемых результатов при проведении исследований в области дуговой сварки в среде защитных газов в большей степени определяется человеческим фактором. Следовательно, стабильность и точность поддержания основных параметров режима сварки напрямую зависят от навыков сварщика. Кроме того, при выполнении скоростной видеосъемки процесса сварки существует дополнительная проблема по ее синхронизации с моментом появления изучаемого объекта в фокусе видеокамеры.

Решением проблемы повторяемости результатов экспериментов является полная автоматизация процесса сварки при проведении исследований. В настоящее время в промышленности для автоматизации процессов дуговой сварки широко применяют различные механизмы, например, шестиосевые роботизированные манипуляторы. Однако применение готовых решений невозможно из-за принципиальных недостатков, а именно: всегда производится перемещение сварочной горелки, что затрудняет скоростную видеосъемку. Кроме того, такие манипуляторы отличаются избыточными возможностями, что усложняет их обслуживание.

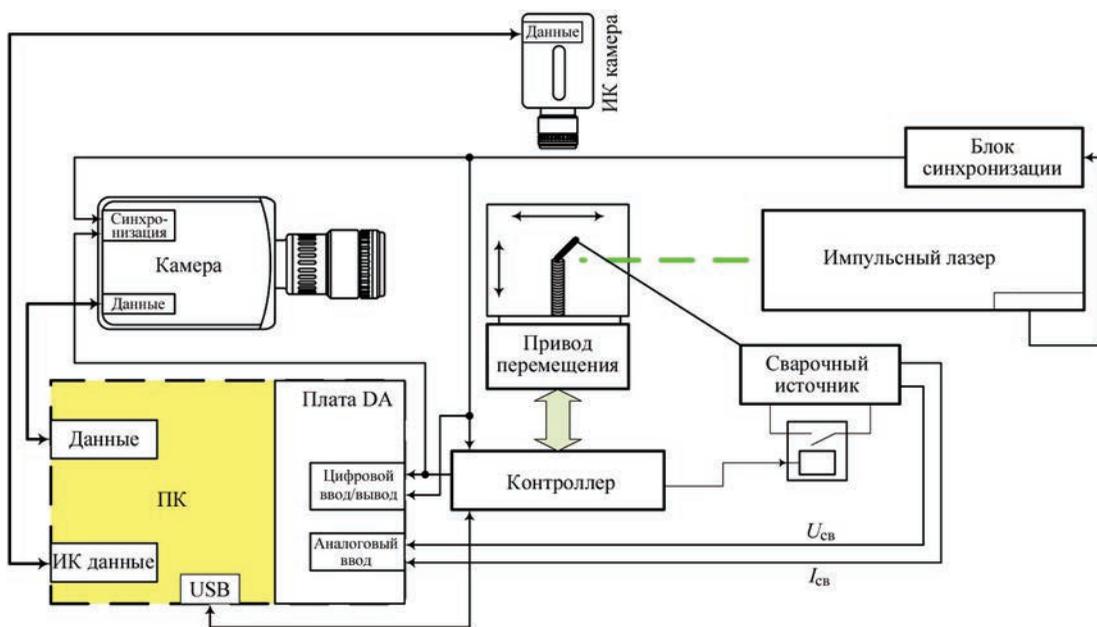


Рис. 1. Комплекс для регистрации и исследования быстропротекающих процессов теплопереноса при дуговой сварке плавящимся электродом

Важным звеном в разработанном комплексе является роботизированная сварочная платформа, которая обеспечивает в процессе исследований автоматическое перемещение свариваемого образца по одной из выбираемых траекторий перемещения с целью обеспечения требуемой геометрии сварного шва в соответствии с требованиями ГОСТ 6996-66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств». Реализация способа перемещения образца с использованием платформы роботизированного типа связана с необходимостью получения повторяемых результатов при проведении исследований, особенно в области механизированной дуговой сварки в среде защитных газов. Для исключения человеческого фактора и решения проблемы повторяемости результатов экспериментов в представляемом комплексе обеспечивается полная автоматизация процесса сварки при проведении исследований.

Учитывая изложенное выше, был разработан и изготовлен действующий образец роботизированной платформы для выполнения дуговой сварки и наплавки опытных образцов при проведении экспериментальных исследований. При проектировании платформы руководствовались соображениями о соответствии ее основных технических характеристик параметрам типовых контрольных сварных соединений, а именно, размерам и массе реальных образцов. Так как в большинстве случаев при поведении экспериментов сварку или наплавку осуществляют в нижнем положении, и нет необходимости изменять длину межэлектродного промежутка, то для перемещения образцов достаточно двух осей. Точность перемещения горелки при полуавтоматической сварке в среде защитных газов не превышает 1 мм, поэтому дискретность и точность позиционирования образцов являются достаточными. Габаритные размеры платформы выбраны такими, чтобы была возможность ее установки в стандартную 19-дюймовую стойку глубиной 800 мм.

**Основные технические характеристики платформы**

Количество осей перемещения, шт. ....	2
Максимальный размер свариваемых образцов (Ш×Г×В), мм .....	200×300×20
Грузоподъемность, кг .....	20
Дискретность перемещения образцов, мм .....	0,1
Точность позиционирования образцов, мм .....	±0,1
Диапазон задания скорости перемещения образцов, мм/мин.....	0...5000
Габаритные размеры платформы (Ш×Г×В), мм .....	505×740×350
Масса платформы, кг .....	40

Кинематическая схема платформы выбрана Н-ВОТ (рис. 2) как наиболее оптимальная и надежная для заданных технических характеристик.

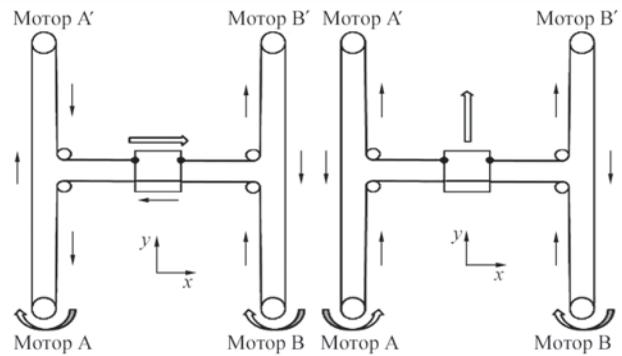


Рис. 2. Кинематическая схема роботизированной платформы

Для повышения точности, жесткости и грузоподъемности платформы площадка крепления образцов перемещается на линейных подшипниках по цилиндрическим направляющим диаметром 20 мм с помощью армированного зубчатого ремня шириной 25 мм. В качестве привода применены шаговые электромоторы типоразмера NEMA 34, которые для повышения плавности перемещения работают в микрошаговом режиме. Защита платформы от выхода за пределы осей перемещения реализована с помощью индуктивных конечных датчиков, которые также используются для ее установки в «нулевое» исходное положение.

Функциональная схема роботизированной платформы представлена на рис. 3. Назначение большинства блоков описано выше, за исключением блока числового программного управления, который предназначен для преобразования команд управляющего компьютера экспериментальной установки в соответствующие сигналы управления шаговыми моторами. В качестве команд используются стандартные G-коды, подробно описанные в ГОСТ 20999-83 «Устройства числового программного управления для металлообрабатывающего оборудования. Кодирование информации управляющих программ», что значительно упрощает программирование траектории перемещения платформы (рис. 4). Включение и выключение сварочного источника питания осуществляется с помощью «сухого» контакта, что позволяет в большинстве случаев подключать его к экспериментальной установке без дополнительных согласующих устройств.

**Обработка результатов исследований.** Процесс обработки состоит из трех этапов: определение средних значений тока, напряжения, мощности и погонной энергии в заданном интервале времени; статистическая обработка параметров коротких замыканий (КЗ) в процессе сварки (наплавки), т. е. получение информации о количестве КЗ в единицу времени, средней длительности КЗ, среднем значении тока КЗ, коэффициенте вариации длительности КЗ; построение сравнительных

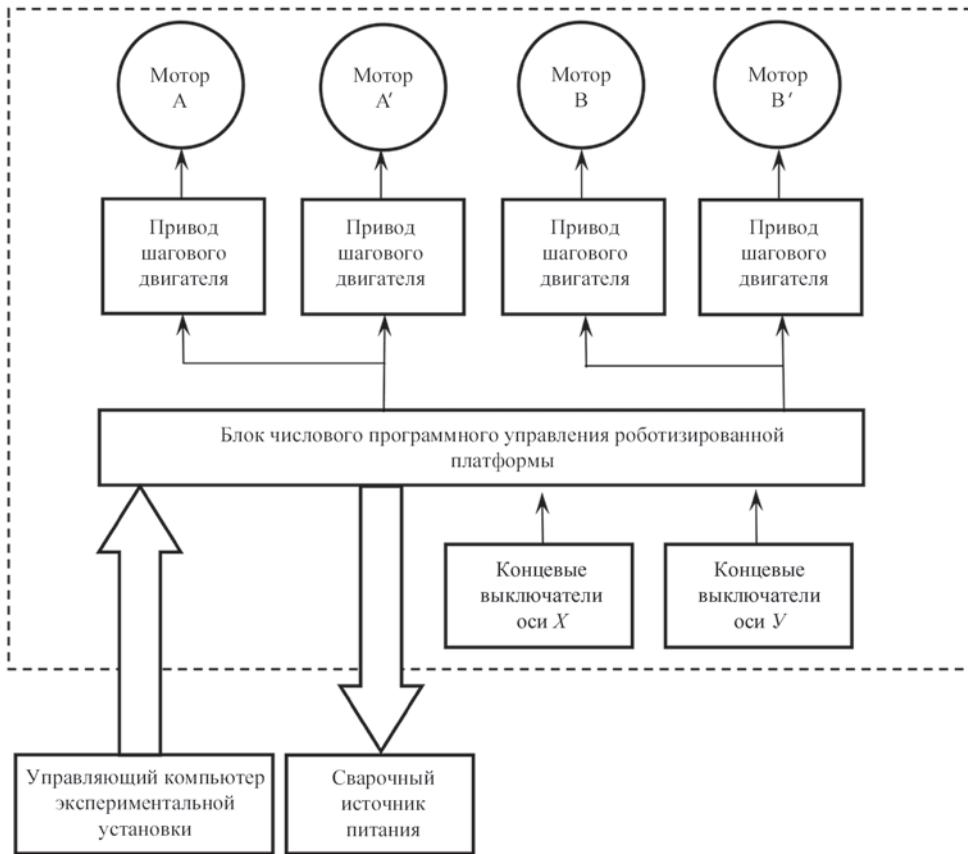


Рис. 3. Функциональная схема роботизированной платформы

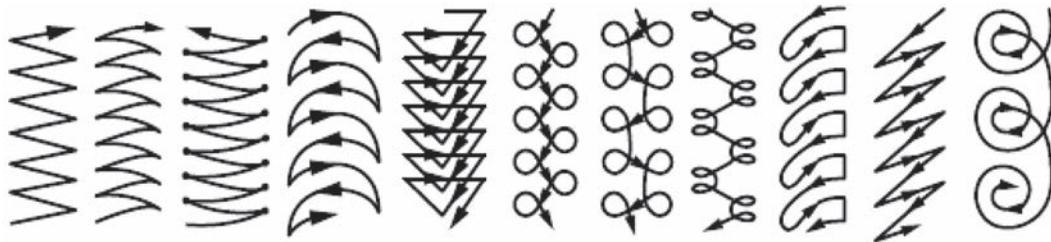
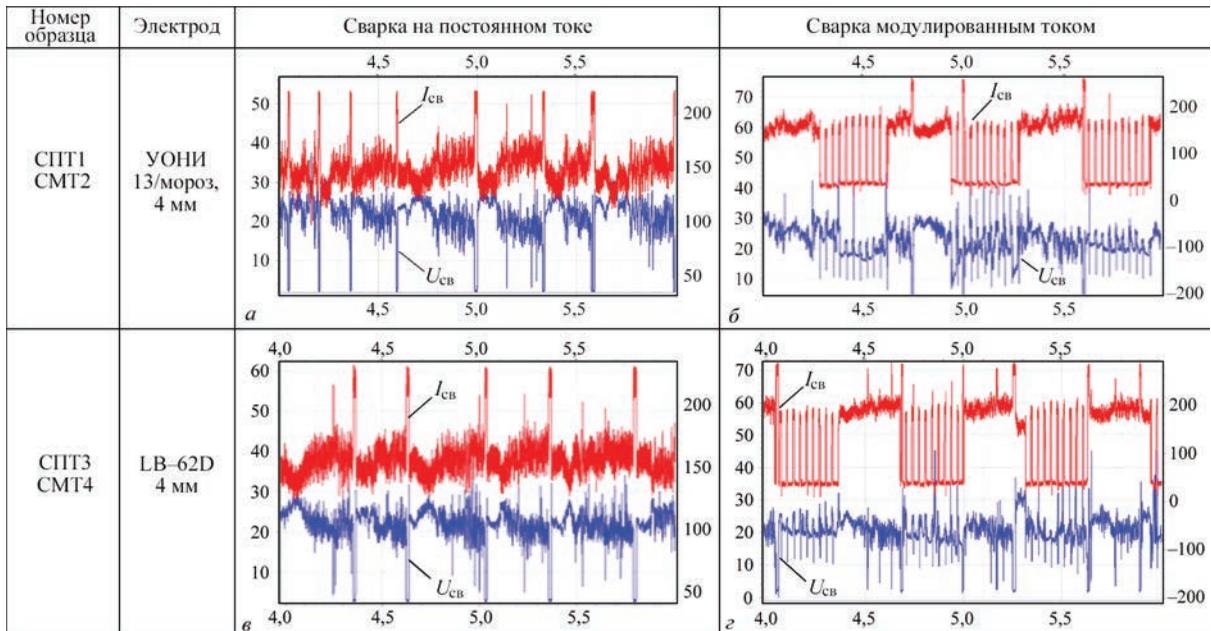


Рис. 4. Варианты траекторий перемещения платформы

**Осциллограммы тока в сварочной цепи и напряжения на межэлектродном промежутке**



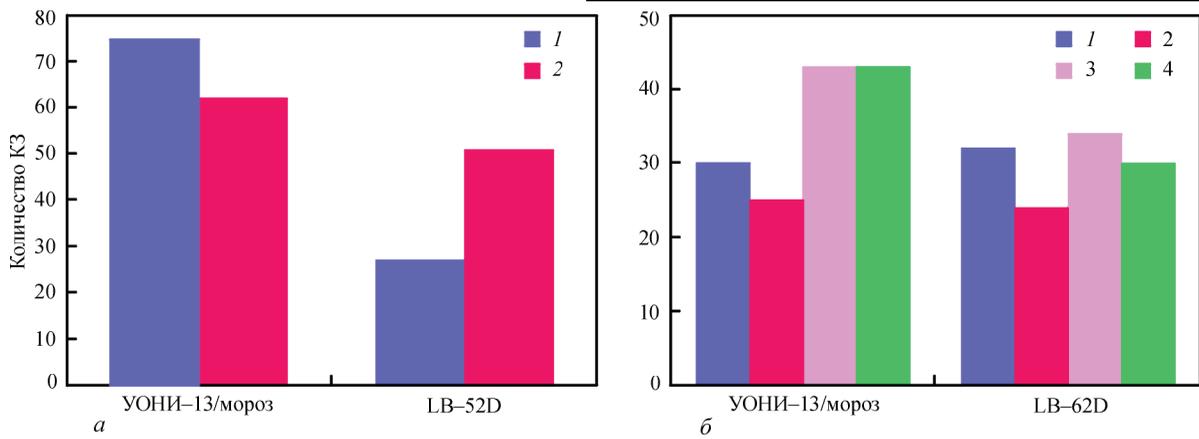


Рис. 5. Количество КЗ за 10 с: *а* — сварка корневого шва (КШ), электродами диаметром 3 мм (1 — корень, постоянный ток; 2 — корень, модулированный ток); *б* — сварка заполняющего шва (ЗШ) и облицовочного шва (ОШ) электродами диаметром 4 мм (1 — заполнение, постоянный ток; 2 — заполнение, модулированный ток; 3 — облицовка, постоянный ток; 4 — облицовка, модулированный ток)

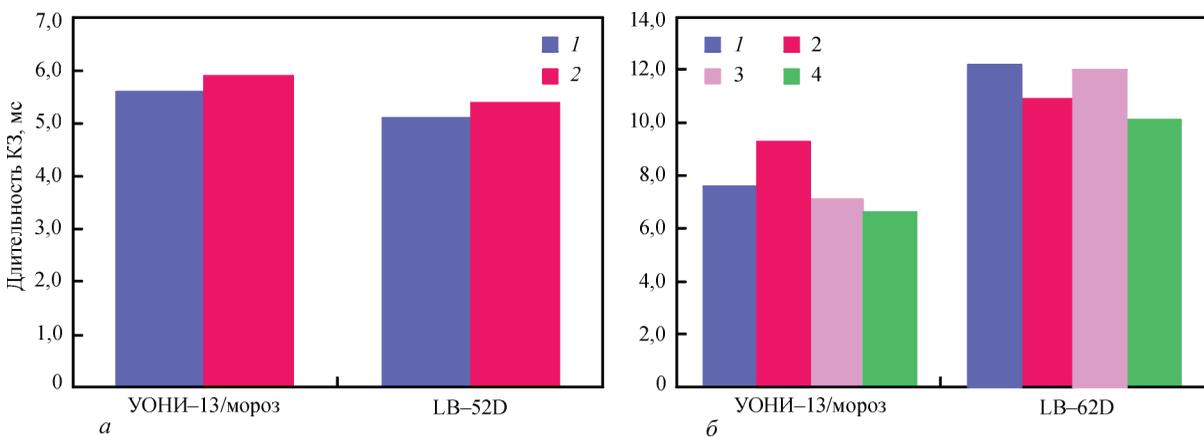


Рис. 6. Длительность КЗ: *а* — сварка КШ электродами диаметром 3 мм; *б* — сварка ЗШ и ОШ электродами диаметром 4 мм (обозначения те же, что и на рис. 5)

диаграмм полученных параметров от режимов сварки, типов электродов и т. п.

В таблице приведены характерные осциллограммы тока и напряжения дуги, записанные в процессе сварки, где СПТ — сварка на постоянном токе, СМТ — сварка в режиме низкочастотной модуляции сварочного тока, 1, 3 — сварка корневых швов, 2, 4 — сварка заполняющих слоев.

На рис. 5–8 приведены столбчатые диаграммы, построенные в результате обработки экспериментально полученных осциллограмм основных энергетических параметров режимов сварки. Анализ приведенных диаграмм позволяет дать количественную оценку показателей тепломассопереноса ручной дуговой сварки покрытыми электродами, которые совместно с анализом экспериментально полученных тепловизионных по-

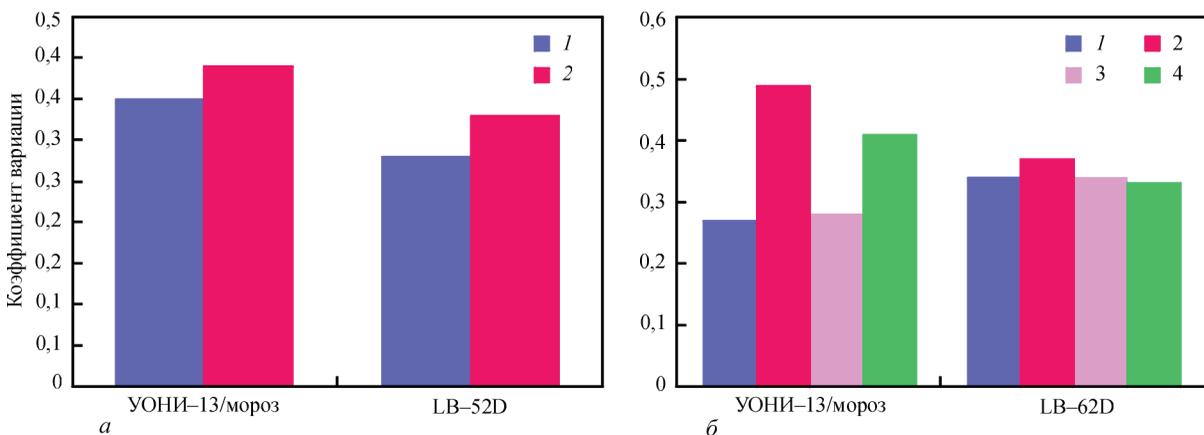


Рис. 7. Коэффициент вариации длительности КЗ: *а* — сварка КШ, электродами диаметром 3 мм, *б* — сварка ЗШ и ОШ электродами диаметром 4 мм (обозначения те же, что и на рис. 5)

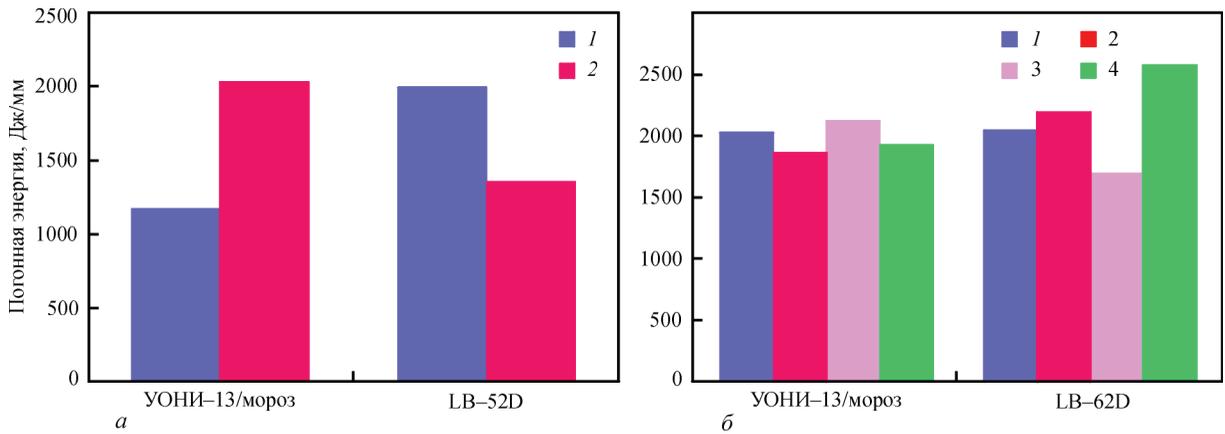


Рис. 8. Погонная энергия, затраченная при сварке: а — сварка КШ, электродами диаметром 3 мм; б — сварка ЗШ и ОШ электродами диаметром 4 мм (обозначения те же, что и на рис. 5)



Рис. 9. Тепловизионная съемка температурных полей на поверхности пластины при сварке в нижнем положении

лей позволяют в полной мере оценить характеристики теплопереноса.

На рис. 9 приведены фрагменты проведения тепловизионной съемки.

Результаты тепловизионной съемки, полученные с применением специальной программы об-

работки исследовательского комплекса, можно представить в виде тепловизионных картин, которые представлены на рис. 10. Экспериментально полученные тепловые поля помогают установить длину сварочной ванны, а, следовательно, и ско-

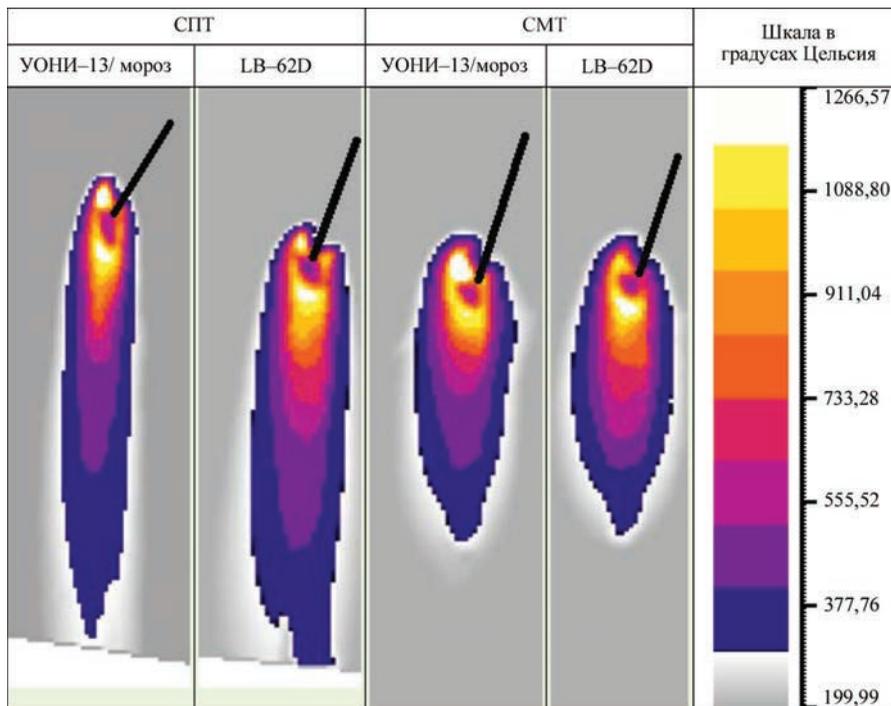


Рис. 10. Распределение температурных полей при СПТ и СМТ электродами диаметром 4 мм

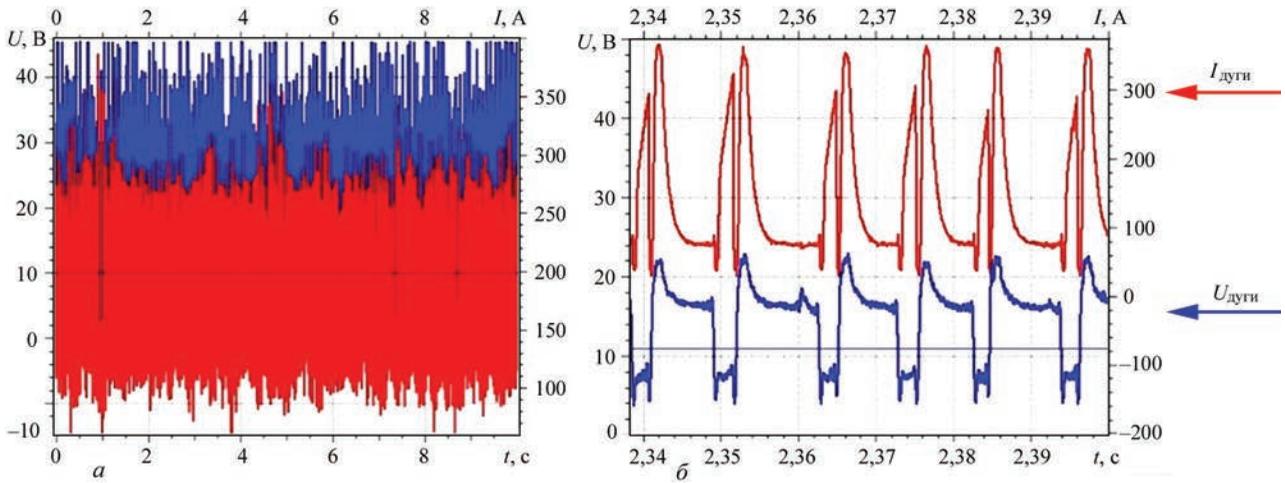


Рис. 11. Пример обработки результатов измерения тока и напряжения дуги в процессе экспериментальных исследований: *а* — без фильтрации фоновых помех; *б* — после фильтрации при выводе результатов для анализа

рость кристаллизационных процессов в формируемом сварном соединении.

При механизированных способах сварки частота перехода расплавленного электродного металла в сварочную ванну составляет 25...300 капель в секунду, что делает весьма затруднительным изучение быстропротекающих процессов как на этапе плавления, так и на этапе их перехода в сварочную ванну.

Для обработки результатов экспериментов по изучению характеристик тепломассопереноса при механизированных способах сварки, в составе комплекса применено специальное программное обеспечение, позволяющее представлять, также как и при ручной дуговой сварке, их в виде графических изображений и численных значений характеристик тепломассопереноса: погонной энергии, частоты переноса капель электродного металла,

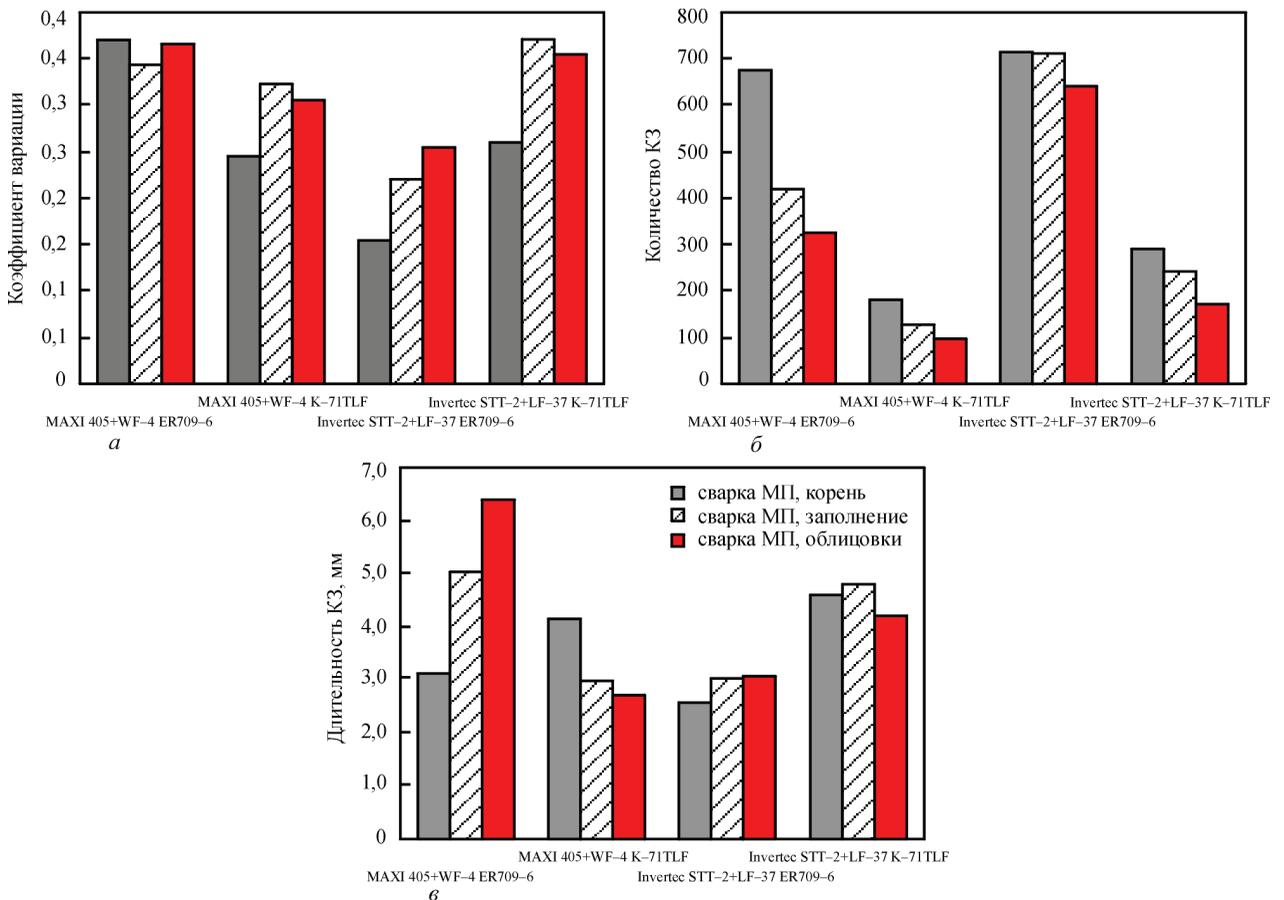


Рис. 12. Примеры столбчатых диаграмм для механизированной сварки в среде углекислого газа с КЗ дугового промежутка: *а* — коэффициент вариации длительности (сварка МП); *б* — количество КЗ (сварка МП); *в* — средняя длительность КЗ (сварка МП)

коэффициентов вариации частоты, длительности, амплитуды тока КЗ, изотерм тепловых полей и графиков изменения термических циклов сварки.

Визуализация результатов измерений и их обработка всецело зависит от способов регистрации параметров, которые определяют способность системы измерений обеспечить подавление высокочастотных помех посредством удаления из спектров осциллограмм напряжения и тока высокочастотных составляющих, имеющих большую амплитуду, определение порогового значения напряжения при КЗ (данная задача возлагается на исследователя и выполняется посредством ручного задания порога маркерной линией на осциллограмме напряжения), рис. 11. После этого производится: автоматическая выборка КЗ в требуемом интервале времени, определение тока и длительности каждого КЗ и выполняется вычисление среднего значения тока КЗ в полученной выборке, средней длительности КЗ и коэффициент вариации длительности КЗ. Полученные данные могут быть представлены в виде таблиц, а также столбчатых диаграмм (рис. 12).

Средние значения вычисляются посредством численного интегрирования тока, напряжения и их

произведения (мощности). Скорость сварки, позволяющая рассчитать погонную энергию, вычисляется как отношение длины сварного шва (наплавляемого покрытия) ко времени, затраченному на производство этого шва (покрытия). Кроме того, в состав комплекса входит модуль высокоскоростной видеорегистрации процесса плавления и переноса электродного металла, а также модуль осциллографирования основных энергетических параметров процесса сварки, осуществляемого синхронно с регистрацией плавления и переноса каждой капли электродного металла. С целью повышения качества видеосъемки процесса плавления и переноса электродного металла используется импульсная лазерная подсветка.

Однако до настоящего времени остаются малоизученными процессы тепломассопереноса, протекающие в сложной электродинамической системе источник питания – дуга – сварочная ванна – изделие при различных способах сварки, в том числе с импульсным изменением энергетических параметров режима. При изучении данных явлений возникает ряд сложностей, связанных со скоростью протекания процессов тепломассопереноса при одновременном действии мощного светового излучения сварочной дуги (рис. 13).

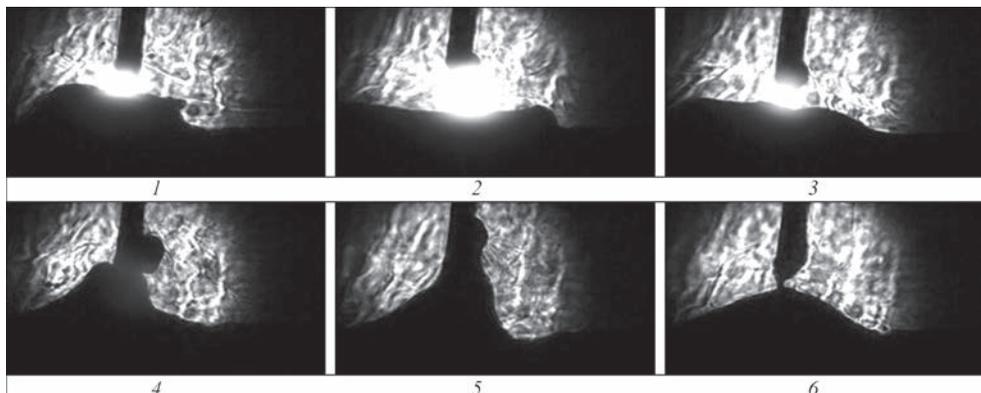


Рис. 13. Видеокадры процесса плавления и переноса электродного металла при механизированной сварке в среде углекислого газа проволокой сплошного сечения, частота видеосъемки 5000 кадров в секунду (подсветка дугового промежутка прожектором на ксеноновой лампе)

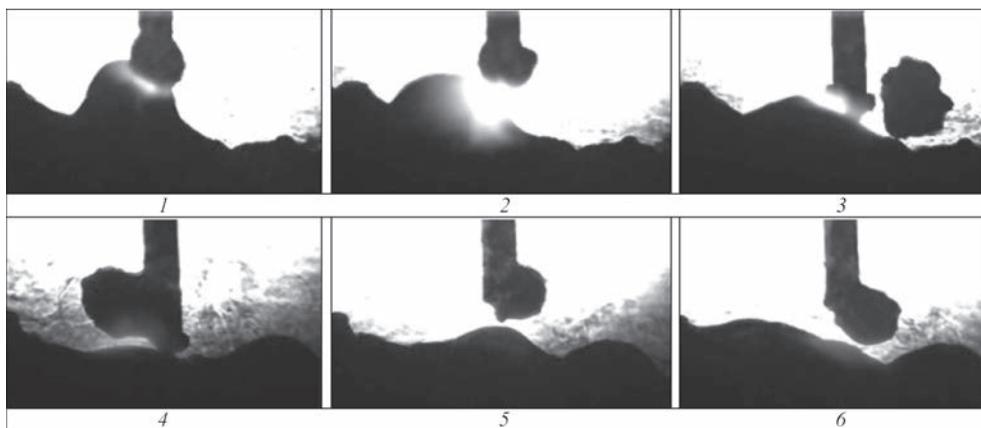


Рис. 14. Видеокадры процесса плавления и переноса электродного металла при механизированной сварке в среде углекислого газа проволокой сплошного сечения, частота видеосъемки 5000 кадров в секунду (подсветка дугового промежутка лучом Cu-Br-лазера)

На рис. 13 и 14 приведены видеокadres сварочного микроцикла (период плавления и переноса одной капли электродного металла. Сравнение видеокadres подтверждает предварительно сделанное предположение о том, что применение при съемке лазерного когерентного излучения должно способствовать лучшей визуализации изучаемого объекта тепломассопереноса. Выполненные эксперименты полностью подтвердили правильность выбранного направления разработки исследовательского комплекса.

В заключение можно отметить, что исследовательский комплекс роботизированного типа, предназначенный для изучения особенностей быстропротекающих процессов тепломассопереноса при формировании неразъемных соединений методами дуговой сварки плавящимся электродом в условиях подсветки дугового промежутка лучом Cu–Vr-лазера имеет требуемые технические характеристики и может быть эффективно применен для изготовления опытных образцов при проведении экспериментальных исследований, связанных с изысканием путей повышения надежности конструкций ответственного назначения, работающих в экстремальных условиях.

Проведенные испытания исследовательского комплекса полностью подтвердили его высокую эффективность при изучении быстропротекающих процессов тепломассопереноса при электродуговой сварке плавящимся электродом, что безусловно расширяет границы современных представлений о наиболее эффективных методах повышения стабильности и эффективности существующих технологий.

\*Работа выполнена за счет средств РНФ по проекту № 16-19-10010 в 2016–2018 гг.

### Список литературы

1. Кархин В. А. (2015) *Тепловые процессы при сварке*. 2-е изд., перераб. и доп. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета.
2. Патон Б. Е., Максимов С. Ю., Сидорук В. С., Сараев Ю. Н. (2014) К вопросу о саморегулировании дуги при сварке плавящимся электродом. *Сварочное производство*, **12**, 3–11.
3. Saraev Y. N., Bezborodov V. P., Gladkovsky S. V., Golikov N. I. (2016) The ways of reliability enhancement of welded metal structures for critical applications in the conditions of low climatic temperatures. *Citation: AIP Conference Proceedings*, 1783, 020195.
4. Saraev Y. N. (2011) Adaptive pulse technological processes of welding and pad weld is a new high-performance method of obtaining of permanent joints of high-strength steels. *Special issue of World J. Engineering*, **8**, 989.
5. Сараев Ю. Н. (2002) Адаптивные импульсно-дуговые методы механизированной сварки при строительстве магистральных трубопроводов. *Сварочное производство*, **1**, 4–7.
6. Сараев Ю. Н. (2010) Обоснование концепции повышения безопасности и живучести технических систем, эксплуатируемых в регионах Сибири и Крайнего Севера, на

основе применения адаптивных импульсных технологий сварки. *Тяжелое машиностроение*, **8**, 14–19.

7. Сараев Ю. Н., Безбородов В. П., Gladkovskiy S. V., Golikov N. A. (2016) Исследование свойств сварных соединений марганцовистой стали, полученных низкочастотной импульсно-дуговой сваркой. *Деформация и разрушение*, **1**, 36–41.
8. Сараев Ю. Н. (1988) Управление переносом электродного металла при сварке в CO<sub>2</sub> с короткими замыканиями дугового промежутка (Обзор). *Автоматическая сварка*, **12**, 16–23.
9. Yermachenko V. M., Kuznetsov A. P., Petrovskiy V. N. et al. (2011) Specific features of the welding of metals by radiation of high-power fiber laser. *Laser Physics*, **21**(8), 1530–1537.
10. Димаки В. А., Суханов В. Б., Троицкий В. О., Филонов А. Г. (2012) Стабилизированный лазер на бромиде меди с автоматизированным управлением режимами работы со средней мощностью генерации 20 Вт. *Приборы и техника эксперимента*, **6**, 95–99.
11. Сараев Ю. Н. (2017) Поискные исследования повышения надежности металлоконструкций ответственного назначения, работающих в условиях экстремальных нагрузок и низких климатических температур. *Научные технологии в проектах РНФ*. Сибирь. Псахье С. Г. и Шаркеев Ю. П. (ред.). Томск, НТЛ. ISBN 978-5-89503-607-5, сс. 134–202.
12. Сараев Ю. Н., Лунев А. Г., Киселев А. С. и др. (2018) Исследование влияния энергетических параметров режима дуговой сварки покрытыми электродами на стабильность тепломассопереноса. *Сварочное производство*, **2**, 3–13.ц
13. Дилтай У., Штайн Л., Весте К., Райх Ф. (2003) Состояние и перспективы применения высокоэффективных сварочных технологий. *Автоматическая сварка*, **10–11**, 151–157.

### References

1. Karkhin, V.A. (2015) *Thermal processes in welding*. 2nd Ed. St.-Petersburg, Izd-vo Politekhn. Un-ta [in Russian].
2. Paton, B.E., Maksimov, S.Yu., Sidoruk, V.S., Saraev, Yu.N. (2014) To problem of arc self-regulation in consumable electrode welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, **12**, 3-11 [in Russian].
3. Saraev, Y.N., Bezborodov, V.P., Gladkovsky, S.V., Golikov, N.I. (2016) The ways of reliability enhancement of welded metal structures for critical applications in the conditions of low climatic temperatures. *AIP Conf. Proc.*, 1783, 020195.
4. Saraev, Y.N. (2011) Adaptive pulse technological processes of welding and pad weld is a new high-performance method of obtaining of permanent joints of high-strength steels. *World J. Engineering, Special Issue*, **8**, 989.
5. Saraev, Yu.N. (2002) Adaptive pulsed-arc mechanized welding methods in construction of main pipelines. *Svarochn. Proizvodstvo, Svarochn. Proizvodstvo*, **1**, 4-7 [in Russian].
6. Saraev, Yu.N. (2010) Substantiation of concept of safety improvement and survivability of technical systems operated in the regions of Siberia and Extreme North, based on application of pulsed welding technologies. *Tyazholoe Mashinostroenie*, **8**, 14-19 [in Russian].
7. Saraev, Yu.N., Bezborodov, V.P., Gladkovsky, S.V., Golikov, N.A. (2016) Study of properties of manganese steel welded joints produced by low-frequency pulsed arc welding. *Deformatsiya i Razrushenie*, **1**, 36-41 [in Russian].
8. Saraev, Yu.N. (1988) Control of electrode metal transfer in CO<sub>2</sub>-welding with short circuit of arc gap (Review). *Avtomatich. Svarka*, **12**, 16-23 [in Russian].
9. Yermachenko, V.M., Kuznetsov, A.P., Petrovskiy, V.N. et al. (2011) Specific features of the welding of metals by radiation of high-power fiber laser. *Laser Physics*, **21**(8), 1530-1537.
10. Dimaki, V.A., Sukhanov, V.B., Troitskiy, V.O., Filonov, A.G. (2012) Stabilized laser on copper bromide with automated operation modes having average generation power of 20 W. *Pribory i Tekhnika Eksperimenta*, **6**, 95-99 [in Russian].
11. Saraev, Yu.N. (2017) Exploratory research of reliability improvement of critical metal structures, operated under

- extreme load conditions and low climatic temperatures. In: High technologies in the projects of RSF. Siberia. Ed. by S.G. Psakhie et al. Tomsk, Izd-vo NTL, 134-202 [in Russian].
12. Saraev, Yu.N., Lunev, A.G., Kiselev, A.S. et al. (2018) Investigation of effect of energy parameters of consumable electrode arc welding on stability of heat- and mass transfer. *Svarochn. Proizvodstvo*, 2, 3-13 [in Russian].
13. Dilthey, U., Stein, L., Woeste, K., Reich, F. (2003) Latest developments and trends in high-efficient welding technologies. *The Paton Welding J.*, 10-11, 146-152.

## КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Ю. М. САРАЄВ<sup>1</sup>, А. Г. ЛУНЬОВ<sup>1</sup>, А. С. КІСЕЛЬОВ<sup>2</sup>, А. С. ГОРДИНЕЦЬ<sup>2</sup>, М. В. ТРИГУБ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут фізики міцності і матеріалознавства СВ РАН.

634055, м. Томськ, просп. Академічний, 2/4. E-mail: litsin@ispms.tsc.ru

<sup>2</sup>Національний дослідний Томський політехнічний інститут. 634004, м. Томськ, просп. Леніна. 30. E-mail: kas@tpu.ru

<sup>3</sup>Інститут оптики атмосфери ім. В. Е. Зуєва СВ РАН. 634055, м. Томськ, площа акад. Зуєва, 1. E-mail: trigub@tpu.ru

В роботі представлені результати розробки і виготовлення унікального дослідницького комплексу для вивчення швидкоплинних процесів тепломасопереносу при дуговому зварюванні електродом, що плавиться. Показано переваги розробленого комплексу перед традиційно застосовуваними з використанням кіно- та відеокамер з тінювим принципом реєстрації характеристик тепломасопереносу. Досліджували бистроплинні процеси із застосуванням високошвидкісної відеозйомки з підсвічуванням дугового проміжку променем Cu–Br-лазера, що поліпшує візуалізацію досліджуваного об'єкта – процесу плавлення і перенесення кожної краплі електродного металу в умовах інтенсивного світлового випромінювання від електричної дуги. У статті наведено схеми, алгоритми управління, відеокадри окремого зварювально-го мікроцикла, приклади запису осцилограм і графічні уявлення змін їх кількісних значень. Бібліогр. 13, табл. 1, рис. 14.

*Ключові слова:* зварювання, наплавлення, відеозйомка, плавлення, тепломасоперенос, лазер, управління, стабільність, електрична дуга, зварювання плавким електродом

## COMPLEX FOR INVESTIGATION OF ARC WELDING PROCESSES

Yu.N. SARAEV<sup>1</sup>, A.G. LUNEV<sup>1</sup>, A.S. KISELEV<sup>2</sup>, A.S. GORDYNETS<sup>2</sup>, M.V. TRIGUB<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS, 2/4 Akademicheskaya Ave., 634055, Tomsk, Russia.

E-mail: litsin@ispms.tsc.ru

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Ave., 634004, Tomsk, E-mail: kas@tpu.ru

<sup>3</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of SB RAS 1, Acad. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia. Email: trigub@tpu.ru

The work presents the results of development and manufacture of a unique research complex for investigation of fast processes of heat-mass transfer in consumable electrode arc welding. Advantages of the developed complex over the traditionally applied ones using film and video cameras with shadow principle of registration of heat and mass transfer characteristics are shown. Fast processes were studied with application of high-speed video recording with illumination of the arc gap by Cu-Br laser beam, improving visualization of the studied object — the process of melting and transfer of each drop of molten metal under the conditions of intensive light of the electric arc. The paper contains explanatory diagrams, control algorithms, video frames of a separate welding microcycle, examples of oscillogram recording and graphical representations of changes in their quantitative values. 13 Ref., 1 Tabl., 14 Fig.

*Keywords:* welding, surfacing, video filming, melting, heat-mass transfer, laser, control, stability, electric arc, consumable electrode welding

Поступила в редакцию 27.06.2018



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

## ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛС АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ\*

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, Ю. В. ОРСА, К. С. ХРИПКО, О. В. МАХНЕНКО

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

Представлены результаты разработки эффективных технологических процессов электронно-лучевой сварки балочных конструкций из титанового сплава ВТ-6 с обеспечением высокой сопротивляемости сварных соединений образованию усталостных трещин, диффузора газотурбинного двигателя из сплава ОТ-4 с использованием прорезных швов, корпуса камеры среднего давления газотурбинного двигателя из сплава ВТ5Л с обеспечением высокой точности геометрических размеров. Библиогр. 5, рис. 16.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, авиационные конструкции, титановые сплавы, детали переменного сечения, прорезные швы, остаточные напряжения, сопротивление усталости

ЭЛС — способ сварки, оптимально подходящий для производства многих авиационных конструкций из титановых сплавов. В нем при идеальной вакуумной защите обеспечивается сочетание достаточно высокой удельной энергии источника нагрева (излишняя концентрация в большинстве случаев и не нужна — в силу невозможности получения «нулевых» зазоров в стыке) с возможностями ЧПУ по точной повторяемости траектории сварки при строгой синхронизации перемещения с управлением энергетическими параметрами электронного пучка. В работе представлены три примера технологии ЭЛС подобных изделий.

**ЭЛС тонкостенных гофрированных несущих авиационных конструкций из сплава ВТ-6.** Балочные конструкции двутаврового типа с тонкостенной стенкой волнистого профиля (гофрированной), находящейся между двумя полками значительно большей толщины, представляют большой интерес для авиастроения с точки зрения снижения общей массы при высокой нагрузочной способности. При этом использование титанового сплава, кроме снижения массы, обеспечивает еще и высокую коррозионную стойкость.

Такие методы изготовления подобных конструкций, как литье, штамповка, ковка с последующей механической обработкой экономически неэффективны. Очевидным является экономическое преимущество использования сварки при изготовлении балочных конструкций из отдельных, технологичных с точки зрения их производства, частей. Но в этом случае возникают свои технические сложности. Во-первых, процесс изготов-

ления сварной двутавровой гофрированной конструкции предусматривает выполнение сварки по сложной криволинейной траектории. Во-вторых, при этом требуется получение полного сплавления стенки с полками с формированием плавного перехода шва между стенкой и полкой. В-третьих, геометрическая точность всей конструкции может быть обеспечена только при условии значительного снижения или компенсации остаточных сварочных деформаций. Наконец, в некоторых случаях возникает потребность соединения полки со стенкой при соотношении толщин вплоть до 12:1.

На наш взгляд, в этом случае способ ЭЛС, уже в силу своих главных характерных особенностей, удовлетворяет большинству упомянутых выше требований, в особенности с точки зрения точности управления энергией и сварочным перемещением [1].

Для разработки технологии ЭЛС был использован прототип опытной конструкции гофрированной двутавровой балки, эскиз которой показан на рис. 1. Прототип имитирует силовую конструкцию такой балки с достаточно толстыми полками толщиной 7,62 мм и тонкостенной гофрированной стенкой толщиной 0,64 мм, имеющей в центре перпендикулярное пересечение с цилиндрической трубой (обечайкой) той же толщины. В качестве конструкционного материала для прототипа, а затем и макетов длинномерных силовых авиационных конструкций применен широко используемый ( $\alpha+\beta$ )-сплав ВТ-6 (Ti-6Al-4V), способный обеспечивать прочность, эквивалентную основному металлу, при любых режимах послесварочного отжига при температурах не выше температуры полиморфного превращения [2].

Конечно, возможны различные схемы сварки такого таврового соединения: и сварка насквозь через полку, и односторонняя сварка электронным пучком, направленным в край стыка полки

\* По материалам доклада, представленного на международной конференции «Титан 2018. Производство и применение в Украине», 11–13 июня 2018, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

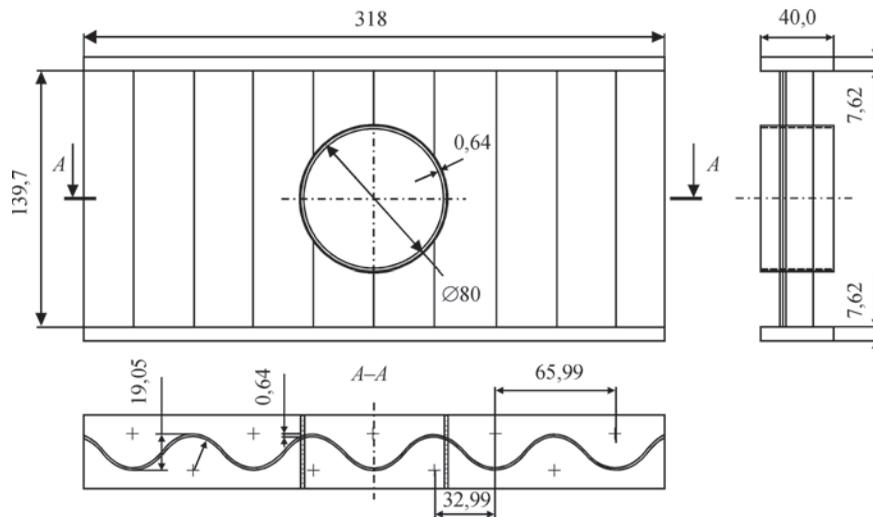


Рис. 1. Конструкция прототипа двутавровой гофрированной балки

со стенкой под небольшим углом к поверхности этой полки. В свое время были опробованы эти схемы сварки и пришли к выводу, что все они не удовлетворяют, в достаточной мере, упомянутым выше требованиям.

В итоге остановились на схеме сварки наклонным электронным пучком с двух сторон стенки за два прохода, как это показано на рис. 2. Сварка выполняется наклонным на  $30^\circ$  от вертикали электронным пучком, направленным на край вертикально расположенного стыка между полкой (или обечайкой) и волнистой стенкой. После выполнения частичного проплавления этого стыка с одной стороны, вся сборка переворачивается на  $180^\circ$  для выполнения заключительного прохода.

Сразу следует отметить, что главной сложностью при реализации подобной схемы сварки является то, что из-за трудности точной механической подгонки торцов тонкой гофрированной заготовки на отдельных участках стыка возможны зазоры. Проблема еще усугубляется, когда сама полка представляет собой не плоскую поверх-

ность, как показано на схеме прототипа, а искривленную, т.е. когда высота двутавра плавно изменяется по его длине (подобный вариант мы также отработывали). В итоге, превышение величины зазора и его протяженности выше некоторого критического предела с высокой вероятностью приводит к образованию локальных прожогов шва, пример чего приведен на рис. 3.

Таким образом, главная задача первого прохода — качественное сплавление двух сопряженных поверхностей даже при наличии небольших локальных зазоров. Именно поэтому и силовые прихватки, и первый проход выполнялись на «мягком» режиме, т.е. неконцентрированным электронным пучком. Более того, вместо традиционного непрерывного режима сварки мы использовали импульсную модуляцию тока электронного пучка, что позволило, в сравнении с непрерывной сваркой, уменьшить «погонное» тепловложение в свариваемые кромки, тем самым предотвращая их локальный перегрев и усиливая эффект силы поверхностного натяжения в удержании расплавленного металла сварочной ванны. Все это позволило обеспечить формирование относительно неглубокого шва с лицевой поверхностью в виде «галтели» между сопряженными поверхностями (как условно показано на схеме рис. 2). При этом

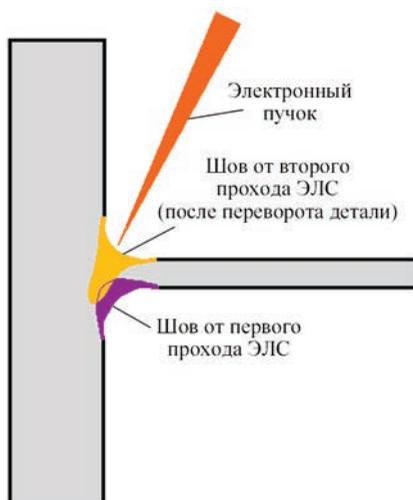


Рис. 2. Схема двухсторонней ЭЛС таврового соединения за два прохода



Рис. 3. Локальный прожог шва при недопустимом зазоре в стыке



Рис. 4. Макрошлиф ( $\times 35$ ) таврового соединения стенки и обечайки

максимально допустимые локальные зазоры в стыке не должны превышать: до 0,1 мм в тавровом соединении 7,60 мм полки и 0,64 мм стенки и до 0,08 мм — при одинаковых толщинах стенки и полки (равных 0,64 мм).

После переворота изделия на  $180^\circ$  выполняется завершающий проход. Он должен обеспечить уже полное сплавление в месте контакта

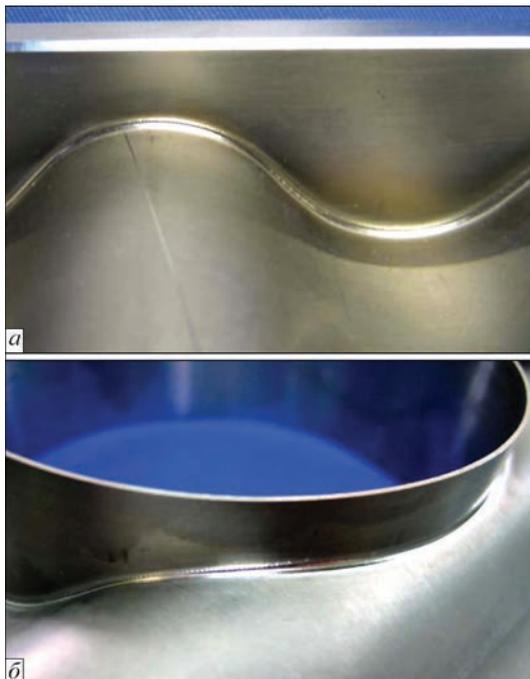


Рис. 5. Лицевая поверхность шва после импульсной ЭЛС соединений волнистой стенки, соответственно, с полкой (а) и с обечайкой (б)

торца волнистой стенки с полкой балки (или стенкой обечайки), гарантированно перекрывая зону проплавления первого прохода. Так как при первом проходе уже получено частичное сплавление кромки стенки с полкой по всей длине, локальные зазоры в остающейся части стыка уже не критичны. Можно даже выполнять сварку максимально концентрированным электронным пучком с формированием так называемого кинжального проплавления, но делать этого, конечно, не нужно из-за образования корневых дефектов. Нами был выбран компромиссный режим сварки, с умеренной концентрацией электронного пучка и с использованием импульсной модуляции его тока, который обеспечивает минимально достаточные глубину и ширину шва со сравнительно широкой корневой частью (рис. 4) и гладкой лицевой поверхностью в виде «галтели» между сопряженными поверхностями (рис. 4 и 5).

По отработанной технологии были успешно сварены как упомянутые ранее прототипы (эскиз рис. 1), так и полномасштабный шестиметровый макет двутавровой гофрированной балки (рис. 6).

Затем были проведены расчетные оценки остаточных напряжений и сопротивления усталости такой шестиметровой гофрированной балки из титанового сплава ВТ-6.

Известно [3], что для сплава ВТ-6 предел усталости на базе  $10^5$  циклов примерно соответствует 588 МПа, т. е., если не учитывать остаточные нерелаксированные напряжения и концентрацию напряжений, то на заданной базе  $8 \cdot 10^4$  циклов имеет место достаточно большой запас прочности по напряжениям.

Результаты математического моделирования остаточных напряжений показывают, что после ЭЛС в полке уровень продольных остаточных напряжений достигает 500 МПа (рис. 7).

По техническим условиям балка после сварки подвергается низкотемпературному отпуску, который снижает остаточные напряжения примерно на 40 %, т. е. в зоне шва остаются продольные остаточные напряжения на уровне 300 МПа.

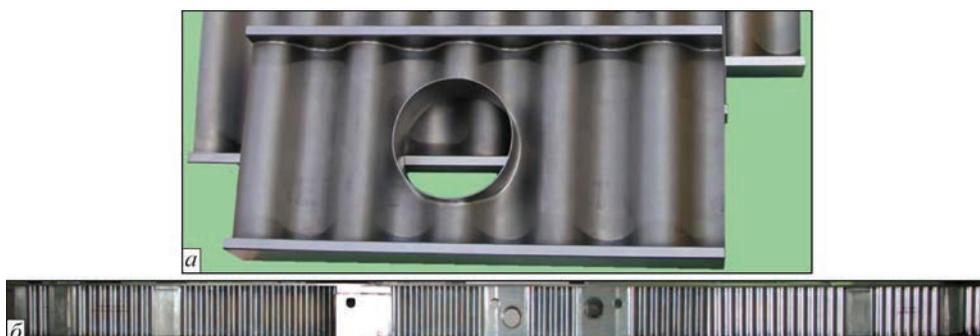


Рис. 6. Сваренные узлы: короткий прототип секции двутавровой гофрированной балки с поперечной трубой (а) и полномасштабный шестиметровый макет (б)

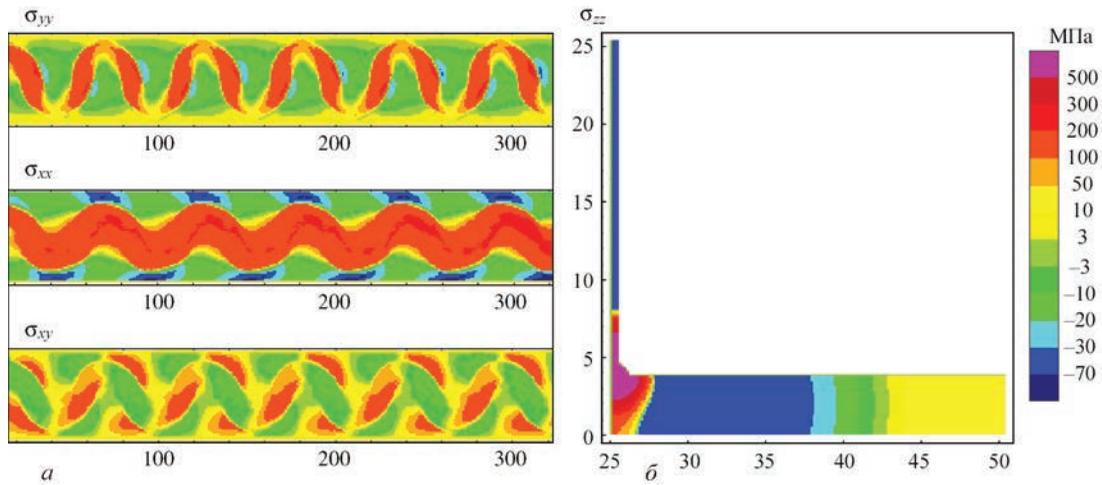


Рис. 7. Распределение остаточных напряжений в плоскости (а) и поперечном сечении соединения (б)

С учетом уже имеющихся данных [4], проведенные расчеты сопротивления усталости шестиметровой сварной балки после подобной термической обработки показали, что зона сварных соединений отличается достаточно высокой сопротивляемостью образованию усталостных трещин на заданной базе  $8 \cdot 10^4$  циклов. Причем небольшие локальные утонения стенки в зоне сварного шва оказывают влияние лишь на величины касательных напряжений на краях балки, но на зарождение усталостных трещин это оказывает лишь весьма небольшое влияние.

**ЭЛС диффузора газотурбинного двигателя из титанового сплава ОТ-4.** Существующая до настоящего времени технология сборки деталей диффузора газотурбинного двигателя (ГТД) из титанового псевдо- $\alpha$ -сплава марки ОТ-4 предусматривала получение соединения с помощью имеющихся на торцах лопаток шипов, которые вводятся в прорези покрывного диска и ввариваются по контуру методом аргонодуговой сварки (АрДС). Очевидным недостатком данной технологии является значительное искажение формы изделия, в частности, недопустимое уменьшение величины контрольного зазора А (рис. 8). Даже применение последующей термической правки изделия в жесткой оснастке не всегда приводит к положительному результату.

Было решено заменить метод сварки с АрДС на ЭЛС, для чего соответственно видоизменить конструкцию соединяемых элементов диффузора для наиболее полного использования возможностей ЭЛС. Принято решение убрать упомянутые «шипы» с торцов всех 17 лопаток нижнего диска и, обеспечив плотный контакт этих торцов со сплошной нижней поверхностью покрывного диска, соединять их между собой прорезными швами (прямо сквозь 2,5 мм толщину покрывного диска). При этом указанные выше прорезные швы долж-

ны иметь замкнутый контур, геометрически подобный сечению лопатки (рис. 9).

Экспериментально установлено, что величина смещения оси шва от края торца лопатки должна составлять 1,0 мм. Параметры режима сварки были выбраны, исходя из условий получения узкого шва с глубиной проплавления не менее 6 мм, без корневых дефектов.

Фактически свариваемый контур формируется двумя последовательными прорезными швами. Небольшое увеличение глубины проплавления второго прорезного шва (правый на рис. 10), в итоге, компенсировали соответствующим снижением тока электронного пучка (на 2 мА).

Отработанная на образцах-прототипах технология ЭЛС была в дальнейшем использована при изготовлении реального диффузора ГТД

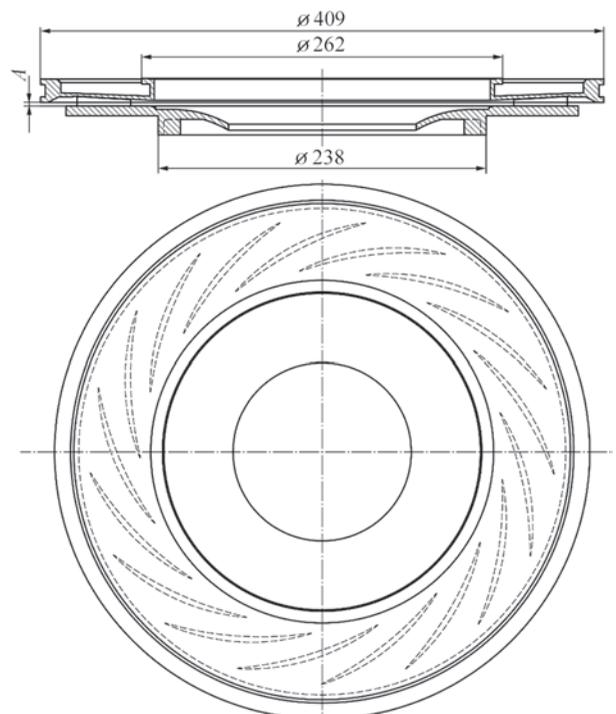


Рис. 8. Эскиз прототипа диффузора ГТД

0020102040-01СБ (рис. 11) и передана вместе с ним Заказчику.

**ЭЛС корпуса камеры среднего давления ГТД из титанового сплава ВТ5Л.** Корпус камеры среднего давления (КСД) газотурбинного двигателя представляет собой сложную конструкцию, состоящую из стоек и лопаток из литейного титанового  $\alpha$ -сплава ВТ5Л. В соответствии с техническими требованиями элементы КСД должны быть

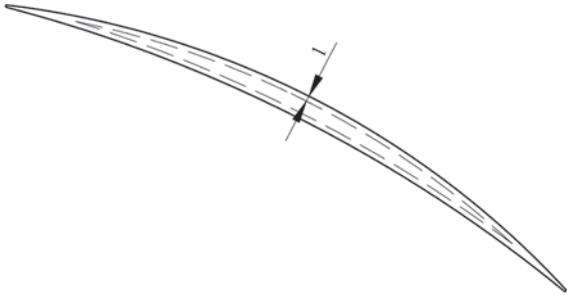


Рис. 9. Контур прорезного шва на покрывном диске диффузора относительно сечения лопатки

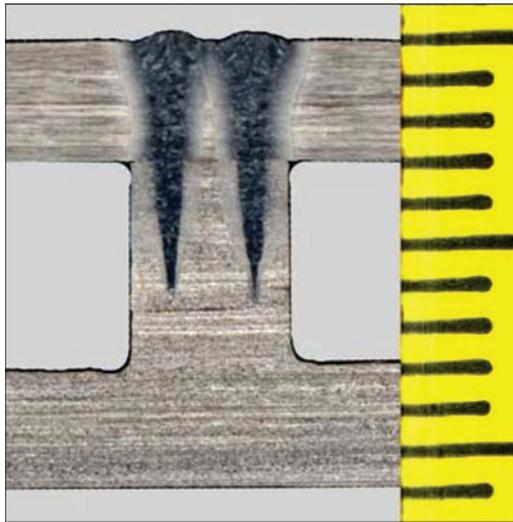


Рис. 10. Макрошлиф таврового соединения, полученного двумя прорезными швами



Рис. 11. Наружная поверхность покрывного диска диффузора после ЭЛС прорезными швами торцов 17 лопаток

сварены между собой по внутренним и наружным бандажным полкам с обеспечением требуемого взаимного расположения лопаток и стоек относительно оси двигателя [5]. Количество лопаток и стоек — 34, соответственно суммарное количество сварных швов по внутреннему и наружному диаметру — 68, наружный диаметр корпуса КСД в сборочно-сварочном приспособлении не превышает диаметром 1390 мм. Процесс ЭЛС должен обеспечивать полный провар детали переменного сечения (рис. 12) по всей длине стыка с формированием лицевого и обратного валиков шва без подрезов и занижений, а также защиту пера лопатки и прилегающих поверхностей от повреждением проникающим электронным пучком.

Для наружного соединения использована схема ЭЛС с перемещением горизонтального пучка почти сверху вниз, а для внутреннего — с продольным перемещением в плоскости Z-X наклоненного на  $35^\circ$  от вертикали пучка.

В первом случае свариваемая толщина варьируется от 5 до 17 мм, а во втором, ввиду наклона пучка, — от 5,5 до 24 мм. Соответственно, сварочные параметры должны изменяться синхронно с изменением свариваемой толщины (рис. 12).

Для обеих пространственных схем сварки (т. е. наружных и внутренних швов) разработано и из-



Рис. 12. Пара стоек КСД, сваренных наружным и внутренним швами

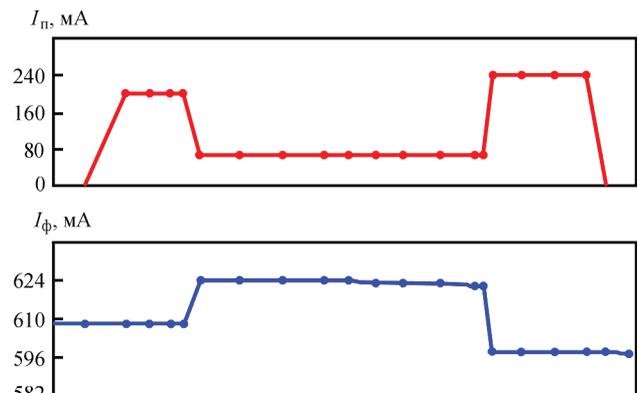


Рис. 13. Графики изменения тока пучка и тока фокусировки при сварке детали с переменной толщиной



Рис. 14. Корпус КСД в оснастке для сварки горизонтальным электронным пучком наружных швов



Рис. 15. Корпус КСД в оснастке для продольной сварки (в плоскости Z-X) наклонным электронным пучком внутренних швов

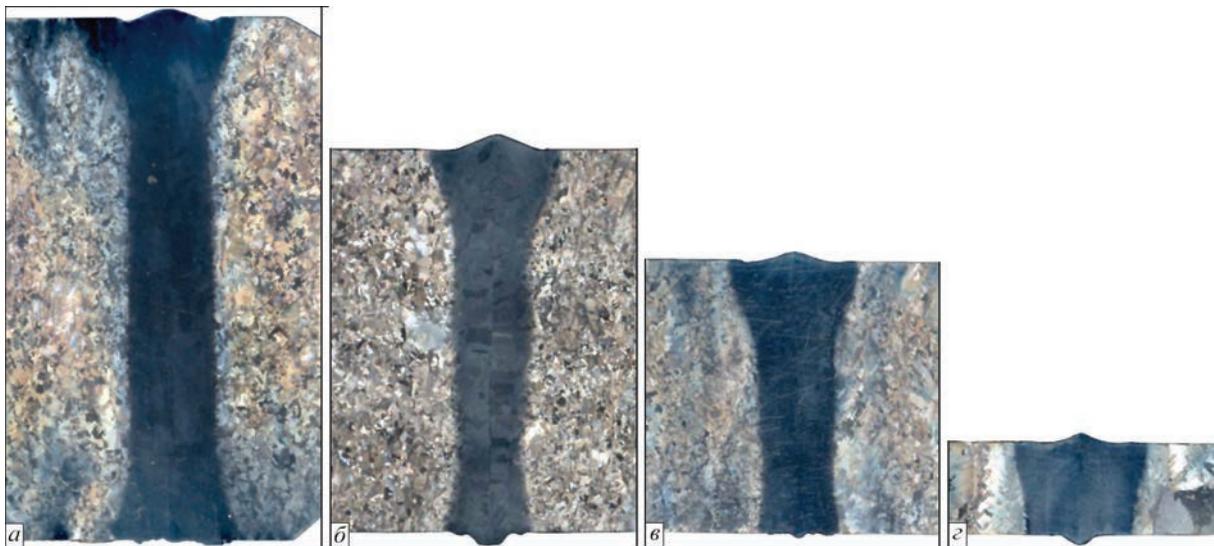


Рис. 16. Макроструктура сварных соединений литейного сплава ВТ5Л1 различной толщины при ЭЛС со сквозным проплавлением: а —  $\delta_{св} = 26$  мм; б — 17; в — 14; г — 5

готовлено универсальное сборочно-сварочное приспособление (оснастка), обеспечивающее фиксацию всех элементов корпуса, свободный ввод и вывод электронного пучка на технологические планки из материала изделия, а также медную защиту изделия от проникающего электронного пучка (рис. 14 и 15, соответственно).

Начиная с толщины свариваемого металла ( $\delta_{св}$ ) 14 мм, формируется сварной шов с практически параллельными стенками литой зоны (рис. 16), при этом ширина шва в корневой части находится в диапазоне 2,4...2,6 мм.

Контроль геометрии корпуса камеры среднего давления после ЭЛС всех соединений показал допустимые отклонения реальных размеров от чертежных, что подтверждает преимущество использования ЭЛС в производстве частей ГТД.

#### Список литературы

1. Патон Б. Е., Назаренко О. К., Нестеренков В. М. и др. (2004) Компьютерное управление процессом ЭЛС с мно-

гокоординатными перемещениями пушки и изделия. Киев, *Автоматическая сварка*, 5, 3–7.

2. Замков В. Н., Прилуцкий В. П., Петриченко И. К. и др. (2001) Влияние способа сварки плавлением на свойства соединений сплава Ti-6Al-V. *Там же*, 4, 3–7.
3. Титановые сплавы в машиностроении. (1977). Капырин Г. И. (ред.). Ленинград, Машиностроение.
4. Махненко В. И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
5. Нестеренков В. М., Кравчук Л. А., Архангельский Ю. А. и др. (2015) Электронно-лучевая сварка камеры среднего давления газотурбинного двигателя. Киев, *Автоматическая сварка*, 12, 31–35.

#### References

1. Paton, B.E., Nazarenko, O.K., Nesterenkov, V.M. et al. (2004) Computer control of electron beam welding with multi-coordinate displacements of the gun and workpiece. *The Paton Welding J.*, 5, 2-5.
2. Zamkov, V.N., Prilutsky, V.P., Petrichenko, I.K. et al. (2001) Effect of the method of fusion welding on properties of welded joints in alloy Ti-6Al-4V. *Ibid.*, 4, 2-6.
3. (1977) *Titanium alloys in machine building*. Ed. by G.I. Kapryrin. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].

4. Makhnenko, V.I. (2006) *Service life of safe operation of welded joints and assemblies of modern structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
5. Nesterenkov, V.M., Kravchuk, L.A., Arkhangelsky, Yu.A. et al. (2015) Electron beam welding of medium-pressure chamber of gas turbine engine. *The Paton Welding J.*, **12**, 29-33.

## ТЕХНОЛОГІЯ ЕПЗ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

**В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, Ю. В. ОРСА, К. С. ХРИПКО, О. В. МАХНЕНКО**

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

Представлені результати розробки ефективних технологічних процесів електронно-променевого зварювання балочних конструкцій з титанового сплаву VT-6, що забезпечує високу опірність зварних з'єднань утворенню втомних тріщин, дифузора газотурбінного двигуна зі сплаву OT-4 з використанням прорізних швів, корпусу камери середнього тиску газотурбінного двигуна зі сплаву VT5Л із забезпеченням високої точності геометричних розмірів. Бібліогр. 5, рис. 16.

*Ключові слова:* електронно-променеве зварювання, авіаційні конструкції, титанові сплави, деталі змінного перерізу, прорізні шви, залишкові напруги, опір втомі

## TECHNOLOGY FOR EBW OF AIRCRAFT STRUCTURES OF TITANIUM ALLOYS

**V.M. NESTERENKOV, Yu.V. ORSA, K.S. KHRIPKO, O.V. MAKHNENKO**

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Presented are the results of the development of efficient technological processes of electron beam welding of beam structures of titanium VT-6 alloy with high resistance of welded joints to the formation of fatigue cracks, the diffuser of gas turbine engine of OT-4 alloy using slot welds, the chamber of medium pressure gas-turbine engine of VT5L alloy, providing a high accuracy of geometric dimensions. 5 Ref., 16 Fig.

*Keywords:* electron beam welding, aircraft structures, titanium alloys, variable cross-section parts, slot welds, residual stresses, fatigue resistance

Поступила в редакцію 25.06.2018

16 - 18 October 2018

Fair and Exhibition Centre  
**expo silesia**  
www.exposilesia.pl

60<sup>th</sup>  
International  
Welding Conference  
Organizer:  
Institute of Welding

ExpoWELDING  
IWS®

International Welding Fair

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. Sosnowiec, 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>.

# ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПСЕВДО- $\beta$ -ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

С. В. АХОНИН, В. Ю. БЕЛОУС, Р. В. СЕЛИН

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

Конструкционные псевдо- $\beta$ -титановые сплавы нашли широкое применение в изделиях авиа- и ракетостроения. Однако при получении сварных соединений псевдо- $\beta$ -сплавов методом сварки плавлением возникают трудности, связанные с изменением структуры и образованием метастабильных фаз в сварном соединении. В данной работе, с помощью разработанной математической модели процесса АДС неплавящимся электродом, исследовано влияние термического цикла сварки на форму шва, скорости охлаждения и структуру металла сварного соединения из псевдо- $\beta$ -титанового сплава ВТ19. Установлено количество фаз в металле шва, зоне термического влияния и основном металле, спрогнозирован фазовый состав и его влияние на механические свойства сварных соединений. Библиогр. 8, табл. 4, рис. 11

*Ключевые слова:* аргонодуговая сварка, ТИГ-сварка, высокопрочные титановые сплавы, математическое моделирование

Конструкционные псевдо- $\beta$ -титановые сплавы нашли широкое применение в изделиях авиа- и ракетостроения. Сплавы данного класса эффективно упрочняются термической обработкой, состоящей из закалки и старения и имеют прочность на 10...20 % выше, чем  $\alpha$ -сплавы. Однако при получении сварных соединений псевдо- $\beta$ -сплавов методом сварки плавлением возникают трудности, обусловленные изменением структуры и образованием метастабильных фаз в сварном соединении [1-3].

Выбор способов, режимов и технологии сварки плавлением  $\beta$ -сплавов титана зависит от типа сварной конструкции, ее назначения, условий работы и характера термической обработки до и после сварки. Основным критерием выбора режимов и технологии сварки является оптимальный интервал скорости охлаждения при сварке. При этом необходимо учитывать, что качество сварных соединений зависит от структуры и свойств околошовной зоны, которые определяются сварочным термическим циклом, поэтому целесообразно сравнить различные режимы аргонодуговой сварки неплавящимся электродом по их тепловому влиянию на шов и околошовную зону [4, 5].

Целью данной работы является аналитическое изучение тепловых условий в зоне сварки методом математического моделирования процесса аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом, определение зависимости структуры участков сварного соединения и его механических свойств от режимов сварки.

**Методика работы.** Изучение влияния термического цикла аргонодуговой сварки вольфрамо-

вым электродом на структурные превращения проводилось методом математического моделирования тепловых процессов сварки псевдо- $\beta$ -титанового сплава ВТ19. Основой метода является уравнение теплового баланса. Для расчетного определения влияния параметров режима сварки на формирование сварного шва методом конечных элементов была построена трехмерная математическая модель тепловых процессов в титане при сварке со сканирующим источником нагрева, основу которой составляет дифференциальное уравнение теплопроводности и сформулированы граничные условия, описывающие теплообмен изделия с окружающей средой.

Полученное температурное поле использовали для определения таких тепловых параметров, как распределение максимальных температур и скорости охлаждения в сечении сварного соединения.

Использованная конечно-элементная трехмерная модель тепловых процессов сварки предложена в работе [6]. С учетом приведенных выше начальных и граничных условий были получены расчетные тепловые поля в наплавляемом изделии. По результатам расчетов были построены изотермы максимальных температур, по которым определяли геометрию и размеры зоны проплавления, ЗТВ, зоны полиморфного превращения.

**Влияние термического цикла при АДС сплава ВТ19 на скорости охлаждения в сварном соединении.** Исследовали 4 режима аргонодуговой сварки с разной скоростью сварки и погонной энергией (табл. 1).

Пример расчетного распределения максимальных температур и макрошлиф полученного экспериментального сварного соединения, выпол-

Таблица 1. Режимы сварки, для которых выполнялось математическое моделирование

Номер режима	Ток сварки, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Глубина проплавления, мм
1	240	12	10	3,8
2	310	12	10	6,0
3	320	12	16	1,9
4	620	12	16	6,0

ненного на режиме №2 (см. табл. 1), для которого было проведено математическое моделирование тепловых процессов ТИГ-сварки псевдо-β-титанового сплава ВТ19, представлен на рис. 1. Разница в ширине наплавленного валика в расчетном и экспериментальном образце составила 3,1 %, ширина обратного валика 2,4 %. Такие малые зна-

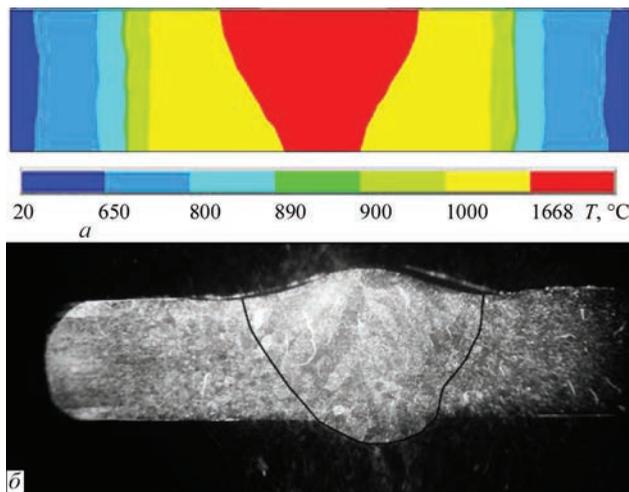


Рис. 1. Результат расчета зоны проплавления основного металла и форма ЗТВ, источник нагрева:  $I = 310$  А,  $U = 11$  В,  $\eta = 0,43$ ,  $v = 10$  м/ч (а); макрошлиф соединения, выполненного АДС вольфрамовым электродом ( $I_{св} = 310$  А,  $U_{д} = 11$  В,  $v_{св} = 10$  м/ч) (б).

чения погрешности между расчетными и экспериментальными данными подтверждают адекватность разработанной математической модели.

В результате расчетов методом математического моделирования определено влияние погонной энергии и скорости сварки на глубину проплавления, форму шва и распределение максимальных температур в сечении сварного соединения (рис. 2).

Для определения влияния термического цикла сварки на скорости охлаждения и структуру металла сварного соединения были выбраны режимы, при которых обеспечивается полное проплавление металла шва (№2 и №4), с меньшим и большим значением погонной энергии. Для этих режимов были рассчитаны скорости охлаждения в диапазоне температур от 1600 до 100 °С. Анализ полученных расчетных данных показал, что при охлаждении с температуры 1667 до 890 °С наибольшие скорости охлаждения отмечаются в металле шва. При охлаждении с температуры 1200°С скорость охлаждения в середине шва на режиме с меньшей скоростью сварки достигает значений 228 °С (рис. 3, а), а в зоне сплавления скорость охлаждения достигает 130 °С/с.

Увеличение скорости сварки и силы тока не приводит к ощутимым изменениям в скоростях

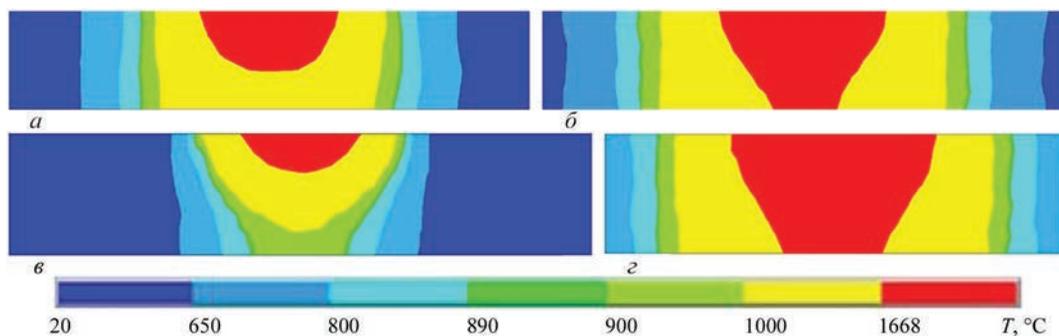


Рис. 2. Влияние погонной энергии и скорости сварки на проплавление титанового сплава ВТ19: а – режим №1, б – 2, в – 3, г – 4.

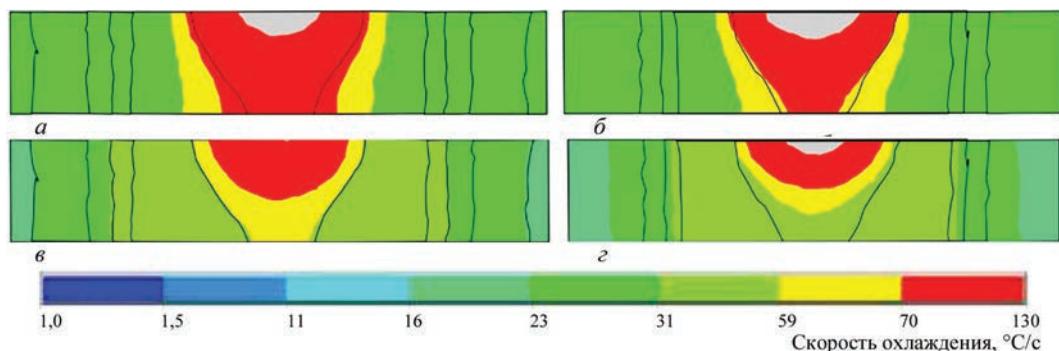


Рис. 3 - Распределение скоростей охлаждения в интервале температур: а – 1200...1100 °С (режим № 2); б – 1200...1100 °С (№ 4); в – 1000...900 °С (№ 2); г – 1000...900 °С (№ 4);

охлаждения в этих диапазонах температур, а максимальное значение скоростей охлаждения даже немного ниже – 217 °C/c.

При достижении интервала температур 1000...900 °C максимальная скорость охлаждения в центре шва на поверхности составляет 177 °C/c, металл шва остывает со скоростью 130...70 °C/c, а в ЗТВ скорости охлаждения находятся в пределах от 59 до 23 °C/c. (рис. 3, в). Скорости охлаждения на режиме с большей погонной энергией имеют схожие значения: максимальная скорость составляет 169 °C/c, но площадь образца, на котором такие значения фиксируются, значительно больше (рис. 3, з). При этом с обратной стороны шва скорости охлаждения меньше, чем у образца на режиме с меньшей скоростью сварки.

В интервале температур 900...800 °C скорость охлаждения металла шва в центре на участке шириной 6,5 мм и на глубине 2,5 мм все еще составляет 130...70 °C/c. В остальной части металла шва и ЗТВ скорости охлаждения выравниваются и составляют 31...23 °C/c. У образца, сваренного с большей скоростью сварки, максимальные скорости охлаждения снижаются до 145 °C/c и площадь, на которой зафиксированы скорости охлаждения 130...70 °C/c, больше, чем у образца с меньшей скоростью сварки. При достижении диапазона температур, соответствующему температуре полиморфного превращения сплава ВТ19, 800...700 °C ( $T_{\text{пп}} = 780 \text{ °C}$ ) [7], скорости охлаждения снижаются и в зоне сплавления находятся в пределах от 59...23 °C/c, а в ЗТВ фиксируется максимальная скорость охлаждения 11 °C/c. При этом, согласно диаграмме, в отдаленных от центра шва участках ЗТВ начинает фиксироваться  $\beta \rightarrow \alpha$ -превращение. У образца с большей погонной энергией все еще наблюдается высокие для такого диапазона температур скорости охлаждения: в центре шва составляют 70...120 °C/c, в ЗТВ достигают 59 °C/c. В интервале температур 600...500 °C, в центре шва образца, выполненного на режиме со скоростью сварки 10 м/ч, скорости

охлаждения достигают 16 °C/c, а в ЗТВ – 11 °C/c. В сварном шве и ЗТВ образца, выполненного на режиме № 2 в диапазоне температур 200...100 °C значения скоростей охлаждения составляют меньше 0,01 °C/c. В сварном шве образца, полученного на режиме с большей погонной энергией, в диапазоне температур 50...150 °C фиксируются скорости охлаждения 4,8 °C/c.

Полученные результаты скоростей охлаждения позволяют сделать вывод, что наибольшие скорости охлаждения при высоких температурах (1000 °C и более) зафиксированы на режиме с малой погонной энергией. При понижении температуры (менее 1000 °C) максимальные скорости охлаждения фиксируются в сварном соединении, выполненном с большей погонной энергией. При этом темп изменения скоростей охлаждения на этом режиме также большой (рис. 4).

**Влияние термического цикла при АДС на количество  $\beta$ -фазы в соединениях псевдо- $\beta$ -сплавов титана.** Для прогнозирования фазового состава было определено количество образующейся  $\beta$ -фазы в шве и ЗТВ. Для этого, на режимах № 2 и 4, была проведена сварка экспериментального образца псевдо- $\beta$ -титанового сплава ВТ19 [8]. На полученном сварном соединении по поперечным микрошлифам определяли структуру и количество  $\beta$ -фазы на различных участках, для которых были получены с помощью математического моделирования скорости охлаждения в различных температурных диапазонах (рис. 5).

Количество  $\beta$ -фазы определяли с помощью компьютерной обработки полученных микрошлифов сварного соединения. Определение микроструктуры основано на том, что разные фазы протравливаются и окрашиваются неодинаково. Так,  $\beta$ -фаза имеет светлый цвет,  $\alpha$ -,  $\alpha'$ - и  $\alpha''$  – темный. В результате можно определить форму и размеры отдельных зерен, установить величину, форму и направление зерен, отдельные фазы и структурные составляющие, изменение внутреннего строения металлов и сплавов в зависимости от условий их получения и обработки.

Структуру изучали в середине образца толщиной 6 мм. Расстояние  $L$  (см. рис. 5) – это расстояние от середины шва до исследуемой точки на поперечном микрошлифе сварного соединения.

Основной металл сплава ВТ19 толщиной 6 мм, на котором выполняли ТИГ-сварку, имеет диаметр

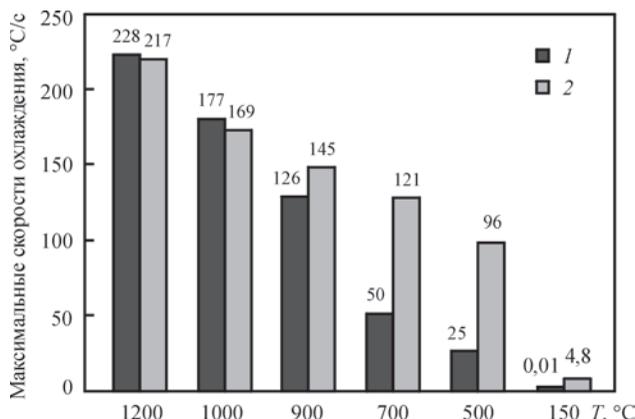


Рис. 4. Значения максимальных скоростей охлаждения при разных температурах: 1 – 310 А, 10 м/ч; 2 – 620 А, 16 м/ч

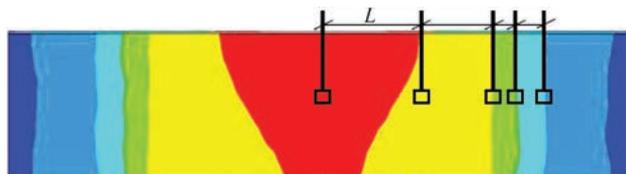


Рис. 5. Схема определения размеров участков максимальных температур в сварном соединении ( $L$  – длина участка).

зерна  $0,05 \dots 0,50$  мм (рис. 6, *a*). В некоторых зернах приповерхностной зоны ОМ наблюдается неравномерное распределение частиц  $\alpha$ -фазы в зерне (рис. 6, *б*). В основном металле в большом количестве присутствует дисперсная  $\alpha$ -фаза, размер  $\alpha$ -частиц составляет  $1 \dots 2$  мкм и меньше. Количество  $\beta$ -фазы в основном металле составляет 31 %.

Металл шва соединения, выполненного ТИГ-сваркой на режиме №2 (см.табл.1), состоит из равноосных и вытянутых в направлении теплоотвода зерен  $\beta$ -фазы, волосовидные границы которых проявляются на фоне дендритной структуры (рис. 7, *a*). Количество  $\beta$ -фазы на этом участке составляет 74 %.

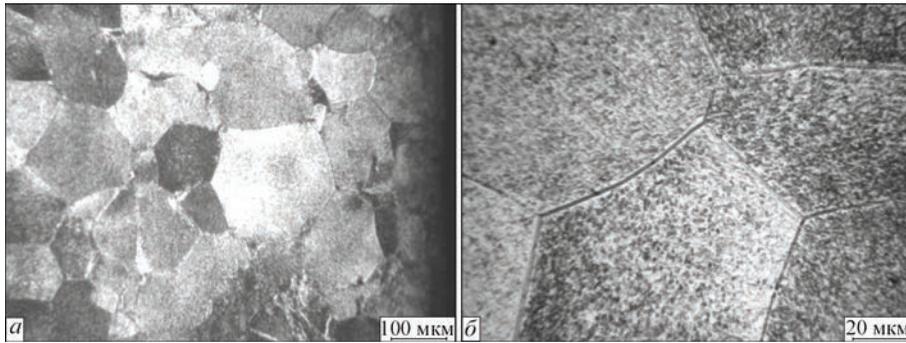


Рис. 6. Микроструктура приповерхностного слоя основного металла ВТ19

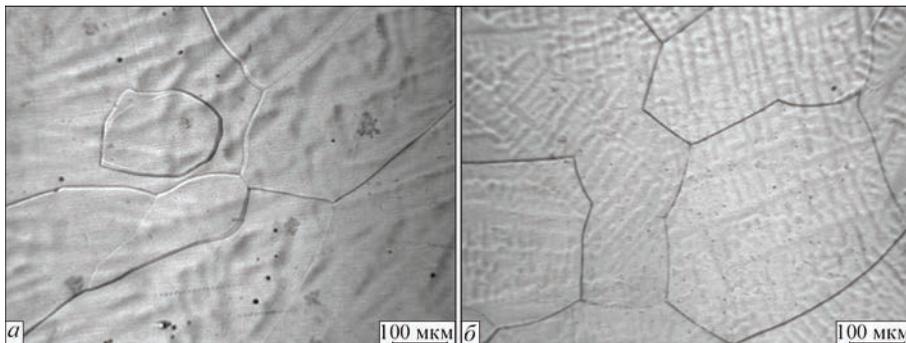


Рис. 7. Микроструктура металла шва сварного соединения псевдо- $\beta$ -титанового сплава ВТ19, выполненного ТИГ-сваркой: *a* – режим № 2; *б* – № 4.

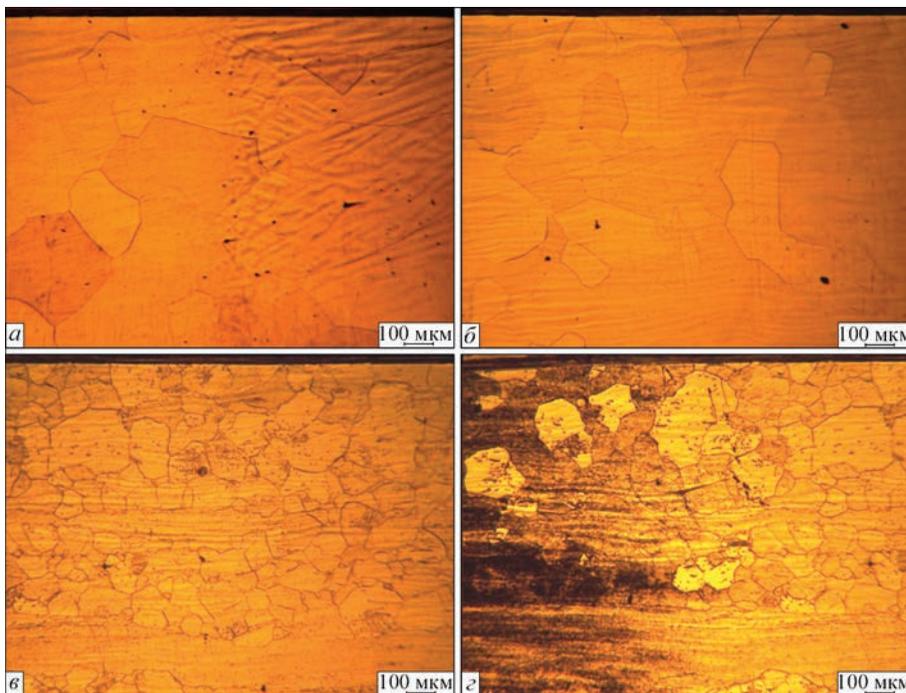


Рис. 8. Микроструктура металла ЗТВ сварного соединения псевдо- $\beta$ -титанового сплава ВТ19, выполненного ТИГ-сваркой без применения присадочной проволоки, режим №1: *a* – зона сплавления; *б* – участок полного полиморфного превращения; *в* – зона неполного полиморфного превращения; *г* – граница между зоной неполного полиморфного превращения и основным металлом

Металл шва и ЗТВ соединения, выполненного ТИГ-сваркой на режиме №4 (см.табл.1), отличаясь параметрами и конфигурацией зон, направлением роста кристаллитов, имеет идентичную микроструктуру, состоящую из зерен  $\beta$ -фазы, соединению, выполненному ТИГ-сваркой на режиме № 2 (рис. 7, б).

Зона сплавления (рис. 8, а) располагается на расстоянии 5,4 мм от оси шва, справа на фото – зерна шва на фоне дендритной структуры, слева – равноосные  $\beta$ -зерна участка ЗТВ у зоны сплавления. Количество  $\beta$ -фазы на этом участке составляет 81 %. Непосредственно в зоне сплавления видно частично оплавленные зерна, принадлежащие одновременно как металлу ЗТВ, так и металлу шва.

Участок ЗТВ, где произошло во время сварки полное полиморфное превращение, состоит из равноосных  $\beta$ -зерен (рис. 8, б), имеет ширину 4,75 мм. Здесь количество  $\beta$ -фазы находится на уровне 80 %.

Участок ЗТВ, где наблюдается неполное полиморфное превращение, имеет ширину 2,5 мм (рис. 8, в), здесь в  $\beta$ -зернах присутствуют частицы других фаз, которые встречаются в основном металле, в частности,  $\alpha$ -фазы. Количество  $\beta$ -фазы – 75 %.

На рис. 8, г показан переход от участка неполного полиморфного превращения ЗТВ к основному металлу. На границе перехода от участка неполного полиморфного превращения к основному металлу

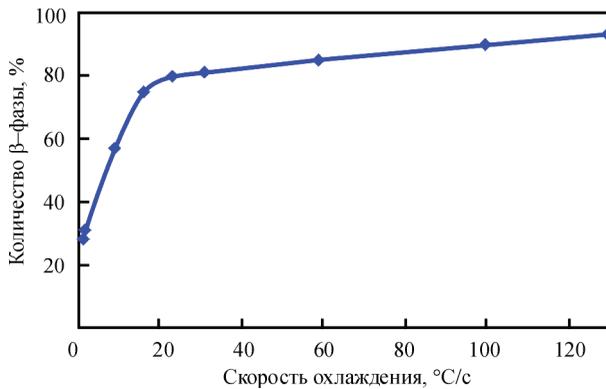


Рис. 9. Зависимость количества  $\beta$ -фазы в металле сварного соединения псевдо- $\beta$ -титанового сплава ВТ19 от максимальных скоростей охлаждения при температуре конца полиморфного превращения (800 °C)

Таблица 2. Количество  $\beta$ -фазы и максимальные значения скоростей охлаждения в разных участках сварного соединения

Параметр	Центр шва	Зона сплавления	Участок полного полиморфного превращения	Участок неполного полиморфного превращения	Граница между зоной неполного полиморфного превращения и основным металлом	Основной металл
Расстояние от середины шва $L$ , мм	0	5,43	7,8	14,5	15,8	17
Количество $\beta$ -фазы, %	74	81	80	75	57	31
Максимальные скорости охлаждения при $T=800$ °C, °C/c	59	31	23	16	9	1,5
Максимальные скорости охлаждения при $T=500$ °C, °C/c	16	11	11	1,5	1,5	1,5

количество  $\beta$ -фазы составляет 57 %. В основном металле количество  $\beta$ -фазы составляет 31 %.

Полученные с помощью математического моделирования расчетные максимальные скорости охлаждения при температурах начала полиморфного превращения  $\beta \rightarrow \alpha$  (810 °C) сопоставили с экспериментально полученными данными о содержании  $\beta$ -фазы в рассмотренных участках сварного соединения, выполненного на режиме № 1 ( $I_{св}=310$  А,  $v_{св}=10$  м/ч), для точек на расстоянии  $L$  от середины шва (табл. 2).

На основании сопоставленных данных получена зависимость количества  $\beta$ -фазы от максимальной скорости охлаждения при температуре начала полиморфного превращения  $\beta \rightarrow \alpha$  (810 °C) в сплаве ВТ19 (рис. 9).

Также, сопоставляя полученные расчетные данные формы металла шва, ЗТВ и основного металла, скоростей охлаждения, и экспериментальные данные количества  $\beta$ -фазы на разных участках сварного соединения, было получено распределение фаз в поперечном сечении сварного соединения, выполненного на режиме №2 (рис. 10) и №4 (рис. 11) (см. табл. 1).

Как видно из полученных результатов, в середине шва после сварки на режиме № 2 образуются преимущественно  $\beta$ -фаза. Метастабильные  $\alpha'$ - и  $\alpha''$ -фазы в сварном соединении отсутствуют. Согласно количественному подсчету распределения фаз в сечении сварного соединения площадь  $\beta$ -фазы составляет 78 мм<sup>2</sup>,  $\alpha$ -фазы – 58 мм<sup>2</sup> (табл. 3).

При сварке на режиме № 4 в центре шва фиксируется  $\beta$ - и метастабильная  $\alpha''$ -фаза (рис. 11). В ЗТВ и основном металле преобладает  $\beta$ -фаза. Это обусловлено большим градиентом скоростей охлаждения в разных диапазонах температур. Площадь  $\beta$ -фазы в сечении сварного соединения составляет 113 мм<sup>2</sup>. Площадь метастабильной  $\alpha''$ -фазы – 23 мм<sup>2</sup> (табл. 3).

**Влияние термического цикла при АДС на механические свойства сварных соединений псевдо- $\beta$ -сплава ВТ19.** Проводились механические испытания основного металла и сварных со-

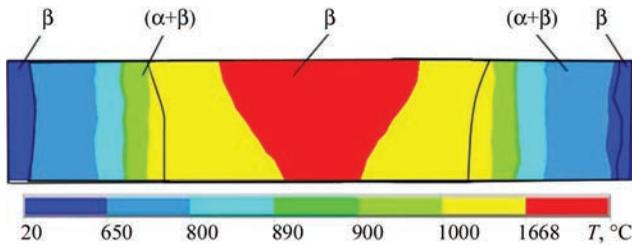


Рис. 10. Распределение фаз в сечении сварного соединения, полученного на следующем режиме:  $I = 310 \text{ A}$ ,  $v_{св} = 10 \text{ м/ч}$ ;

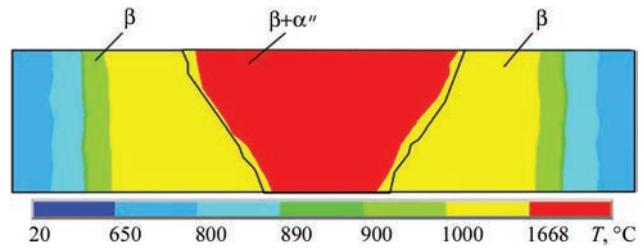


Рис. 11. Результат расчета зоны проплавления при сварке. ( $I = 620 \text{ A}$ ,  $v_{св} = 16 \text{ м/ч}$ );

**Т а б л и ц а 3. Площадь выделения метастабильных фаз в поперечном сечении соединения при АДС псевдо-β-титанового сплава ВТ19**

Номер режима	Параметры режима			Площадь выделения фаз, мм <sup>2</sup>		
	Ток сварки, А	Скорость сварки, м/ч	Погонная энергия, кДж/см	β	α	α''
2	310	10	803	78	58	–
4	620	16	1004	113	–	23

**Т а б л и ц а 4. Количество β-фазы и механические свойства основного металла и сварного соединения псевдо-β-сплава ВТ19**

Участок исследований, номер режима	Количество β-фазы, %	Временное сопротивление разрыву $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Относительное удлинение $\delta_s$ , %	Относительное сужение $\Psi$ , %	Ударная вязкость KCV, Дж/см <sup>2</sup>
ОМ	56	887	958	12	42	22
Шов, режим № 2	74	860	839	13,3	60	19
Шов, режим № 4	98	836	801	12	50	15

единений псевдо-β-сплава ВТ19, выполненных на режимах № 2 и 4. Анализ механических свойств показывает снижение показателей прочности и ударной вязкости в сварном соединении в сравнении с основным металлом (табл. 4). Это объясняется большим содержанием β-фазы в металле шва в сварном соединении. Метастабильная β-фаза имеет низкую прочность и большую пластичность, поэтому сварные соединения имеют низкие показатели прочности. Прочность и ударная вязкость сварного соединения, выполненного на режиме № 4, имеет более низкие показатели, в сравнении с соединением на режиме № 2. Это позволяет сделать вывод, что увеличение погонной энергии и скорости сварки (табл. 3) имеет отрицательное влияние на прочность и ударную вязкость сварных соединений из псевдо-β-титанового сплава ВТ19, а только способствует увеличению содержания β-фазы в металле шва за счет увеличения скоростей охлаждения металла шва по мере остывания образца.

Таким образом, сварные соединения методом АДС неплавящимся электродом титанового сплава ВТ19 целесообразно выполнять на режимах с меньшей погонной энергией и скоростью сварки.

**Выводы**

1. Для изучения тепловых процессов ТИГ-сварки псевдо-β титановых сплавов, методом конечных элементов, построена трехмерная математическая модель, с помощью которой получены тепловые поля в наплавляемом изделии, определено распределение максимальных температур и

скоростей охлаждения в сечении сварных соединений при разной погонной энергии.

2. Установлено, что наибольшие скорости охлаждения при высоких температурах (1000 °C и более) зафиксированы на режиме с малой погонной энергией. При понижении температуры (менее 1000 °C) максимальные скорости охлаждения фиксируются в сварном соединении, выполненном с большей погонной энергией. При этом темп изменения скоростей охлаждения на этом режиме также большой.

3. Высокие скорости охлаждения в диапазоне температур начала и конца полиморфного превращения обуславливают содержание β-фазы в металле шва сварного соединения, выполненного на режиме № 2, на уровне 90 %. Снижение скоростей охлаждения ведет к уменьшению количества β-фазы в металле шва и зоне термического влияния.

4. Полученная зависимость количества β-фазы от скоростей охлаждения позволяет сделать вывод, что наибольший распад β-фазы происходит на границе зоны термического влияния и основного металла, что может привести к образованию метастабильных фаз в этой зоне сварного соединения и ухудшению механических свойств соединения.

5. Механические свойства сварного соединения, выполненного на режиме № 2, ниже аналогичных показателей для основного металла. Это объясняется большим содержанием β-фазы в металле шва в сварном соединении. Метастабильная β-фаза имеет низкую прочность, поэтому сварные соединения имеют низкие показатели прочности.

Сварное соединение, выполненное на режиме №4, имеет более низкие механические свойства, в сравнении с основным металлом и соединением на режиме №2, что объясняется увеличением содержания  $\beta$ -фазы в металле шва за счет увеличения скоростей охлаждения металла по мере остывания образца.

### Литература

1. Анташев В. Г. Н. А., Ширяев, А. А., Изотова А. Ю. (2011) Перспективы разработки новых титановых сплавов. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение*, **SP2**, 60–67
2. Моисеев В. Н. (1998) Бета-титановые сплавы и перспективы их развития. *Металловедение и терм. обработка металлов*, **12**, 11–14.
3. Хорев А. И. (2009) Разработка конструкционных титановых сплавов для изготовления деталей узлов авиакосмической техники. *Сварочное производство*, **3**, 13–23.
4. Гуревич С. М. Куликов Ф. Р., Замков В. Н. и др. (1975) *Сварка высокопрочных титановых сплавов*. М., Машиностроение.
5. Хорев А. И. (2007) Теоретические и практические основы повышения конструкционной прочности современных титановых сплавов. *Технология легких сплавов*, **2**, 144–153.
6. Ахонин С. В., Белоус В. Ю., Мужиченко А. Ф., Селин Р. В. (2013) Математическое моделирование структурных превращений в ЗТВ титанового сплава VT23 при сварке ТИГ. *Автоматическая сварка*, **3**, 26–29.

7. Хорев А. И. (2012) Сверхпрочный титановый сплав VT19. *Технология машиностроения*, **6**, 5–8.
8. Akhonin S.V., Belous V. Y., Berezos V. A., Selin R. V. (2018) Effect of TIG-Welding on the Structure and Mechanical Properties of the Pseudo- $\beta$  Titanium Alloy VT19 Welded Joints, *Materials Science Forum*, 927, pp. 112–118,

### References

1. Antashev, V.G., Nochovnaya, N.A., Shiryayev, A.A. Izotova, A.Yu. (2011) Perspectives of development of new titanium alloys. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Seriya Mashinostroenie*, **SP2**, 60-67 [in Russian].
2. Moiseev, V.N. (1998)  $\beta$ -titanium alloys and perspectives of their development. *MiTOM*, **12**, 11-14 [in Russian].
3. Khorev, A.I. (2009) Development of structural titanium alloys for manufacture of components of aerospace engineering. *Svarochn. Proizvodstvo*, **3**, 13-23 [in Russian].
4. Gurevich, S.M., Kulikov, F.R., Zamkov, V.N. et al. (1975) *Welding of high-strength titanium alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
5. Khorev, A.I. (2007) Theoretical and practical fundamentals for improvement of structural strength of modern titanium alloys. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, **2**, 144-153 [in Russian].
6. Akhonin, S.V., Belous, V.Yu., Muzhichenko, A.F. et al. (2013) Mathematical modeling of structural transformations in HAZ of titanium alloy VT23 during TIG welding. *The Paton Welding J.*, **3**, 24-27.
7. Khorev, A.I. (2012) Titanium superalloy VT19. *Tekhnologiya Mashinostr.*, **6**, 5-8 [in Russian].
8. Akhonin, S.V., Belous, V.Y., Berezos, V.A. Selin, R.V. (2018) Effect of TIG-welding on the structure and mechanical properties of the pseudo- $\beta$  titanium alloy VT19 welded joints. *Mat. Sci. Forum*, Vol. 927, 112-118.

## ВПЛИВ ТЕРМІЧНОГО ЦИКЛУ АРГОНОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ПСЕВДО- $\beta$ -ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

С. В. АХОНІН, В. Ю. БІЛОУС, Р. В. СЕЛІН

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.

03150, г. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Конструкційні псевдо- $\beta$ -титанові сплави знайшли широке застосування у виробках авіа- і ракетобудування. Однак, при отриманні зварних з'єднань псевдо- $\beta$ -сплавів методом зварювання плавленням виникають труднощі, пов'язані зі зміною структури і утворенням метастабільних фаз в зварному з'єднанні. У даній роботі, за допомогою розробленої математичної моделі процесу АДЗ неплавким електродом, досліджено вплив термічного циклу зварювання на форму шва, швидкості охолодження і структуру металу зварного з'єднання з псевдо- $\beta$ -титанового сплаву VT19. Встановлено кількість фаз в металі шва, зоні термічного впливу і основному металі, спрогнозований фазовий склад і його вплив на механічні властивості зварних з'єднань. Бібліогр.8, табл. 4, рис. 11

*Ключові слова:* аргонодугове зварювання, високоміцні титанові сплави, математичне моделювання

## INFLUENCE OF THE THERMAL CYCLE OF TIG-WELDING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF PSEUDO- $\beta$ -TITANIUM ALLOYS

AKHONIN S.V., BELOUS V.Yu., SELIN R.V.

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The structural pseudo- $\beta$ -titanium alloys found a wide application in aircraft and rocket building. However, while producing welded joints of pseudo- $\beta$ -alloys applying method of fusion welding, the difficulties arise connected with change in the structure and formation of metastable phases in welded joint. In this paper, using the developed mathematical model of the TIG-welding process, the influence of thermal welding cycle on the weld shape, cooling rate and structure of welded joint metal of the pseudo- $\beta$ -titanium alloy VT19 was investigated. A number of phases in the weld metal, heat-affected zone and base metal was established, the phase composition and its effect on the mechanical properties of welded joints were predicted.

*Keywords:* argon-arc welding, TIG-welding, high-strength titanium alloys, mathematical modeling

Поступила в редакцію 23.08.2018

## РЕМОНТ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ\*

И. Б. МАРКОВ, И. А. ПЕТРИК, А. Г. СЕЛИВЕРСТОВ, Ю. А. МАРЧЕНКО

АО «МОТОР СИЧ». 69068, г. Запорожье, просп. Моторостроителей, 15. E-mail: motor@motorsich.com

Представлены результаты работ по восстановлению поврежденного участка лопасти вентилятора газотурбинного двигателя путем приварки фрагмента методом электронно-лучевой сварки. Определен предел выносливости  $\sigma_{-1}$  лопаток вентилятора для двигателя Д-36 с тягой  $16 \dots 65 \cdot 10^3$  Н, отремонтированных по данной технологии. Проведено металлографическое исследование лопаток с приваркой фрагмента после усталостных испытаний. Предложены перспективные направления по повышению предела выносливости ремонтных лопаток вентилятора. Библиогр. 8, табл. 2, рис. 9.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, титановый сплав, лопасти вентилятора, приварка фрагмента, термообработка, структура, предел выносливости

Лопатки вентилятора являются одними из наиболее ответственных и нагруженных деталей авиационного двигателя. Лопатки вентилятора имеют высокую стоимость вследствие применения индивидуальных заготовок и длительного цикла механической и термической обработки, полировки и доводки. Поэтому расширение видов ремонта лопаток актуально и экономически целесообразно. Наибольшее число эксплуатационных повреждений лопаток связано именно с попаданием в двигатель посторонних предметов. Следует отметить, что большинство всех повреждений лопаток расположены в надполочной части, по входной кромке. Повреждения рабочих лопаток вентилятора снижают характеристики двигателя, а значительные повреждения вследствие попадания (например, птиц) — влияют на безопасность полетов.

Действующая на предприятии АО «Мотор Сич» ремонтная документация предусматривает определенные нормы величин повреждений, допускаемых без исправления, а также ремонт повреждений такими методами как рихтовка входной кромки, зачистка и заполировка забоин, отрезка поврежденных участков входной кромки суммарной площадью не более  $700 \text{ мм}^2$ . Следует учитывать, что при отрезке кромок снижается тяга двигателя. В случаях, когда повреждения превышают допустимые по ремонтной документации, детали бракуются.

На АО «Мотор Сич» опробована технология ремонта лопаток вентилятора двигателя Д-36 из двухфазного титанового сплава ВТЗ-1 путем приварки фрагмента методом электронно-лучевой

сварки (ЭЛС) вместо поврежденного участка с последующим определением предел выносливости  $\sigma_{-1}$ . Технология построена на базе опыта полученного на нашем предприятии [1], а также с учетом опыта других предприятий по восстановительному ремонту элементов и узлов газотурбинных двигателей [2].

Технологию сварки предварительно отрабатывали на плоских образцах. Сварку образцов выполняли с двух сторон на электронно-лучевой установке ЭЛУ-20, которая оборудована программным управлением параметрами режимов сварки, программным перемещением электронно-лучевой пушки и детали по заданным координатам. После сварки выполнена двухступенчатая термообработка (ТО) образцов, первая ступень отжига электронным лучом (ЭЛО), вторая ступень в печи. Определены механические свойства на сварных и цельных образцах, тип XIII, по ГОСТ 6996-66. На ГП «Ивченко-Прогресс» проведены прочностные расчеты и определены наибольшие действующие напряжения в местах предполагаемого расположения сварных швов. К областям с максимальными напряжениями относятся переход перо – антивибрационная полка и область сочленения пера с основанием замка лопатки. По результатам расчетов определены зона ремонта, расположение сварного шва (рис. 1) и параметры для дальнейшего проведения усталостных испытаний рабочих лопаток вентилятора Д-36 [3]. Для определения  $\sigma_{-1}$  в зоне ремонта для усталостных испытаний были назначены изгибные колебания по четвертой форме.

Разработана оптимальная конфигурация фрагмента (рис. 2) и определены размеры выводных планок (рис. 1, б) с учетом, что при ЭЛС возможно образование подрезов на кромках лопатки, ко-

\*По материалам доклада, представленного на международной конференции «Титан 2018. Производство и применение в Украине», 11–13 июня 2018, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

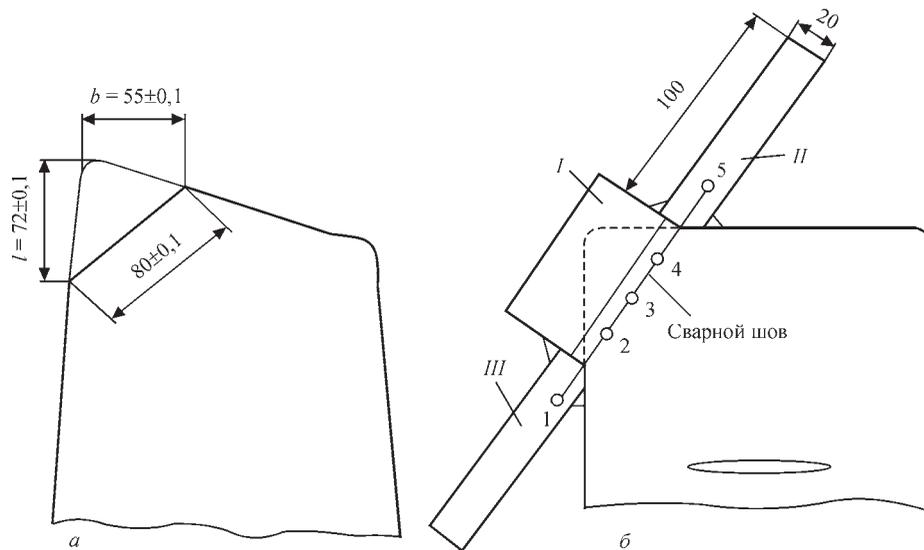


Рис. 1. Схемы расчетных зон ремонта (а) и расположения сварного шва (б): I — фрагмент приварки, II, III — выводные планки; 1–5 — базовые точки разделения шва на отрезки

торая имеет окончательные размеры. Материал фрагмента соответствует основному материалу детали.

Дальнейшая работа проводилась на натурных образцах лопаток. Поврежденные участки лопаток были обрезаны согласно ранее определенных расчетных зон ремонта (рис. 1, а; рис. 3, а).

В зоне приварки фрагмент обработан механическим способом под профиль пера лопатки и подогнан, обеспечивая повторение конфигурации профиля, выдерживая плавность перехода и припуск 0,3 мм по контуру с обеих сторон.

Сварка лопатки с прихваченным фрагментом (рис. 3, б) производилась методом ЭЛС с двух сторон. Сварной шов был разделен на отрезки пятью базовыми точками (рис. 1, б), с корректировкой режимов сварки в зависимости от изменения толщины сечения профиля пера лопатки, от 1,2 до 2,4 мм. Программирование параметров режимов сварки позволило обеспечить качественное формирование сварного шва и избежать образования дефектов в виде прожогов (табл. 1).

После сварки лопаток проведена двухступенчатая ТО (рис. 3, в) по следующему режиму: первая ступень ТО была выполнена ЭЛО на специализированной установке Лага-52 при  $T = 910\text{ }^{\circ}\text{C}$ , выдержка 10 мин. Режимы ЭЛО были подобраны по

аналогии с другими деталями ГТД из двухфазных титановых сплавов и в значительной мере уменьшили коробления [4]. Вторая ступень — печной отжиг — выполнен в защитной атмосфере при  $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 3,0...3,5 ч.

В дальнейшем была выполнена механическая обработка приваренного фрагмента до получения требуемой конфигурации профиля с сохранением исходных размеров (рис. 3, г). Окончательно обработанные лопатки подвержены контролю мест ремонта методом ЛЮМИ-ОВ и рентген-

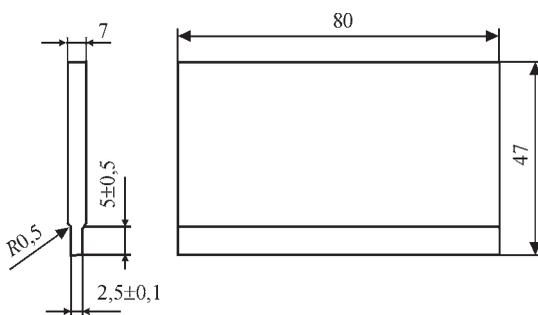


Рис. 2. Конфигурация фрагмента в месте приварки



Рис. 3. Стадии выполнения ремонта лопатки: а — обрезка; б — ЭЛС; в — ТО; г — механическая обработка

Таблица 1. Режимы ЭЛС

Номер прохода	$v_{св}$ , м/ч	$I_{св}$ , МА	$I_{ф}$ , МА	$U$ , кВ	$H$ , мм
Лицевая сторона (корыто); направление по точкам: 1-2-3-4-5					
1	60	14-18-22-22	630	60	220
Обратная сторона (спинка); направление по точкам: 5-4-3-2-1					
2	60	20-18-13-13	630	60	220

контролю. По результатам контроля дефектов не обнаружено.

Проведены усталостные испытания с определением  $\sigma_{-1}$  трех партий натуральных образцов лопаток (рис. 4):

– первая партия в количестве 8 шт. отобранных с разных двигателей, имеющих разную наработку и прошедших ремонт путем приварки фрагмента (сварных) (табл. 2). Разрушение образцов произошло при напряжении 280...340 МПа, отработав  $N = 7,4 \cdot 10^6$  циклов;

– вторая партия в количестве 4 шт. отобранных с одного двигателя, имеющих наработку 3599 ч (цельных). Разрушение образцов произошло при напряжении 280...340 МПа, отработав  $N = 7,4 \cdot 10^6$  циклов;

– третья партия в количестве 6 шт. отобранных с одного двигателя, имеющих наработку 5597 ч (цельных). Разрушение образцов произошло при напряжении 370 МПа, отработав  $N = 7,4 \cdot 10^6$  циклов.

Испытания проводились при комнатной температуре и колебаниях по четвертой изгибной форме (при частоте порядка 1074 Гц), определенной ГП «Ивченко-Прогресс» для распределения наиболее интенсивных напряжений в зону ремонта.

Следует отметить, что из партии лопаток (сварных) были разрушены три образца, два из которых, индивидуальные (инд.) №№ 1502Ф и 1439Ф, имели одинаковую наработку и сняты с одного двигателя, несмотря на то, что разрушение их произошло при разном напряжении испытания (табл. 2). Отрицательное влияние на преждевременное разрушение образцов при испытаниях, вероятно, оказали крупнозернистая структура и дефекты, выявленные в



Рис. 4. Образец для усталостных испытаний

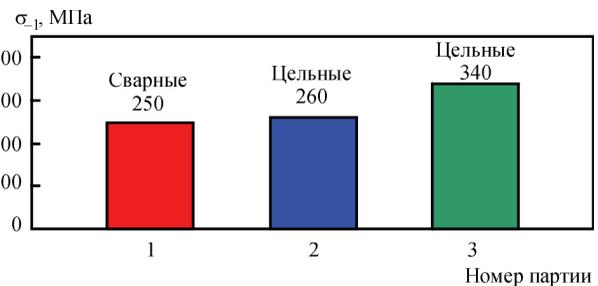


Рис. 5. Предел выносливости трех партий лопаток

сварном шве при металлографических исследованиях. Имеет место снижение  $\sigma_{-1}$  для первой партии лопаток сварных по отношению ко второй партии цельных, которое находится в пределах погрешности и составляет 10 МПа. Разница в  $\sigma_{-1}$  между второй и третьей партиями лопаток (цельных) составляет 80 МПа (рис. 5), что, вероятно, обусловлено неблагоприятным влиянием эксплуатационных факторов. Разрушение как сварных, так и цельных лопаток происходило однотипно, в верхней части кромки пера лопатки.

По результатам испытаний цельных образцов лопаток можно сделать вывод, что количество часов наработки и условия эксплуатации оказывают отрицательное влияние на  $\sigma_{-1}$ . Данный промежуточный этап был проведен с учетом, что данные по  $\sigma_{-1}$  лопаток, прошедших эксплуатацию, могут

Таблица 2. Результаты усталостных испытаний первой партии лопаток (сварных) с разной наработкой

Номер образца	Индивидуальный номер детали (инд.)	Нарботка СНЭ/ППР*, ч	Напряжение испытаний, МПа	Число циклов, $\cdot 10^6$	Примечание
1	815Я	8996/4192	340	0,22	Разрушилась
2	355А	3302/13181	310	20	Не разрушилась
3	1502Ф	3491/17767	310	0,57	Разрушилась
4	297Г	8996/4192	280	20	Не разрушилась
5	1439Ф	3491/17767	280	0,44	Разрушилась
6	431А	5684/17337	250	20	Не разрушилась
7	404Ж	2439	250	20	->-
8	915А	5684/17337	250	20	->-

\* СНЭ — с начала эксплуатации; ППР — после последнего ремонта.



Рис. 6. Структурные изменения после сварки: *а* — участок с укрупненным зерном; *б* — разрушение сварного соединения

быть получены исключительно опытным путем. Для однозначного сравнения  $\sigma_{-1}$  необходимо проведение испытаний лопаток, отремонтированных путем приварки фрагмента, и цельных по серийной технологии с одинаковой наработкой (одного двигателя).

Для повышения эксплуатационных свойств деталей, восстановленных с применением сварки, предложена идея повышения  $\sigma_{-1}$  путем применения методов упрочнения поверхностного пластического деформирования (ППД) [5]. В связи со сложной геометрией и высокими требованиями к качеству поверхности технолог имеет в своем распоряжении очень ограниченную номенклатуру способов ППД [6]. Для возможности решения данной задачи одним из наиболее подходящих является «мягкий» метод упрочнения лопаток стальными шариками в магнитном поле, позволяющий повысить  $\sigma_{-1}$  сварных лопаток до уровня цельных. Предложенный способ упрочнения лопаток позволяет дифференцировано (избирательно), а также с разной интенсивностью обрабатывать отдельные участки пера лопатки [7].

Проведено металлографическое исследование мест разрушения лопаток после испытаний. Разрушение усталостного характера с очагами, расположенными на входной кромке в районе сварно-

го соединения. Трещины развивались по сварному шву с переходом в основной материал лопатки. В изломе лопаток на торце входной кромки выявлено наличие дефектов сварки типа внутренних раковин и микропор, величина которых не превышает допустимые требования для стандартных сварных соединений.

По результатам металлографического исследования лопаток с приваренным фрагментом определено, что воздействие термического цикла сварки и термообработки привело к укрупнению зерна (рис. 6).

Расположение мест разрушения на лопатках находится в среднем на расстоянии 4...5 мм от оси сварного шва, что совпадает с данными, полученными в работе по определению мест разрушения сварных образцов [8].

Исследование микроструктуры проводилось на микроскопе Zeiss Axio Observer при увеличении 50...500 раз. Вид макро- и микроструктуры зоны сварного шва показан на рис. 7, 8.

Материал шва имеет игольчатую структуру с крупными зернами первичной  $\beta$ -фазы (рис. 7, *а*; 8, *а*). В металле ЗТВ микроструктура представлена также крупными зернами  $\beta$ -фазы, с внутризерненным пластинчатым строением с переходом их к глобулярно-пластинчатой форме ( $\alpha+\beta$ )-фазе основного материала (рис. 7, *б-г*; 8, *б-г*). Микроструктура основного металла соответствует второму типу шкалы микроструктур № 1 ОСТ 1 90002-86.

Изломы по вскрытым трещинам лопаток серого оттенка, частично повреждены. По сохранившимся участкам и по макропризнакам — усталостного характера, с очагами, расположенными на входной кромке на расстоянии около 70...72 мм от верхнего торца лопаток в зоне шва ЭЛС с последующим фронтальным развитием от спинки на корыто (рис. 7). Проанализировав строение изломов, следует, что развитие трещин на лопатках

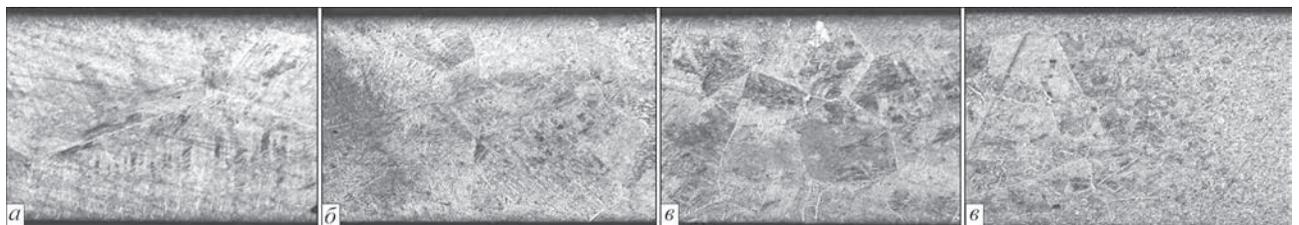


Рис. 7. Макроструктура ( $\times 50$ ) зоны сварного шва лопатки: *а* — сварной шов; *б* — сварной шов + ЗТВ; *в* — ЗТВ; *г* — ЗТВ + основной металл

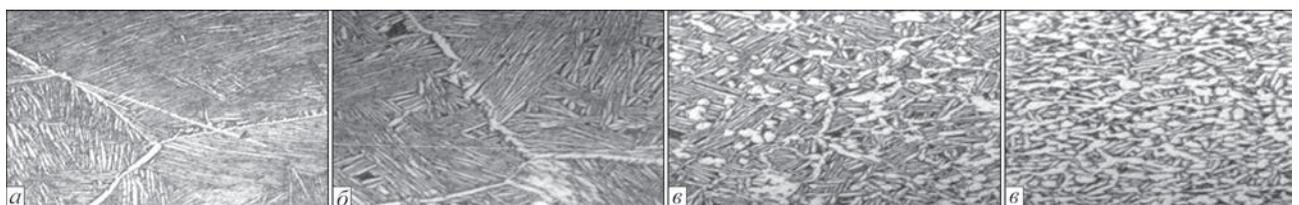


Рис. 8. Микроструктура ( $\times 500$ ) зоны сварного шва лопатки: *а* — сварной шов; *б* — сварной шов + ЗТВ; *в* — ЗТВ; *г* — основной металл

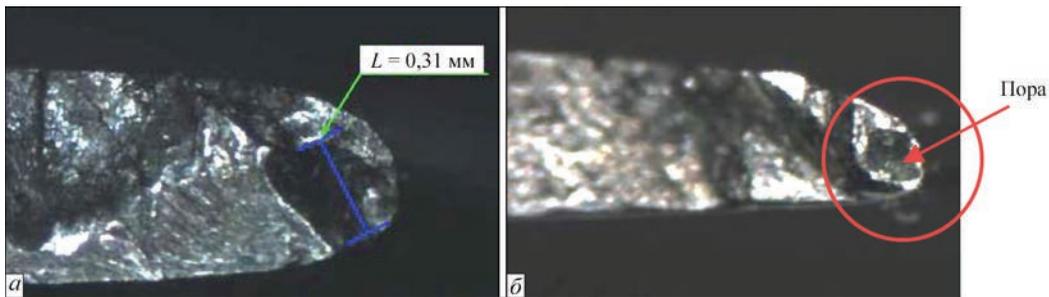


Рис. 9. Дефекты сварки типа внутренних раковин и микропор: а — инд. № 815Я ( $\times 50$ ); б — инд. № 1502Ф ( $\times 32$ )

инд. № № 1502Ф и 1439Ф происходило по сварному шву на длину 7 и 9 мм, соответственно, о чем свидетельствует крупнозернистое строение, с последующим развитием по основному металлу с мелкозернистым строением. На лопатке инд. № 815Я развитие трещины происходило на длину 20 мм по зоне сварки без выхода в основной материал, о чем свидетельствует крупнозернистое строение излома. Следует добавить, что в изломе лопаток (инд. № 815Я, инд. № 1502Ф) на торце входной кромки выявлено наличие дефектов сварки типа внутренних раковин и микропор, величина которых допустима для стандартных сварных соединений (рис. 9).

### Выводы

1. По результатам усталостных испытаний определено снижение  $\sigma_{-1}$  цельных лопаток, имеющих эксплуатационную наработку, что соответствует уровню  $\sigma_{-1}$  сварных лопаток.

2. При испытаниях лопаток с колебаниями по четвертой изгибной форме определено, что разрушение как сварных, так и цельных лопаток происходило однотипно в месте наибольших напряжений, сконцентрированных в верхней части входной кромки пера и совпало с частью траектории сварного шва фрагмента.

3. Траектория сварного шва должна быть расположена вне зоны действия максимальных напряжений. При этом должны быть учтены как четвертая изгибная форма, так и первая.

4. Основными направлениями в повышении  $\sigma_{-1}$  сварных лопаток могут быть:

- устранение микродефектов сварного шва, выявленных при металлографическом исследовании;
- опробование избирательного метода упрочнения стальными шариками в магнитном поле.

5. Учитывая разную наработку и недостаточное количество данных целесообразно продолжить проведение работ по ремонту лопаток вентилятора с последующим определением  $\sigma_{-1}$  лопаток, имеющих одинаковую наработку, снятых с одного двигателя Д-36.

### Список литературы

1. Петрик И. А. (2007) *Процессы восстановления сваркой и пайкой лопаток газотурбинных двигателей из труд-*

*носвариваемых сплавов на основе никеля и титана*: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

2. Нестеренков В. М., Орса Ю. В., Хрипко К. С., Гусев Ю. В. (2017) Восстановительный ремонт элементов и узлов газотурбинных двигателей. *Автоматическая сварка*, **11**, 19–23.
3. Петрик И. А., Овчинников А. В., Басов Ю. Ф. и др. (2006) Повышение работоспособности лопаток из титановых сплавов вентилятора авиадвигателя. *Вестник двигателестроения*, **4**, 104–107.
4. Марченко Ю. А., Петрик И. А., Жеманюк П. Д. (2013) Отработка технологии электронно-лучевого отжига барабанов компрессора из титанового сплава ВТ8. *Промышленность в фокусе*, **4**, 42.
5. Сайдахмедов Р. Х. (2005) *Прогрессивные технологии производства конструкций летательных аппаратов из титановых сплавов*. Ташкент, ТГАИ.
6. Кротинов Н. Б. (2014) Поверхностное пластическое упрочнение лопаток газотурбинных двигателей. *Вестник СГТУ*, **3**, 68–71.
7. Пухальская Г. В., Коваль А. Д., Лоскутов С. В. и др. (2009) Влияние обработки лопаток компрессора шариками в магнитном поле на формирование параметров поверхностного слоя и прочностные характеристики. *Вестник двигателестроения*, **2**, 92–101.
8. Пухальская Г. В., Марков И. Б. (2016) Определение механических свойств в различных зонах сварных соединений из титанового сплава ВТ3. *Там же*, **1**, 89–91.

### References

1. Petrik, I.A. (2007) *Processes of restoration repair by welding and brazing of gas turbine engine blades of difficulty weldable alloys based on nickel and titanium*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree, PWI [in Russian].
2. Nesterenkov, V.M., Orsa, Yu.V., Khripko, K.S. et al. (2017) Restoration repair of elements and units of gas turbine engines. *The Paton Welding J.*, **11**, 13-17.
3. Petrik, I.A., Ovchinnikov, A.V., Basov, Yu.F. et al. (2006) Improvement of operating capacity of titanium alloy blades of aircraft engine fan. *Vestnik Dvigatellestroeniya*, **4**, 104-107 [in Russian].
4. Marchenko, Yu.A., Petrik, I.A., Zhemanyuk, P.D. (2013) Mastering of technology of electron beam annealing of compressor drum from VT8 titanium alloy. *Promyshlennost v Fokuse*, **4**, 42 [in Russian].
5. Sajdakmetov, R.Kh. (2005) *Advanced technologies for manufacture of flying vehicle structures from titanium alloys*. Tashkent, TGA1 [in Russian].
6. Krotinov, N.B. (2014) Surface plastic strain hardening of gas turbine engine blades. *Vestnik SGTU*, **3**, 68-71 [in Russian].
7. Pukhalskaya, G.V., Koval, A.D., Loskutov, S.V. et al. (2009) Effect of treatment of compressor blades by balls in magnetic field on formation of surface layer parameters and strength characteristics. *Vestnik Dvigatellestroeniya*, **2**, 92-101 [in Russian].
8. Pukhalskaya, G.V., Markov, I.B. (2016) Determination of mechanical properties in different zones of welded joints from VT3 titanium alloy. *Ibid.*, **1**, 89-91 [in Russian].

## РЕМОНТ ВЕЛИКОГАБАРИТНЫХ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГУНА

**І. Б. МАРКОВ, І. А. ПЕТРИК, О. Г. СЕЛІВЕРСТОВ, Ю. А. МАРЧЕНКО**

АТ «Мотор Січ». 69068, м. Запоріжжя, просп. Моторобудівників, 15. E-mail: motor@motorsich.com

Представлено результати робіт з відновлення пошкодженої ділянки лопатки вентилятора газотурбінного двигуна, шляхом приварювання фрагмента методом електронно-променевого зварювання. Визначено межу витривалості ( $\sigma_{-1}$ ) лопаток вентилятора для двигуна Д-36 з тягою  $16...65 \cdot 10^3$  Н, відремонтованих за даною технологією. Проведено металографічні дослідження лопаток з приварюванням фрагмента після втомних випробувань. Запропоновано перспективні напрямки з підвищення межі витривалості ремонтних лопаток вентилятора. Бібліогр. 8, табл. 2, рис. 9.

*Ключові слова: електронно-променеве зварювання, титановий сплав, лопатки вентилятора, приварювання фрагмента, термообробка, структура, межа витривалості*

## REPAIR OF LARGE-SIZE BLADES OF FAN OF GAS-TURBINE ENGINE

**I. B. MARKOV, I. A. PETRIK, A. G. SELIVERSTOV, Yu. A. MARCHENKO**

JSC «Motor Sich», 15 Motorostroiteley Ave., Zaporozhye, 69068. E-mail: motor@motorsich.com

Paper presents the results of works on restoration of a damaged area of blade of gas turbine engine fan by means of welding-up of a fragment by electron-beam welding method. An endurance limit ( $\sigma_{-1}$ ) was determined for fan blades of D-36 engine with  $16-65 \cdot 10^3$  N thrust repaired by this technology. Metallographic examination of the blades with fragment welding-up after fatigue tests was carried out. Perspective directions on increase of the endurance limit of repair fan blades were proposed. 8 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

*Keywords: electron beam welding, titanium alloy, fan blades, fragment welding-up, heat treatment, structure, endurance limit*

Поступила в редакцию 22.06.2018

### Новые книги

**Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент:** Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. – 642 с. ISBN 978-617-7015-74-0



Сборник включает 86 статей и докладов сотрудников отдела физики газового разряда и техники плазмы Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, опубликованных за период 1978–2018 гг. В нем обобщен сорокалетний опыт научно-исследовательской деятельности отдела в области теоретического исследования и компьютерного моделирования физических явлений, протекающих при дуговых, плазменных, лазерных и гибридных процессах сварки, наплавки и напыления покрытий. Может быть интересен и полезен ученым, инженерам и технологам, занимающимся проблемами дуговой, плазменной, лазерной и гибридной сварки и обработки материалов, а также аспирантам и студентам, изучающим теоретические основы сварочных и родственных процессов.

**Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд:** Каталог інноваційних пропозицій цільової комплексної програми наукових досліджень «Ресурс». Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2018. – 65 с.



До каталогу інноваційних пропозицій увійшли 62 готових до впровадження нових розробок науковців, виконаних за Цільовою програмою НАН України з урахуванням нагальних потреб економіки держави. Вони виконані для підприємств і організацій сучасних галузей промисловості, будівництва та агропромислового комплексу.

*Заказы на сборник и каталог просьба направлять  
в редакцию журнала «Автоматическая сварка»*

# МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ БРОНЕЗАЩИТЫ (Обзор)

А. А. БАБИНЕЦ<sup>1</sup>, И. А. РЯБЦЕВ<sup>1</sup>, А. И. ПАНФИЛОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ООО «Стил Ворк», 50065, г. Кривой Рог, ул. Соборности, 32. E-mail: a.panfilov@steel-work.net

В работе проанализированы имеющиеся литературные данные о свойствах различных материалов, применяемых в настоящее время в средствах индивидуальной бронезащиты, и проведена оценка способов улучшения их противопульных и других эксплуатационных свойств. Показано, что в настоящее время для создания средств индивидуальной бронезащиты используется множество различных материалов: тканевые арамидные или полиэтиленовые волокна, металлические пластины на основе сталей, титана, алюминия и их сплавов, а также керамики на основе карбидов бора, кремния и др. Показаны основные преимущества и недостатки указанных бронематериалов. На основании литературных данных установлено, что для защиты по 3-5 классу широкое применение нашли бронепластины, выполненные из конструкционных легированных сталей. Для минимизации недостатков, присущих стальным бронепластинам, необходимо использовать биметаллические композиции с чередующимися твердыми и мягкими слоями, полученными, в том числе, методами сварки или наплавки. Библиогр. 20, табл. 4, рис. 3.

*Ключевые слова:* индивидуальная бронезащита, классы защиты, бронепластины, свойства бронематериалов, пулестойкость, броневые стали, композиты, многослойные материалы

В настоящее время для изготовления средств индивидуальной бронезащиты используется широкий спектр материалов, начиная от легкой брони на основе арамидных или полиэтиленовых волокон и заканчивая тяжелыми «панцирями» из различных сталей, сплавов и керамики, предназначенных для защиты человека от самых опасных угроз во время боевых действий [1–6]. Каждый из этих материалов имеет свои преимущества и недостатки, в зависимости от которых может применяться в различных обстоятельствах. Так, в силу своей высокой степени защиты, относительной простоты изготовления и низкой стоимости, широкое распространение нашли бронепластины из различных сталей [7, 8]. Вместе с тем большая масса таких бронепластин, являющаяся результатом увеличения их толщины, негативно сказывается

на маневренности человека, способности выполнять определенные задания, и, тем самым подвергает его большей опасности [9].

Целью работы являлся анализ свойств различных бронематериалов, применяемых в настоящее время в средствах индивидуальной бронезащиты и оценка способов улучшения их противопульных и других эксплуатационных свойств.

Применение бронематериалов регламентировано требованиями специальных стандартов, в частности, в Украине это ДСТУ 4103-2002 «Засоби індивідуального захисту, бронезилети. Загальні технічні умови» [10] (табл. 1). Согласно этим требованиям средства индивидуальной бронезащиты разделяются на три основных класса: мягкие — с защитной структурой на основе специальных тканей; полужесткие — с базовой структурой из

Таблица 1. Характеристика классов защитных структур [10]

Класс защиты	Средство поражения	Тип пули	Масса, г	Скорость, м/с
1	Пистолет ПМ, пуля 9 мм тип 57-Н-181с	Стальная оболочка со стальным сердечником	5,9	315±10
2	Пистолет ТТ, пуля 7,62 мм тип 57-Н-134с	—>—	5,5	430±15
3	Автомат АК-74, пуля 5,45 мм тип 7Н6	—>—	3,4	910±15
	Автомат АКМ, пуля 7,62 мм тип 57-Н-231	—>—	7,9	730±15
4	Автомат АК-74, пуля 5,45 мм тип 7Н10	Стальная оболочка со стальным термопрочным сердечником	3,6	910±15
	Винтовка СВД, пуля 7,62 мм тип 57-Н-323с	Стальная оболочка со стальным сердечником	9,6	850±15
5	Автомат АКМ, пуля БЗ 7,62 мм тип 57-Н-231	Стальная оболочка со стальным термопрочным сердечником	7,4	745±15
6	Винтовка СВД, пуля Б-32 7,62 мм тип 57-Н-323с	—>—	10,4	830±15

Таблица 2. Сравнительные характеристики защиты, выполненной из различных бронематериалов [13]

Тип бронематериала	Уровень защиты по ДСТУ 4103-2002				
	1	2	3	5	6
Сталь и ее сплавы	135/1,7	187/2,4	343/4,4	500/6,4	860/11,0
Титановые сплавы	135/3,0	155/3,5	310/7,0	445/10,0	-
Алюминиевые сплавы	135/5,0	190/7,0	590/22,0	860/32,0	1160/43,0
Керамика на основе корунда	-	-	-	380/19,5	440/35,6

\* В числителе указана поверхностная плотность в г/дм<sup>2</sup>, а в знаменателе — толщина листа в мм.

ткани и дополнительными жесткими защитными элементами и жесткие — на основе жестких защитных и амортизирующих элементов.

Текстильные бронематериалы и бронепанели из полиэтиленовых волокон применяются в мягких средствах индивидуальной защиты 1, 2 классов и выдерживают попадание низкоэнергетических средств поражения, таких как револьверные и пистолетные пули. Для защиты от высокоэнергетических средств поражения с высокой проникающей способностью (3 класс и выше), например, бронебойных винтовочных пуль с термоупрочненными сердечниками, необходимо применять полужесткие и жесткие средства защиты с бронезащитами из металлов, сплавов или керамики [1–6, 11]. При этом масса бронезиловита 3 класса составляет 6...9 кг, 4 класса — 10...12 кг, 5, 6 классов находится в пределах от 11 до 20 кг [7, 9].

Большая масса, как указывалось выше, является одним из основных недостатков стальных бронепластин, поэтому в бронезиловитах 5 и 6 классов начали использовать керамические материалы на основе карбидов бора и кремния [8, 12–14]. Основным преимуществом данного типа материалов является то, что они результативно противостоят пулям бронебойного и высокоскоростного типа, так как скорость образования трещин в керамике меньше по сравнению со скоростью проникновения пули. Это означает, что высокоскоростная пуля тратит большое количество энергии на то, чтобы материал был раздроблен. В процессе дробления керамики пуля начинает распадаться на мелкие элементы, которые потом легко задерживаются арамидной тканью [2].

Однако если в броню из керамики попадают малоскоростные или остроконечные пули, то они ведут себя иначе — раздвигая куски керамики, которая подверглась растрескиванию, такая пуля не теряет энергии, соответственно, она не разрушается и не распадается на несколько осколков. Это может привести к запреградному воздействию пули, то есть к сохранению ее свойств после преодоления бронезащиты. При попадании нескольких пуль в одну и ту же область это ведет к летальному исходу [2, 12]. Иными словами «живучесть» керамической брони, т. е. способность выдержать несколько выстрелов, заметно хуже, чем у металлических аналогов, особенно при по-

падании в стык между отдельными керамическими вставками, а значительная толщина защитной структуры создает большие проблемы конструкторам бронезиловитов и эксплуатационные ограничения для пользователей [13, 14].

Сравнительные характеристики по противопулевой стойкости керамики и традиционной металлической брони представлены в табл. 2 [13]. Из табл. 2 следует, что для обеспечения защиты по 5, 6 классам требуется толщина стального листа 6,5...11,0 мм, а керамической панели — в несколько раз больше.

Одним из способов одновременного обеспечения достаточного уровня защиты и снижения массы бронепластин на 15...30 % является использование легких сплавов на основе алюминия и титана [7, 8, 14]. Одним из их преимуществ является также отсутствие осколков при попадании пули и низкая степень заброневых травм. Тем не менее, эти сплавы дороги, сложны в обработке, и исключают создание бронезиловитов наиболее высоких классов [8]. Таким образом, для защиты по 3-му классу и выше наибольшее применение в настоящее время получили бронепластины, выполненные из конструкционных сталей, обладающие необходимыми механическими свойствами, главными из которых являются твердость, прочность, относительное удлинение и вязкость [1–3, 13]. Основная сложность в создании пулестойкой стали обусловлена необходимостью объединения высоких значений твердости и прочности, которые обеспечивают сопротивление проникновению пули в металл, и достаточного уровня пластичности и вязкости для предотвращения ее хрупкого разрушения [1–3]. Таким образом, хрупкие стали высокой твердости, также как и вязкие пластичные стали невысокой твердости, характеризуются низкой противопулевой стойкостью. Основными легирующими элементами в броневых сталях являются углерод, хром, никель, молибден, кремний [1–3]:

– углерод в первую очередь обеспечивает повышение прочности стали. Вместе с тем углерод в значительной степени снижает стойкость стали против образования кристаллизационных трещин. При содержании углерода менее 0,44 % в сочетании с другими легирующими элементами и их соответствующим взаимным влиянием не удается получить твердость стали более HRC 50,

Таблица 3. Химический состав и механические свойства пулестойких сталей [4]

Марка стали	Номинальный химический состав	Толщина листа, мм	$\sigma_B$ , МПа	Твердость <i>HB</i>
MARS 270	0,35C–0,75Cr–3,10Ni–0,40Mo	< 25	2000	534...601
MARS 300	0,50C–0,80Si–4,0Ni–0,40Mo	≤ 8	2180	578...655
ARMOX 560	0,35C–1,0Mn–1,2Cr–3,0Ni–0,65Mo–0,002B	8...20	1850	534...601
ARMOX 600	0,43C–0,3Mn–0,25Si–0,5Cr–2,0Ni–0,35Mo–0,002B	4...10	2150	570...640
4340 TOD	0,4C–0,3Si–0,6Mn–0,8Cr–1,5Ni–0,2Mo	-	1900	477...514
RAMOR 550	0,36C–0,7Si–1,5Mn–1,5Cr–2,5Ni	3...15	2100	540...600
77Ш	0,35C–1,4Si–1,1Cr–2,4Ni–0,3Mo	-	1900	477...522
Ц85	0,42C–1,5Si–1,1Cr–1,2Ni–0,45Mo	-	2050	485...522
СПС43	0,43C–1,65Si–1,2Cr–1,3Ni–0,45Mo	-	2050	444...552
44C	0,44C–1,1Cr–0,9Ni–0,8Mo	-	2100	560...610
56	0,50C–3,0Cr–1,7Ni–1,95Mo–0,3V	-	2300	570...600

вместе с тем содержание углерода более 0,48 % нецелесообразно;

- хром в основном повышает прочность и прокаливаемость стали, а также способствует некоторому увеличению ее вязкости за счет измельчения аустенитного зерна. Хромистые стали чувствительны к отпускной хрупкости, избежать появления которой можно за счет дополнительного их легирования молибденом;

- никель повышает сопротивление стали хрупкому разрушению, пластичность и вязкость стали, уменьшает чувствительность к концентраторам напряжений и обеспечивает высокое сопротивление хрупкому разрушению, однако недостатком этих сталей является большая чувствительность к отпускной хрупкости. Как и в случае легирования хромом, избежать этого можно за счет дополнительного легирования молибденом;

- молибден препятствует росту зерна аустенита. Его вводят для предотвращения отпускной хрупкости. В то же время молибден, несколько повышая твердость феррита, снижает его ударную вязкость;

- кремний, как и углерод, упрочняет сталь и больше, чем другие легирующие элементы, повышает прочность стали и снижает ее вязкость. В стали должно быть достаточное, но не снижающее стойкости против образования трещин, количество кремния.

Таким образом, чаще всего броневая сталь представляет собой среднеуглеродистую, среднелегированную сталь мартенситного класса ( $\sigma_B$  не менее 1500 МПа, твердость *HB* 360...600). Высокие прочностные характеристики броневых сталей достигаются в результате термообработки, включающей закалку на мартенсит и низкий отпуск [1–5]. При этом по своей структуре такая броня может быть гомогенной, т. е. однородной по твердости и вязкости по сечению, и гетерогенной — имеющей наружный слой более высокой прочности и тыльный вязкий, пластичный слой, который не создает осколков [11]. Твердость наружного слоя таких материалов повышается поверхностной закалкой [1–3]. Типич-

ными представителями броневых сталей, соответствующих указанным требованиям, являются: MARS 240...300 (Франция); ARMOX 400...600 (Швеция); 4340 TOD (США); 44C, 56 (Россия); RAMOR 550 (Финляндия) и др. [4, 6]. Химический состав, а также механические свойства некоторых из указанных сталей приведены в табл. 3. Например, стальной лист 44C толщиной 5,5 мм, имеющий твердость на уровне *HRC* 55...57, обеспечивает защиту от обычных пуль АКМ, АК74 и СВД (3-й класс), а при увеличении толщины листа до 6,5 мм обеспечивается защита от пуль со стальным закаленным сердечником калибра 5,45 мм, что соответствует 4-му классу защиты [1–4]. Для обеспечения более высокого уровня защищенности по 5 и 6 классу толщина листов из стали типа 44C должна быть не меньше 7 и 15 мм, соответственно. При этом пулестойкая сталь марки 56 обеспечивает защиту по 6 классу уже при толщине листа 12 мм (см. рис. 1).

Однако с увеличением толщины стального бронелиста вновь возникает проблема его массы. Кроме того, такие бронепластины не в состоянии спасти человека от заброневоего воздействия пули. Даже в случае непробития бронезилета пуля с мощнейшим запреградным воздействием наносит удар по телу пользователя [12, 15]. Кроме того, бронепластины должны обеспечивать защиту не только от попадания пули, но также от осколков, вызванных

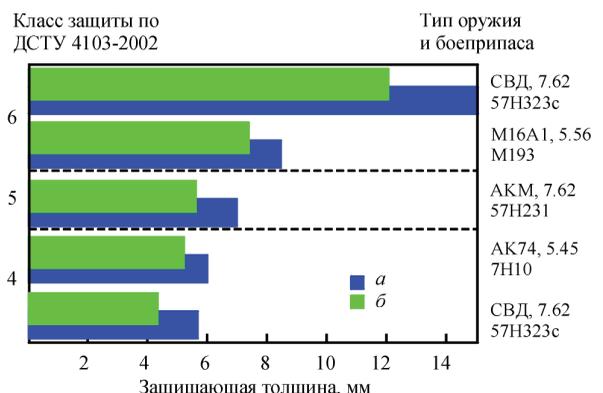


Рис. 1. Сравнение защитных характеристик сталей марок 44C (a) и 56 (б) [2, 3]

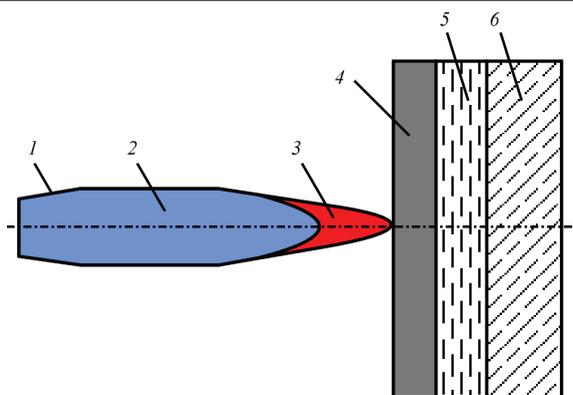


Рис. 2. Схема ударного взаимодействия пули с противопульной защитой: 1 — оболочка пули; 2 — сердечник с оболочкой; 3 — зажигательный состав; 4 — твердый слой бронепластины; 5 — вязкий слой бронепластины; 6 — амортизирующий слой

близким разрывом гранат или снарядов, и разрушения природных и искусственных объектов, а также от удара воздушной волны в результате увеличения (или уменьшения) давления в местах взрывов [16]. Еще одно опасное явление, которому подвержены стальные бронепластины – это рикошет. При взаимодействии пули с защитной пластиной под большими углами от нормали, пуля может срикошетить и нанести поражение незащищенным частям тела, а также окружающим [1–3].

Устранить данные недостатки можно за счет оптимизации свойств материала брони [11] и применения биметаллических композитных бронепанелей [6, 17]. Основной принцип работы такой двухслойной бронеплиты заключается в следующем [5, 14]. Лицевой слой должен разрушить или хотя бы задержать оболочку пули, частично поглотить ее энергию, расплющить или разломать сердечник и распределить его действие на возможно большую площадь. Для этого он должен быть максимально твердым и прочным, а также не допускать проламывания всей пулей целиком. Внутренний слой должен максимально поглотить энергию оставшейся части пули, задержать вторичные осколки и возможные отколы первого слоя и не давать самому вторичных осколков.

Удар пули со стальным сердечником о сталь можно считать соударением тел из двух одинаковых

материалов (рис. 2). Имеются данные [15] о повышенной способности некоторых классов материалов и сплавов к рассеиванию энергии динамических воздействий за период времени, соизмеримый со временем взаимодействия пули с преградой (см. табл. 4).

Как видно из данных табл. 4, низкоуглеродистая сталь Ст3 в меньшей степени снижает броневое действие. Более высокие демпфирующие показатели наблюдаются у комплексно легированных сталей, некоторых титановых и никелевых сплавов и в случае использования биметалла Сталь 25+Х6ВФ [15]. Похожие результаты были получены в работе [6], по данным которой многослойная броня, выполненная из комбинации сталей Ст3 и У12А, показала пулестойкость на уровне специальной броневой стали типа RAMOR 550, и при этом позволила уменьшить массу бронепластин на 20 %.

Вместе с тем серийное производство биметаллической брони на территории СНГ не освоено [1–3], хотя в странах ЕС такая броня используется достаточно широко [11]. Имеются данные [11, 17, 18] о единичных попытках создания биметаллической брони различными способами сварки. Так, в работах [11, 18] при помощи сварки взрывом был получен композит из рессорной стали 65Г и алюминия АД0. Испытания полученных материалов показали, что они могут служить эффективными пластинами для бронезилетов по 5-му классу стойкости.

В работах [7, 17] предлагается повышение баллистических характеристик титановых бронепластин за счет создания высокопрочных интерметаллидных соединений — алюминидов титана. Реализация этой идеи, заключающейся в чередовании слоев высокопрочного интерметаллида с мягкими слоями алюминия, достигается при помощи диффузионной сварки (рис. 3). По мнению авторов, такой подход позволяет исключить хрупкое разрушение титановой бронепластины, а также увеличить площадь, на которую передается импульс при попадании пули, что снижает запреградное воздействие.

Т а б л и ц а 4. Результаты обстрела бронепакетов из различных материалов пулями ПСТ из ПМ [15]

Марка материала	Толщина листа, мм	Характер поражения	Запреградный эффект, %
Ст3	2,4	Сквозное пробитие	6...9
17Х18Н9	2,5	60 % непробитие	0
Сталь 25+Х6ВФ	2,0+0,5	Разрушение/непробитие	0
АД31	4,0	Сквозное пробитие	15
В95	4,5	80 % непробитие	5
АД31+В95	2,0+2,0	Сквозное пробитие	5...6
ВТ9	2,0	Сквозное пробитие	0
ВТ9	3,0	Непробитие	0
ВТ20	2,0	Сквозное пробитие	3...5
ХН77ТЮР	2,0	Непробитие	0

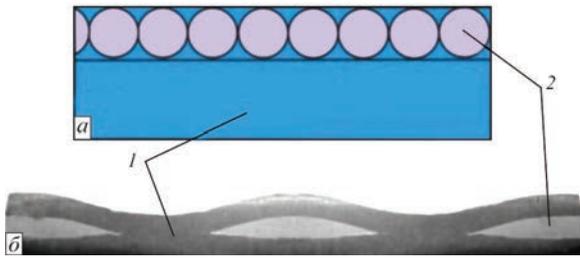


Рис. 3. Вариант компоновки слоев в композитных бронепластинах (а) и макроструктура соединения (б), получаемого сваркой взрывом [7, 17]: 1 — слой Ti; 2 — интерметаллидные включения  $TiAl_3$

Интересными с научной и практической точек зрения являются исследования по применению в качестве наружного слоя биметаллических бронепластин покрытия из углеродных нанотрубок, характеризующихся высоким модулем упругости — около 1,0 ТПа (у стали — 0,21 ТПа) и пределом прочности — до 45 ГПа [1, 19, 20]. Однако на сегодня наноматериалы еще весьма дороги, что затрудняет проведение исследований в этом направлении.

### Выводы

1. Для создания средств индивидуальной бронезащиты разработана широкая гамма различных материалов: тканевых арамидных или полиэтиленовых волокон; металлических пластин из сталей, а также титана, алюминия и их сплавов; керамики на основе карбидов бора, кремния и др. Каждый из этих материалов имеет свои преимущества и недостатки, в зависимости от которых может обеспечивать защиту по 1-6 классу.

2. В силу достаточной надежности, низкой стоимости и универсальности, для защиты по 3-5 классу широкое применение нашли бронепластины, выполненные из конструкционных низколегированных сталей, характеризующихся высокой твердостью, пластичностью и вязкостью.

3. Для снижения массы стальных бронепластин, а также уменьшения вероятности получения запреградных травм и рикошета, предлагается использовать биметаллические пластины с чередующимися твердыми и мягкими слоями, полученные различными способами сварки и наплавки.

### Список литературы

1. Кобылкин И. Ф., Селиванов И. Ф. (2014) *Материалы и структуры легкой бронезащиты*. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана.
2. Гладышев С. А., Григорян В. А. (2010) *Броневые стали*. Москва, Интермент Инжиниринг.
3. Григорян В. А., Кобылкин И. Ф., Маринин В. М., Чистяков Е. Н. (2008) *Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования*. Москва, РадиоСофт.
4. Анастасиади Г. П., Сильников М. В. (2004) *Работоспособность броневых материалов*. Санкт-Петербург, Астерион.

5. Байдак В. И., Блинов О. Ф., Знахурко В. А. и др. (2003) *Концептуальные основы создания средств индивидуальной бронезащиты*. Москва, Вооружение. Политика. Конверсия.
6. Манжура С. А. (2017) Вибір матеріалів бронепластин для індивідуальних засобів бронезахисту сил охорони правопорядку. *Системи озброєння і військова техніка*, **2**, 89–93.
7. Болотов М. Г., Гансеев Т. Р., Новомлинець О. О., Прибытько І. О. (2015) Нові напрямки застосування алюмінідів титану. *Технічні науки та технології*, **2**, 51–55.
8. Новиков В. А. (2015) Бронезилеты: современные материалы и их свойства. *Междун. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова, 1–30 мая, Белгород*, сс. 1443–1446.
9. Горбунов И. М., Харченко Е. Ф., Анискович В. А. (2006) Анализ по научно-техническому уровню разработок современных средств бронезащиты в России и за рубежом. *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России*, **4**, 32–35.
10. ДСТУ 4103-2002 (2002) *Засоби індивідуального захисту, бронезилети, Загальні технічні умови*.
11. Загорянский В. Г. (2015) Обоснование применимости биметалла сталь-алюминий по расчетным критериям противопулевой бронестойкости. *Вісник НТУУ «КПІ». Сер.: Машинобудування*, **3**, 37–41.
12. Гуськов А. В., Милевский К. А., Павлова О. В. (2014) Бронезилет с керамическими бронезементами сотовой конструкции. *Евразийский союз ученых*, **8-8**, 45–46.
13. Мыльников В. В., Абросимов А. А., Романов И. Д., Романов А. Д. (2014) Анализ материалов и их свойств, применяемых для средств индивидуальной бронезащиты. *Успехи современного естествознания*, **9-2**, 143–147.
14. Чернышов Е. А., Мыльников В. В., Мыльникова М. В., Романов А. Д. и др. (2014) Создание металлокерамических элементов баллистической защиты с применением керамики на основе алюминия. *Современные наукоемкие технологии*, **4**, 97–100.
15. Алексенцева С. Е., Захаров И. В. (2011) Влияние демпфирующих свойств сплавов на пулестойкость. *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки*, **4**, 88–95.
16. Radonjic V. M., Jovanovic D. M., Zivanovic G. Z., Resimic B. V. (2014) Ballistic characteristics improving and maintenance of protective ballistic vests. *Vojnotehnicki glasnik*, **62**, **4**, 89–103. DOI: 10.5937/vojtehg62-4992.
17. Крюков Д. Б., Козлов Д. Б. (2016) Перспективы применения металлических композиционных материалов для создания брони нового поколения. *Вестник Пензенского государственного университета*, **2**, 103–108.
18. Драгобецкий В. В., Шаповал А. А., Загорянский В. Г. (2015) Разработка элементов средств индивидуальной защиты нового поколения на основе слоистых металлических композиций. *Изв. вузов. Черная металлургия*, **58**, **1**, 44–48.
19. Morka A., Jackowska B. (2010) Ballistic resistance of the carbon nanotube fibres reinforced composites – numerical study. *Computational materials science*, **50**, **4**, 1244–1249. DOI: 10.1016/j.commatsci.2010.03.046.
20. Курков С. Н., Куканов С. А., Зайцев Ю. М. (2016) Применение наноструктурируемых материалов в защитных композициях средств индивидуальной бронезащиты. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, **3**, 53–59.

### References

1. Kobylkin, I.F., Selivanov, I.F. (2014) *Materials and structure of light armour protection*. Moscow, N.E. Bauman NSTU [in Russian].
2. Gladyshev, S.A., Grigoryan, V.A. (2010) *Armoured steels*. Moscow, Interment Engineering [in Russian].
3. Grigoryan, V.A., Kobylkin, I.F., Marinin, V.M., Chistyakov, E.N. (2008) *Materials and protective structures for local and personal armouring*. Moscow, RadioSoft [in Russian].

4. Anastasiadi, G.P., Silnikov, M.V. (2004) *Operating capability of armour materials*. St.-Petersburg, Asterion [in Russian].
5. Bajdak, V.I., Blinov, O.F., Znakhurko, V.A. et al. (2003) *Concept basics for development of means of personal armour protection*. Moscow, Armouring. Politics. Conversion [in Russian].
6. Manzhura, S.A. (2017) Selection of armoured plate materials for personal means of armour protection of law enforcement forces. *Systemy Ozbroyennya i Vijskova Tekhnika*, **2**, 89-93 [in Ukrainian].
7. Bolotov, M.G., Ganeev, T.R., Novomlynets, O.O., Prybytko, I.O. (2015) New trends of application of titanium aluminides. *Tekhnichni Nauky ta Tekhnologii*, **2**, 51-55 [in Ukrainian].
8. Novikov, V.A. (2015) Flak jacket: Modern materials and their properties. In: *Proc. of Int. Sci.-Techn. Conf. of Young Scientists of V.G. Shukhov BSTU (1-30 May, Belgorod)*, pp. 1443-1446.
9. Gorbunov, I.M., Kharchenko, E.F., Aniskovich, V.A. (2006) Analysis on scientific and technical level of development of modern armour protection means in Russia and abroad. *Oboronny Kompleks – Nauchno-Tekhnicheskomu Progressu Rossii*, **4**, 32-35 [in Russian].
10. (2002) DSTU 4103-2002: *Means of personal protection, flak jacket. General specifications* [in Ukrainian].
11. Zagoryansky, V.G. (2015) Substantiation for application of steel-aluminium bimetal on calculation criteria of bulletproof armour. *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Mashynobuduvannya*, **3**, 37-41 [in Ukrainian].
12. Guskov, A.V., Milevsky, K.A., Pavlova, O.V. (2014) Flak jacket with ceramic armour elements of honeycomb structure. *Evrazijsky Soyuz Uchyonykh*, **8-8**, 45-46 [in Russian].
13. Mylnikov, V.V., Abrosimov, A.A., Romanov, I.D., Romanov, A.D. (2014) Analysis of materials and their properties, applied for means of personal armour protection. *Uspekhy Sovremennogo Estestvoznaniya*, **9-2**, 143-147 [in Russian].
14. Chernyshov, E.A., Mylnikov, V.V., Mylnikova, M.V., Romanov, A.D. et al. (2014) Development of metal-ceramic elements of ballistic protection using aluminium-based ceramics. *Sovremennye Naukoyomkie Tekhnologii*, **4**, 97-100 [in Russian].
15. Aleksentseva, S.E., Zakharov, I.V. (2011) Effect of damping properties of alloys on bulletproofness. *Vestnik Samar. STU. Seriya: Tekhnicheskie Nauki*, **4**, 88-95 [in Russian].
16. Radonjic, V.M., Jovanovic, D.M., Zivanovic, G.Z., Resimic, B.V. (2014) Ballistic characteristics improving and maintenance of protective ballistic vests. *Vojnotehnicki glasnik*, **62** (Is. 4), 89-103. DOI: 10.5937/vojtehg62-4992.
17. Kryukov, D.B., Kozlov, D.B. (2016) Perspectives of application of metal composite materials for development of armoured of new generation. *Vestnik Penzenskogo Gos. Unta*, **2**, 103-108 [in Russian].
18. Dragobetsky, V.V., Shapoval, A.A., Zagoryansky, V.G. (2015) Development of elements of personal protection means of new generation based on laminated metallic compositions. *Izv. Vuzov, Chyorn. Metallurgiya*, **58**, **1**, 44-48 [in Russian].
19. Morka, A., Jackowska, B. (2010) Ballistic resistance of the carbon nanotube fibres reinforced composites – numerical study. *Comput. Mater. Sci.*, **50**(4), 1244-1249. DOI: 10.1016/j.commatsci.2010.03.046.
20. Kurkov, S.N., Kukanov, S.A., Zajtsev, Yu.M. (2016) Application of nanostructured materials in protective compositions of personal armour means. *Izv. Tul'skogo Gos. Un-ta. Tekhnicheskie Nauki*, **3**, 53-59 [in Russian].

## МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО БРОНЕЗАХИСТУ (ОГЛЯД)

А. А. БАБІНЕЦЬ<sup>1</sup>, І. О. РЯБЦЕВ<sup>1</sup>, А. І. ПАНФІЛОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ТОВ «Стіл Ворк», 50065, м. Кривий Ріг, вул. Соборності, 32. E-mail: a.panfilov@steel-work.net

В роботі проаналізовано наявні літературні дані про властивості різних матеріалів, що застосовуються в даний час в засобах індивідуального бронезахисту, та проведена оцінка способів поліпшення їх протипульних та інших експлуатаційних властивостей. Показано, що в даний час для створення засобів індивідуального бронезахисту використовується безліч різних матеріалів: тканинні арамідні або поліетиленові волокна, металеві пластини на основі сталей, титану, алюмінію та їх сплавів, а також кераміки на основі карбідів бору, кремнію та ін. Показано основні переваги і недоліки зазначених бронематеріалів. На підставі літературних даних встановлено, що для захисту по 3-5 класу широке застосування знайшли бронепластини, виконані з конструкційних легованих сталей. Для мінімізації недоліків, властивих сталевим бронепластинам, необхідно використовувати біметалеві композиції, в яких змінюються тверді і м'які шари, що отримані, в тому числі, методами зварювання або наплавлення. Бібліогр. 20, табл. 4, рис. 3.

*Ключові слова*: індивідуальний бронезахист, класи захисту, бронепластини, властивості бронематеріалів, пулестійкість, броньові сталі, композити, багатощарові матеріали

## MATERIALS FOR INDIVIDUAL ARMOR PROTECTION (REVIEW)

A.A. BABINETS<sup>1</sup>, I.A. RYABTSEV<sup>1</sup>, A.I. PANFILOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>OJSC «Steel Wrok», Kryvyi Rih, Ukraine. E-mail: a.panfilov@steel-work.net

The paper analyzes the available literature data on the properties of different materials currently used in the means of individual armor protection and the methods for improving their bulletproof and other service properties are evaluated. It is shown that at the present time to create the means of individual armor protection, a variety of materials are used: fabric aramid or polyethylene fibers, metal plates based on steels, titanium, aluminum and their alloys, as well as ceramics based on boron and silicon carbides, etc. The main advantages and disadvantages of these armored materials are shown. On the basis of literary data, it was established that for the 3-5 class of protection, the armored plates of structural alloyed steels were widely used. To minimize the disadvantages inherent in steel armored plates, it is necessary to use bimetallic compositions with alternating hard and soft layers, produced, among others, by welding or surfacing methods. 20 Ref., 4 Tab., 3 Fig.

*Key words*: individual armor protection, classes of protection, properties of armored materials, bulletproof, armor steels, composites, multilayer materials

Поступила в редакцію 19.06.2018

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДУКЦИИ УПРАВЛЯЮЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗОНЕ ВАННЫ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

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

<sup>1</sup>ГВУЗ «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

Показано, что в настоящее время имеются расчетные методики, позволяющие определить индукцию в зоне сварочной ванны, которую генерируют двухстержневые устройства ввода поперечного магнитного поля при дуговой сварке. Однако эти методики чрезвычайно сложны в использовании. В настоящей работе предложена расчетная методика определения численных значений компонент индукции поперечного магнитного поля в зоне сварочной ванны. Методика основана на использовании экспериментальных данных о величине индукции, генерируемой устройством ввода поперечного магнитного поля в зоне сварочной ванны при различной величине сечений стержней этих устройств ввода. Предложены расчетные выражения и алгоритм их использования для определения компонент индукции магнитного поля в указанной зоне. Показана удовлетворительная сходимость расчетных данных с экспериментальными. Методика рекомендуется для использования при дуговой наплавке и сварке изделий из материалов, не являющихся ферромагнетиками. Библиогр. 8, рис. 6.

*Ключевые слова:* поперечное магнитное поле, индукция, ферромагнетик, сварочная ванна

Воздействие поперечного магнитного поля (ПОМП) при автоматической электродуговой сварке и наплавке под флюсом позволяет управлять гидродинамикой жидкого металла в ванне, геометрией шва (валика), повысить коэффициент расплавления электрода и измельчить структуру шва наплавленного металла [1–4].

В настоящее время нет простых методик для расчета компонент индукции в зоне сварочной ванны, которые генерируют устройства ввода (УВ) ПОМП. Известные расчетные методики, пригодные для этих целей [5–7], характеризуются чрезмерной сложностью. В работе [8] для аналогичных целей предложена также расчетная методика. Однако следует отметить, что эти методики не позволяют получить численные значения индукции под стержнями для различных конструктивных параметров УВ ПОМП. Необходима разработка такой расчетной методики определения компонент индукции, генерируемой УВ ПОМП, которая позволяет учитывать изменение таких параметров, как расстояние между торцами стержней и обмотками, размеры сечения стержней и количество ампервитков ( $IW$ ) и не отличалась бы чрезмерной сложностью. Разработка такой расчетной методики значительно упростит задачу оптимизации проектируемого УВ ПОМП.

Целью настоящей работы является разработка оценочной методики расчета численных значений компонент индукции, генерируемых УВ ПОМП, в

зоне ванны применительно к дуговой сварке и наплавке, позволяющей быстро и с достаточной для практики точностью определять значения данных параметров.

Для реализации этой цели выполняли следующие исследования. Наиболее простой представляется конструкция устройства УВ ПОМП в виде двух стержней из ферромагнитной стали с обмотками на каждом стержне. На рис. 1 приведены схема устройства УВ ПОМП и конструкция одного из стержней этого устройства. Основные параметры и размеры УВ ПОМП на рис. 1, *a*:  $a$  — расстояние между стержнями  $A$  и  $B$  у их нижних торцов;  $h$  — расстояние от торцов стержней до изделия;  $H$  — расстояние от катушки до нижнего торца стержня. Ось электродной проволоки совпадает с осью  $O_1Z_1$ . На рис. 1, *б* приведены размеры:  $b$  — ширина стержня;  $c$  — толщина стержня;  $L_c$  — длина стержня;  $L$  — высота обмотки;  $H$  — расстояние от торца стержня до обмотки. Возможной была регулировка расстояния  $H$  от торца стержня до обмотки. Обмотки на стержнях  $A$  и  $B$  соединяли последовательно таким образом, чтобы нижние торцы стержней  $A$  и  $B$  имели разные полюса —  $N$  и  $S$  (рис. 1, *a*).

Для оптимизации УВ ПОМП необходимо установление таких его параметров (по рис. 1, *a*), которые обеспечивали бы максимальный уровень компоненты индукции  $B_x$  между стержнями  $A$  и  $B$  вдоль оси  $OX$  при минимальном уровне продольной компоненты индукции  $B_z$ .

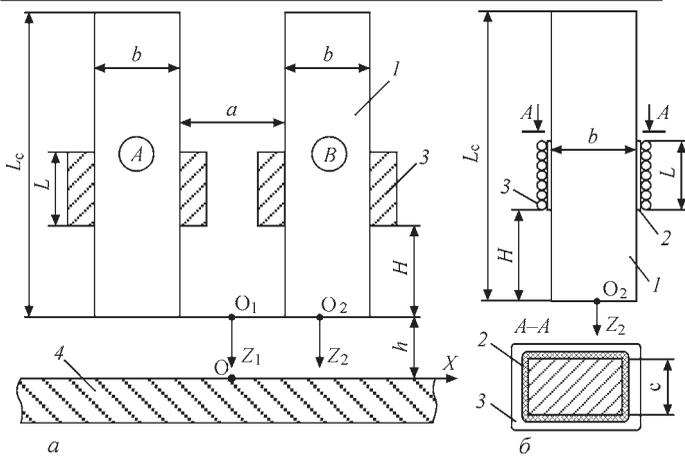


Рис. 1. Устройство ввода ПОМП с двумя стержнями (а) и конструкция стержня с обмоткой (б): 1 — стержень; 2 — изолятор; 3 — обмотка; 4 — изделие

Изготавливали стержни в виде набора из пластин электротехнической стали 1512 (Э42) толщиной 0,5 мм и сечением  $F_c = 26 \times 16$  мм, на которых размещали четырехслойные обмотки из медного провода диаметром 1,0 мм высотой  $L = 30$  мм с количеством витков  $W = 100$ . Были изготовлены также стержни сечением  $26 \times 8$  мм,  $26 \times 32$  мм,  $32 \times 52$  мм и, соответственно, с обмотками высотой  $L = 30$  мм (эти обмотки могли перемещаться вдоль стержней, чтобы изменять расстояние  $H$ ). В обмотках пропускали постоянный ток  $I_k = 16$  А. Измерения индукции  $B$  выполняли универсальным тесламетром типа 43205 с датчиком Холла, имевшим измерительную базу  $0,9 \times 0,9$  мм.

Сначала исследовали особенности строения магнитного поля (индукции) для одного стержня. Установлено, что относительные значения индукции  $B_z/B_{z\max}$  распределены вдоль оси  $O_2Z_2$  по одной и той же зависимости при изменении  $H$  в пределах  $H = 0 \dots 60$  мм, т.е. от параметра  $H$  значение параметра  $B_z/B_{z\max}$  под стержнем практически не зависит. Таким образом, при  $H = 0$  обмотка своим полем рассеяния не влияет на результирующее

поле. Генерируемое поле полностью определяется намагниченностью стержня.

Была установлена зависимость  $B_z/B_{z\max}$  от расстояния от торца стержня до рассматриваемой точки —  $z$ . Следует отметить, что максимальное значение компоненты индукции  $B_{z\max}$  наблюдается у торцов стержня УВ ПОМП. Стержни УВ ПОМП обычно имеют прямоугольное сечение. Для упрощения расчетов прямоугольное сечение стержней условно заменено на круглое сечение. При этом вычисляли эквивалентный радиус витка  $r$  по формуле  $r^2 = F_c/\pi$ , который условно располагали в плоскости торца стержня ( $z = 0$ ). Вычисляли значения  $B_z/B_{z\max}$  при изменении  $z$  (от значения  $z = 0$ ) по формуле:

$$B_z / B_{z\max} = \frac{r^2}{(r^2 + z^2)^n}, \quad (1)$$

где  $n$  — показатель степени.

Экспериментальные данные удовлетворительно совпали с расчетными данными, вычисленными по формуле (1), если показатель степени  $n = 1$  для всех использованных сечений стержней, т.е.  $26 \times 8$  мм,  $26 \times 16$  мм,  $26 \times 32$  мм и  $32 \times 52$  мм ( $I_k = 16$  А,  $H = 35$  мм,  $W = 100$ ).

Относительные значения индукций  $B_z/B_{z\max}$  под стержнями (вдоль оси  $O_2Z_2$  по рис. 1, а), полученные путем обработки экспериментальных данных, приведены на рис. 2. Здесь показано, что значения  $B_z/B_{z\max}$  практически не зависят от параметра  $a$  (кривые 1...4) и близки к значениям (кривая 5), когда расчет выполняется по формуле (1).

Измерением индукции  $B_z$  у торцов стержней и изменении расстояния  $H$  от торца стержня до обмотки установлено, что при увеличении  $H$  индукция  $B_z$  уменьшается (при одинаковых значениях  $I_k = 16$  А,  $W = 100$ ).

Индукция  $B_z$  у торцов стержней подчиняется зависимости

$$\frac{B_{z2\max}}{B_{z1\max}} = \frac{1}{(1 + 0,04H_2^2)}, \quad (2)$$

где  $H_2$  — принятое в расчетах значение размера  $H$ , м.

При вычислениях по формуле (2) изначально следует принять значение  $H_1 = 0$ , при котором наблюдается значение  $B_{z1\max}$ . Если расстояние  $H_2$  будет отличаться от принятого  $H_1 = 0$  (обычно на практике  $H_2 > H_1$ ), то необходимо определить значение  $B_{z2\max}$  по формуле (2), подставив в нее значение  $H_2$ . Эти значения  $B_{z2\max}$  будут наблюдаться при данных значениях  $H_2$ .

Если изменить значение  $IW$  до  $I_2W_2 > I_1W_1$  (либо  $I_2W_2 < I_1W_1$ ), то необходимо изменить

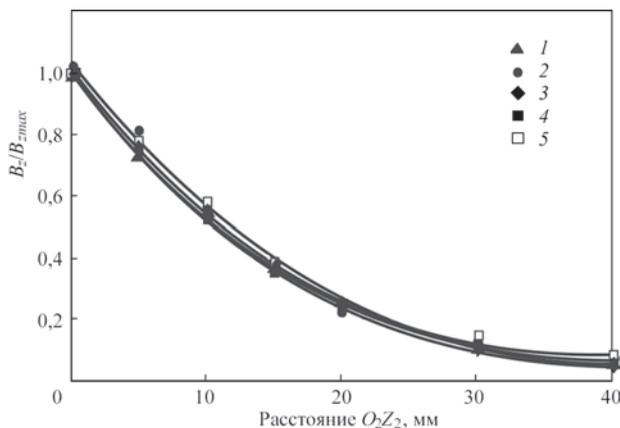


Рис. 2. Распределение значений  $B_z/B_{z\max}$  вдоль оси  $O_2Z_2$  в зависимости от параметра  $a$ : 1 —  $a = 20$  мм; 2 — 40; 3 — 60; 4 — 13; 5 — расчет  $B_z/B_{z\max}$  по формуле (1)

$B_{z \max}$  пропорционально изменению  $IW$  (увеличить, либо уменьшить), чтобы получить новое значение  $B_{z \max}$ , соответствующее новому принятому значению  $IW$  (изначально принято, что  $IW = 1600$ ).

Экспериментально установлено, что абсолютные значения  $B_{x \max}$  в точке  $O_1$  на оси  $O_1Z_1$  (рис. 1, а) зависят от параметра  $a$ , как это показано на рис. 2. Следует отметить, что данные о  $B_{x \max}$  (в мТл), приведенные на рис. 2, являются исходными для дальнейших расчетов значений  $B_x$  в точках на оси  $O_1Z_1$ . Значения  $B_{x \max}$  относятся к случаю, когда  $IW = 1600$ ,  $H_1 = 0$ , а стержни имеют сечение  $F_c = 26 \times 16$  мм ( $F_c = 416$  мм<sup>2</sup>). При расчете других абсолютных значений  $B_x$  в точке  $O_1$  на оси  $O_1Z_1$  (рис. 1, а) при других значениях  $F_c$ ,  $H$ ,  $IW$ , которые обозначим через  $F_{c2}$ ,  $H_2$ ,  $(IW)_2$ , расчет выполняется в порядке, изложенном выше для определения значений индукции  $B_z$  в точках на оси  $O_2Z_2$  по формуле (1). Путем обработки экспериментальных данных об индукции  $B_x$  установлено, что в пределах  $a \leq 20$  мм формула (1) со значением  $n = 1,0$  подходит для определения  $B_x/B_{x \max}$ . Если  $a > 20$  мм, то для определения  $B_x/B_{x \max}$  необходимо использовать эту формулу, изменив в ней показатели степени  $n$ :

- для  $a = 40$  мм:  $n = 0,8$ ;
- для  $a = 60$  мм:  $n = 0,5$ .

Для промежуточных значений параметра  $a$  в пределах  $a = 20 \dots 40$  мм необходимо применять промежуточные значения показателя степени  $n$  в знаменателе формулы (1)  $n = 1,0 \dots 0,8$ , и аналогично для  $a = 40 \dots 60$  мм:  $n = 0,8 \dots 0,5$ . Для удобства их использования при расчетах приведем дополнительно и численные их значения в точке  $O_1$  на оси  $O_1Z_1$  для  $IW = 1600$ :

- $a = 13$  мм:  $B_{x \max} = 121$  мТл;
- $a = 20$  мм:  $B_{x \max} = 99,9$  мТл;
- $a = 40$  мм:  $B_{x \max} = 37,6$  мТл;
- $a = 60$  мм:  $B_{x \max} = 18,5$  мТл.

Проверка показала, что по разработанной методике возможно определить численные значения компонент индукций  $B_z$  и  $B_x$  соответственно вдоль осей  $O_2Z_2$  и  $O_1Z_1$  (см. рис. 1) при различных значениях параметров  $F_c$ ;  $a$ ;  $IW$ ;  $H$ . В качестве исходных (как отмечалось) были приняты следующие параметры:  $F_c = 26 \times 16$  мм ( $F_c = 416$  мм<sup>2</sup>);  $IW = 1600$ ;  $H = 0$ . Следует отметить, что у поверхности пластины (сварочной ванны) при расчете компоненты индукции  $B_x$  по формуле (1) необходимо принять значение  $z = h$  (см. рис. 1, а).

Для реализации предлагаемой методики целесообразно знать значения индукции  $B_z$  у торцов стержней УВ ПОМП (и когда катушки размещены вблизи торцов стержней, т. е., когда  $H = 0$ ) в зависимости от сечения стержней и числа ампер-

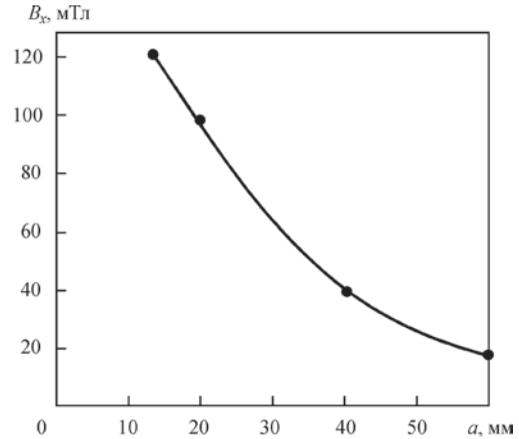


Рис. 3. Зависимость компоненты индукции  $B_x$  от параметра  $a$  витков размещенных на них обмоток. Для этих целей возможно использовать следующий расчетный метод.

Индукция на продольной оси соленоида длиной  $L$  (без ферросердечника внутри его) в точке  $A$ , которая расположена у его торца (рис. 4) [6]:

$$B_z = \mu_0 \frac{IW}{2L} \cos \alpha, \quad (3)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $IW$  — число ампервитков в соленоиде;

$$\cos \alpha = \frac{L}{\sqrt{R^2 + L^2}}. \quad (4)$$

Здесь  $R$  — эквивалентный радиус «окна» катушки (соленоида):

$$R = \sqrt{\frac{F_c}{\pi}}, \quad (5)$$

где  $F_c$  — сечение стержня.

На рис. 5 приведены расчетные значения (кривая 2) индукции  $B_z$  у торцов катушек, освобожденных от стержней различного сечения ( $F_c$ ). Расчетные и экспериментальные (кривая 1) значения  $B_z$  близки и не зависят от величины сечения «окна» катушек и могут быть использованы для расчетов. Экспериментальные значения  $B_z$  у торцов стержней (с катушками, когда  $H = 0$ ) значительно больше, чем у катушек (соленоидов) без стержней (кривая 3 на рис. 5) и при увеличении  $F_c$  линейно уменьшаются по зависимости (для  $IW = 1600$ ):

$$B_z = 90 - 2,37(F_c - 2,08). \quad (6)$$

Для расчетов можно использовать коэффициент  $n$ , учитывающий наличие ферромагнитного стержня в (соленоиде) катушке:

$$n = \frac{B_{z \max}}{B_z}, \quad (7)$$

где  $B_{z \max}$  — индукция у торца стержня, мТл.

Коэффициент  $n$  линейно уменьшается при увеличении сечения стержня  $F_c$ . Эта зависимость соответствует формуле (рис. 6):

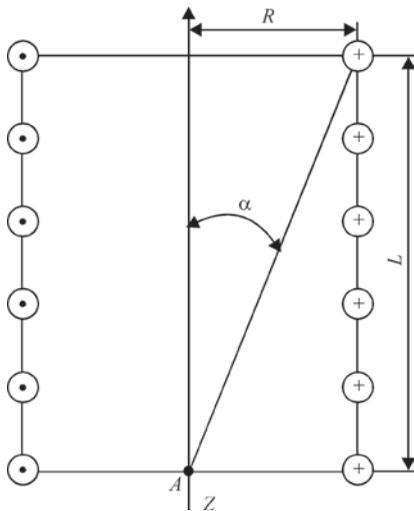


Рис. 4. Схема к расчету индукции  $B_z$  в точке  $A$  на оси  $Z$ :  $R$  — радиус витков соленоида;  $L$  — длина соленоида

$$n = 3,75 - 0,0912(F_c - 2,08). \quad (8)$$

Значения коэффициента  $n$  не изменились для стержней из набора листов электротехнической стали 1512 (Э42) и сплошного сечения из сталей ВМСтЗсп и 09Г2С (при равной намагничивающей силе обмоток  $IW$ ). Значения коэффициента  $n$  не изменились также при пропускании в катушках постоянного, либо переменного тока частотой 50 Гц и при изменении таких параметров в пределах: ампервитков 800...3200; размера  $H = 0...70$  мм; размера  $h = 15...50$  мм.

Разработанная расчетная методика определения компонент индукции может быть рекомендована не только для оптимизации конструкции УВ ПОМП, состоящей из стержней прямоугольного сечения, но и для стержней цилиндрической формы. Следует также отметить, что разработанная расчетная методика определения значений компонент индукции  $B_x$ ,  $B_z$  значительно ускоряет определение оптимальных размеров элементов конструкции УВ ПОМП (размеров стержней в сечении, расстояния между стержнями). Методика относится к варианту, когда основной металл (пластина) не является ферромагнетиком. Предлагаемый метод позволяет определить численные значения индукции  $B_x$  в точках на оси  $O_1Z_1$  и индукции  $B_z$  в точках на оси  $O_2Z_2$ .

Расчеты индукций целесообразно выполнять в такой последовательности. Сначала использовать формулы (3)–(5) и рис. 4 и затем — формулы (7), (8). После этого учитываются реальные значения  $H$  и  $h$  и выполняются расчеты численных значений индукций  $B_x$  в точках на оси  $O_1Z_1$  и индукции  $B_z$  в точках на оси  $O_2Z_2$ , используя формулы (1) и (2), и что у поверхности изделия — пластины  $z = h$ .

Характер изменения относительных значений компонент индукций  $B_x/B_{x\max}$  и  $B_z/B_{z\max}$  вдоль оси  $OX$  (рис. 1, а) соответствует установленному ранее в работе [8]. Используя данные этой работы

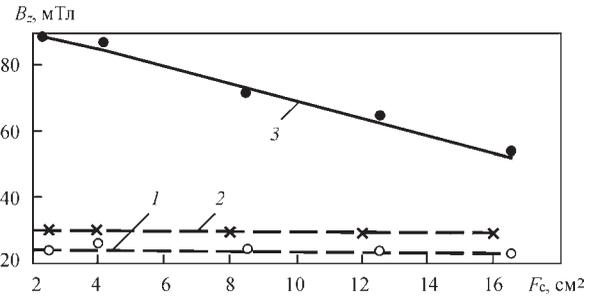


Рис. 5. Зависимость индукции  $B_z$  от сечения стержней  $F_c$  ( $IW = 1600$ ): 1, 2 — соленоид без ферросердечника; 1 — экспериментальные данные; 2 — расчетные данные; 3 — соленоид с ферросердечником, экспериментальные данные

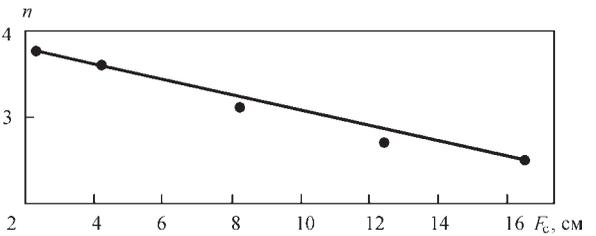


Рис. 6. Зависимость коэффициента  $n$  от сечения стержня  $F_c$

о характере изменения этих относительных значений компонент индукций вдоль оси  $OX$  можно по предлагаемой методике определить численные значения компонент индукции в любой точке поверхности сварочной ванны и в зоне электродной капли при дуговой сварке и наплавке. Если в конструкции УВ ПОМП стержни соединены сверху перемычкой (из того же материала и такого же поперечного сечения, что и стержни), то получаемые в расчетах значения компонент индукции  $B_x$  и  $B_z$  следует увеличить на 20...25 %.

### Выводы

1. Разработанные на основе обработки экспериментальных данных расчетные выражения для определения индукции, генерируемой УВ ПОМП, в зоне сварочной ванны обеспечивают удовлетворительную сходимость расчетных данных с экспериментальными.

2. Расчетная методика позволяет определить абсолютные значения индукции в зоне под торцами стержней УВ ПОМП, если известны размеры их сечений, либо определить их оптимальные размеры для достижения максимальных значений поперечной компоненты индукции при минимальных значениях продольной компоненты индукции в зоне сварочной ванны.

### 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 ду-

- говой наплавке под флюсом с воздействием поперечного магнитного поля. *Автоматическая сварка*, **5**, 48–51.
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](http://ogbus.ru/authors/Andreeva/Andreeva_1.pdf).
  6. Бессонов Л. А. (2003) *Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле*. Москва, Гардарики.
  7. 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) Структура поперечного магнитного поля, генерируемого устройствами ввода для процесса дуговой сварки. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Зб. наук. пр.*, **26**, сс. 135–141.
- References**
1. 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].
  2. Iofinov, P.A., Ibragimov, V.S., Dmitrienko, A.K. et al. (1991) Effect of external electromagnetic field on speed of electrode wire melting in automatic submerged-arc welding. *Ibid.*, **1**, 34-35 [in Russian].
  3. Razmyshlyayev, A.D., Mironova, M.V., Kuzmenko, K.G. et al. (2011) Efficiency of melting of electrode wire in submerged-arc surfacing with influence of transverse magnetic field. *The Paton Welding J.*, **5**, 39-42.
  4. Ryzhov, R.N., Kuznetsov, V.D. (2006) External electromagnetic effects in the processes of arc welding and surfacing (Review). *Ibid.*, 29-35.
  5. Andreeva, E.G., Shamets, S.P., Kolmogorov, D.V. (2005) Calculation of stationary magnetic fields and characteristics of electrical devices using program package ANSYS. *Electron. Sci. J. Oil and Gas Business*, **1**. [http://ogbus.ru/authors/Andreeva/Andreeva\\_1.pdf](http://ogbus.ru/authors/Andreeva/Andreeva_1.pdf).
  6. Bessonov, L.A. (2003) *Theoretical fundamentals of electrical engineering. Electromagnetic field*. Moscow, Gardariki [in Russian].
  7. Tozoni, O.V. (1975) *Method of secondary sources in electrical engineering*. Moscow, Energiya [in Russian].
  8. Razmyshlyayev, A.D., Mironova, M.V., Yarmonov, S.V., Vydmysh, P.A. (2013) Structure of transverse magnetic field generated by input devices for arc welding processes. *Visnyk Pryazov. DTU: Transact. Mariupol*, **26**, 135-141 [in Russian].

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ІНДУКЦІЇ КЕРУЮЧОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ В ЗОНІ ВАННИ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

О. Д. РАЗМЫШЛЯЕВ<sup>1</sup>, П. О. ВИДМИШ<sup>2</sup>, М. В. АГЕСВА<sup>3</sup>

<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, Нікопольський просп., 113-а. E-mail: pstukmu@gmail.com

<sup>3</sup>Донбаська державна машинобудівна академія. 84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72. E-mail: maryna\_ah@ukr.net

Показано, що в даний час є розрахункові методики, що дозволяють визначити індукцію в зоні зварювальної ванни, яку генерують двострижневі пристрої введення поперечного магнітного поля при дуговому зварюванні. Однак ці методики надзвичайно складні у використанні. У даній роботі запропонована розрахункова методика визначення чисельних значень компонент індукції поперечного магнітного поля в зоні зварювальної ванни. Методика заснована на використанні експериментальних даних про величину індукції, що генерується пристроєм введення поперечного магнітного поля в зоні зварювальної ванни при різній величині перетинів стрижнів цих пристроїв введення. Запропоновано розрахункові вирази і алгоритм їх використання для визначення компонент індукції магнітного поля у зазначеній зоні. Показана задовільна збіжність розрахункових даних з експериментальними. Методика рекомендується для використання при дуговому наплавленні і зварюванні виробів з матеріалів, які не є ферромагнетиками. Бібліогр. 8, рис. 6.

*Ключові слова:* поперечне магнітне поле, індукція, ферромагнетик, зварювальна ванна

## METHODOLOGY OF DETERMINATION OF INDUCTION OF CONTROLLED MAGNETIC FIELD IN POOL ZONE DURING ARC WELDING

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

<sup>1</sup>State Higher Education Institute Pryazovskiy State Technical University 7, Universitetskaya Str., 87500, Mariupol, Ukraine. E-mail: razmyshljaev@gmail.com

<sup>2</sup>OJSC «Metinvest-Promservis», 113-a Nikopol ave., 87500, Mariupol, 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 is shown that at the present time the calculation methods, which allow determining induction in the weld pool zone, which is generated by two-rod devices for input of transverse magnetic field during arc welding. However, these methods are extremely difficult to use. In this paper, the calculation methods for determining numerical values of the induction components of a transverse magnetic field in the weld pool were proposed. The methods are based on the use of experimental data on the value of the induction generated by the transverse magnetic field input device in the weld pool zone at different value of rod cross-sections of these input devices. The calculation expressions and an algorithm for their use are proposed to determine the magnetic field induction components in the indicated zone. The satisfactory convergence of the calculated data with the experimental ones is shown. The methods are recommended for using in arc surfacing and welding of products of materials which are not ferromagnetics. 8 Ref., 6 Fig.

*Keywords:* transverse magnetic field, induction, ferromagnetic, welding pool

Поступила в редакцію 12.06.2018



## В МЕЖДУНАРОДНОМ ИНСТИТУТЕ СВАРКИ (документы, представленные на 70-й ассамблее МИС, Шанхай, 2017 г.)

### Комиссия С IV – Лучевые процессы

- IV-1364-17** «Наплавка в защитных газах с подогревом проволоки из сплава на основе никеля с карбидом титана. Влияние условий процесса на микроструктуру» (K. Guenther и др.; Германия)
- IV-1363-17** «Аддитивное производство сваркой в защитных газах плавящимся электродом — исследование влияния температуры и времени на гомогенные свойства материала» (Ph. Henckell и др.; Германия)
- IV-1362-17** «3DPMD — дуговое аддитивное производство из титанового порошка» (K. Hoefel и др.; Германия)
- IV-1359-17** «Влияние направления наплавки при однократном многослойном аддитивном производстве на основе дугового процесса в защитных газах» (Zhang Guangjun и др.; Китай)
- IV-1358-17** «Аддитивные процессы лазерно-плазменной наплавки порошковых материалов» (V. Korzhyk и др.; Украина, Китай)
- IV-1356-17** «Численное моделирование сварочной ванны при аддитивном производстве на основе процесса сварки в защитных газах» (Y. Ogino и др.; Япония)
- IV-1353-17** «Производство габаритных инженерных сооружений методами аддитивных технологий» (Eu. Assunção и др.; Бельгия, Великобритания, Португалия)
- IV-1352-17** «Металлургическое исследование лазерного аддитивного ремонта железосодержащих сплавов» (Maurya Manuel и др.; США, Франция)
- IV-1351-17** «Технология производства на основе 30 кВт лазерного процесса с присадочной проволокой катушек для Международного термоядерного экспериментального реактора» (Y. Goto и др.; Япония)
- IV-1349-17** «Исследование лазерно-дуговой гибридной сварки нахлесточных соединений из листовой стали» (T. Kobashi и др.; Япония)
- IV-1347-17** «Численное исследование термического КПД плазменно-дуговой сварки с применением лазера» (S. Jäckel и др.; Германия)
- IV-1340-17** «Возможность охлаждения за счет перемешивания металла при лазерной сварке» (Hongze Wang и др.; Япония)
- IV-1339-17** «Развитие высокоомощного голубого лазера (445 нм) и определение его скорости поглощения на основе теории фракталов» (Hongze Wang и др.; Япония)
- IV-1338-17** «Технология упрочнения лазером: упрочнение фемтосекундным лазером без припуска на обработку в атмосфере для улучшения усталостных свойств сварного соединения» (T. Sano; Япония)
- IV-1337-17** «Гибридная лазерно-дуговая сварка и сварка с СМТ стыковых соединений деталей из алюминия и стали (J. Chen, Канада)
- IV-1336-17** «Механическое управление кристаллизацией при лазерной сварке алюминия» (T. Radel; Германия)
- IV-1335-17** «Отличия между постоянным, импульсным и динамическим процессом лазерной резки» (Jan Frostevarg и др.; Швеция, Великобритания)
- IV-1334-17** «Микроструктура и механические свойства многопроходного шва стали SA508 толщиной 50 мм для атомной энергетики, выполненного лазером в узкий зазор» (Jian Huang и др.; Китай)
- IV-1333-17** «Применение оптических технологий для изучения склонности к горячим трещинам при лазерной сварке 316L» (N. Wakita и др. Германия, Россия)
- IV-1332-17** «Гибридная лазерно-дуговая сварка ферромагнитных сталей большой толщины с электромагнитной поддержкой сварочной ванны» (Üstündağ и др.; Германия)
- IV-1330-17** «Лазерная наплавка порошком и проволокой в коаксиальной компоновке с применением Inconel 718» (F. Silze и др.; Германия)
- IV-1329-17** «Лазерная сварка разнородных материалов — аддитивное производство на основе электронно-лучевой технологии с присадочной проволокой» (Muneharu Kutsuna и др.; Япония)
- IV-1328-17** «Аддитивное производство на основе электронно-лучевого процесса с присадочной проволокой» (B. Vaufeld и др.; Великобритания)
- IV-1327-17** «Анализ максимальной температуры по распределению Гаусса при лазерной сварке» (Y. Lu и др.; Канада)
- IV-1326-17** «Формирование валика при лазерной сварке высокопрочных сталей при пониженном давлении» (X. Tang и др.; Китай)
- IV-1324-17** «Электронно-лучевая сварка алюминиевых литейных сплавов в атмосфере» (U. Reisgen и др.; Германия)
- IV-1323-17** «Двусторонний лазерно-импульсный перенос электродного металла при сварке в защитных газах» (JIA YaZhou и др.; Китай)

## ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Национальный технический университет Украины «КПИ им. Игоря Сикорского»

Бережная Елена Валерьевна (НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского») 25 июня 2018 г. защитила докторскую диссертацию на тему «Развитие научных и технологических основ повышения эффективности качества износостойкой электроконтактной наплавки». Научный консультант диссертанта д-р техн. наук, проф. В. Д. Кузнецов (проф. кафедры, НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского»). В качестве официальных оппонентов выступили: д-р техн. наук Ю. В. Фальченко (зав. отделом ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины), д-р техн. наук С. В. Гулаков (проф. кафедры, Приазовский ГТУ МОН Украины), д-р техн. наук Г. П. Болотов (проф. кафедры, Черниговский НТУ).



Диссертация посвящена развитию научных основ и методов автоматизированного расчета и проектирования процесса износостойкой электроконтактной наварки лентами, а также разработке практических рекомендаций по усовершенствованию технологий изготовления электродных материалов и восстановления изношенных поверхностей.

При проектировании восстановительных операций на основе процессов электроконтактной наварки с использованием расчетных методов определения технологических условий наращивания поверхностного слоя предъявляются следующие основные требования, обеспечивающие необходимые эксплуатационные свойства: прочность сцепления приваренного слоя с основой, износостойкость и усталостная прочность.

В работе экспериментально подтверждено влияние коэффициента упрочнения на чувствительность к концентрации напряжений применительно к образцам, наваренным лентами из конструкци-

онных углеродистых сталей с последующей термической обработкой. На основе полученных результатов экспериментальных исследований разработана комбинированная технология восстановления цилиндрических деталей, работающих в условиях циклического нагружения. Предложенная технология включает операции электроконтактной наварки с последующим локальным нагревом ТВЧ и замедленным охлаждением в теплоизолирующей смеси, содержащей в своем составе слоистые соединения графита. Применение разработанной комбинированной технологии восстановления деталей позволило снизить скорость подрастания усталостной трещины в поверхностном слое и повысить усталостную прочность наваренных деталей.

На основе проведенных экспериментальных исследований разработана технология изготовления электродного материала, которая позволяет получить в наваренном поверхностном слое структуру, состоящую из пластичной матрицы (твердый раствор) и равномерно распределенных в ней твердых составляющих (боридов железа), за счет чего воспринимаемые поверхностью изделия нагрузки перераспределяются по площади покрытия, снижая вероятность разрушения. Предложенная технология изготовления электродного материала обеспечивает высокие показатели износостойкости и напряжения откола покрытия, нанесенного электроконтактным методом.

Разработана математическая модель процесса электроконтактной наварки электродными лентами, основанная на численном рекуррентном решении условия статического равновесия выделенного элементарного объема термодиффузионного очага. Особенностью предложенной математической модели является корректный учет распределения тепловых характеристик электродного материала вдоль термодиффузионного очага, что играет важную роль при формировании соединения в процессе наварки. Установлено влияние величины коэффициента кинематической асимметрии на изменение локальных энергосиловых характеристик процесса. Принятые при конечно-разностном моделировании допущения подтверждены результатами конечно-элементного моделирования процесса электроконтактной наварки лентами. Адекватность разработанной математической модели подтверждена экспериментальными исследованиями. Экспериментально установлено, что увеличение коэффициента кинематической асимметрии процесса электроконтактной наварки способствует повышению прочности сцепления.

На основе разработанной математической модели выполнено автоматизированное проектирование технологических режимов процесса электроконтактной наварки лентами. На основе разработанной базы данных исходных параметров процесса электроконтактной наварки построена структурная схема и проведено моделирование модуля нечеткого управления процессом, реализация которого обеспечивает контроль параметров режима в течение импульса сварочного тока.

Выполненные научные исследования и предложенные на их основе практические решения подтверждены в условиях ЧАО «Новокраматорский машиностроительный завод» (г. Краматорск), ЗАО «Краматорський завод металокопструкцій» (г. Краматорск), ЧАО «Завод напівпровідників» (г. Запорожье), ЧАО «Северодонецьке об'єднання АЗОТ» (г. Северодонецк), ООО «Науково-виробнича компанія «Регіон Інноватика Еніон-Балтика» (г. Донецк), фермерского хозяйства «Діхтер» (Славянский р-н) с общим экономическим эффектом 2451 тыс. грн.

**А. С. Минаков (НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского»)** 26 июня 2018 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния сварных соединений электромагнитным методом». Научный руководитель диссертанта д-р техн. наук, проф. С. К. Фомичев (декан сварочного факультета НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского» МОН Украины). В качестве официальных оппонентов выступили: д-р техн. наук, проф. Н. А. Макаренко (зав. кафедрой, Донбасская ГМА), канд. техн. наук Ю. К. Бондаренко (науч. сотр. ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины)



Диссертация посвящена совершенствованию электромагнитного метода для оценки напряжений и деформаций в пластически-деформированных зонах сварных конструкций. Рассматривалось два случая: остаточные сварочные деформации и

напряжения в пластической зоне сварных соединений (пластические деформации сжатия и напряжения растяжения) и пластические деформации растяжения и растягивающие напряжения в других участках сварных конструкций.

Проведены экспериментальные исследования влияния пластических деформаций и напряжений плоских образцов стали 09Г2С толщиной 4 мм на гармонические составляющие сигнала магнитоанізотропного преобразователя и параметры петли магнитного гистерезиса.

Пластическую деформацию сжатия создавали путем нагревания образца газовой горелкой до температур 650...750 °С. Пластические деформации растяжения создавали на специально разработанной машине с использованием ручного гидравлического домкрата. Растягивающие напряжения создавали с помощью установки для чистого изгиба плоских образцов.

На основе экспериментальных исследований доказано, что напряженно-деформированное состояние пластической зоны сварных соединений и участков с пластическими деформациями растяжения может быть количественно оценено путем совместного гармонического анализа сигнала четырехполюсного магнитоанізотропного преобразователя и параметров петли магнитного гистерезиса.

Предложено для определения степени пластического деформирования сжатия (в пластической зоне сварных соединений) электромагнитным методом целесообразно применять параметры петли магнитного гистерезиса: половину сечения по оси индукции и полуширину по оси поля. Для определения напряжений в пластической зоне сварных соединений электромагнитным методом целесообразно применять параметры: амплитуды первой, третьей и шестой гармоник магнитоанізотропного преобразователя.

Предложено для определения степени пластического растяжения в сварных конструкциях применять полувысоту по оси индукции петли магнитного гистерезиса преобразователя параметров перемагничивания. Для определения напряжений растяжения в этих участках целесообразно применять фазу первой гармоники сигнала магнитоанізотропного преобразователя.

Разработан прибор MESTR-501 для определения напряженно-деформированного состояния электромагнитным методом на натуральных сварных конструкциях.

Предложен новый комбинированный преобразователь в двух вариантах для определения гармонических составляющих сигнала магнитоанізотропного преобразователя и параметров петли магнитного гистерезиса.

Внедрены результаты работы при надвигке пролетного строения во время строительства железнодорожно-автомобильного моста путем надвигки его через р. Днепр, на объектах ГП Укрхимтрансаммиак и учебном процессе.

**В. К. Фурман (НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского»)** 26 июня 2018 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Повышение эксплуатационных свойств плазменных покрытий с применением нанодисперсных порошков». Научный руководитель д-р техн. наук, проф. И. В. Смирнов (зав. кафедрой НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского» МОН Украины). В качестве официальных оппонентов выступили: д-р техн. наук С. В. Петров (вед. науч. сотр. Института газа НАН Украины), канд. техн. наук А. В. Яровицын (ст. науч. сотр. ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины)



Диссертация посвящена поиску путей повышения эксплуатационных свойств плазменных покрытий на основе самофлюсующего сплава и керамики для восстановления или создания коррозионноустойчивых и износостойких покрытий, работающих в условиях интенсивного износа и коррозионного воздействия.

Установлены оптимальные параметры и условия механохимической обработки для модификации исходных порошков нанодисперсными  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  и  $SiO_2$  для газотермических покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами.

Разработан композиционный металлокерамический порошок для газотермических покрытий на основе самофлюсующего сплава системы Ni-Cr-B-Si марки ПС-12НВК-01, который состоит из частиц металлической матрицы, в состав которой путем механохимической обработки в шаровой планетарной мельнице вводят добавку нанодисперсного (30...50 нм) тугоплавкого  $Al_2O_3$  или  $TiO_2$  в количестве 0,5...1,5 об. %.

Разработано устройство для плазменно-дугового напыления покрытий с магнитным управ-

лением в виде соленоида, который зафиксирован относительно сопловой части плазматрона и используется для напыления модифицированных керамических порошков.

Установлены рациональные технологические режимы плазменного напыления модифицированных порошков на основе исследования стабильности горения дуги, определение вольт-амперных характеристик, коэффициента использования материала и уравнения регрессии, которое устанавливает взаимосвязь между рабочими параметрами плазматрона и прочностью сцепления покрытий.

Экспериментально установлено, что незначительные объемные доли нанодисперсных оксидов (до 1,5 об. %), благодаря высокой дисперсности (5...41 нм) увеличивают внесенную поверхностную энергию с реализацией механизмов модификации 1-го и 2-го рода, и дисперсионного упрочнения, обеспечивая комплексное повышение эксплуатационных свойств плазменного покрытия.

На основе экспериментальных данных износостойкости и микротвердости плазменных покрытий установлено оптимальное содержание нанодисперсного  $Al_2O_3$  в исходном самофлюсующемся порошке системы Ni-Cr-B-Si на уровне 0,2...1,0 об. %. При этом износостойкость покрытий возрастает в 2,8...5,7 раза; микротвердость повышается на 18...34 %; термостойкость достигает 50 циклов без заметных отслоений и изменения химического состава.

Установлены закономерности формирования и исследованы физико-механические показатели плазменных покрытий на основе керамики из порошка оксида алюминия при введении в его состав 1,0...1,5 об. % нанодисперсных порошков  $TiO_2$  и  $SiO_2$ , которые благодаря наличию на поверхности развитых, свободных связей, активируются при высоких температурах в условиях плазменного напыления и химического взаимодействия между компонентами, способствуют повышению однородности покрытия, лучшему проплавлению керамического ядра, уменьшению сетки микротрещин и пористости до 3...6 %, что обеспечивает повышение микротвердости на 38...44 %, прочности сцепления напыленных покрытий на 16...25 %, коррозионной стойкости в среде 10 % HCl в 2,8 и в 6 раз при применении нанодисперсных порошков  $TiO_2$  и  $SiO_2$ , соответственно.

Разработаны технологические рекомендации для плазменного напыления модифицированных порошков, обеспечивающих повышение износостойкости, коррозионной и термостойкости, адгезионной прочности поверхностных слоев, работающих в условиях интенсивного износа и коррозионного воздействия.

## СВАРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПАТОН™ НА ВЫСТАВКЕ В ПОЛЬШЕ

10–12 апреля 2018 г. в г. Кельце (Польша) прошла выставка «Targi Kielce's Industrial Spring» или «Промышленная весна». Это одно из наиболее важных и масштабных промышленных событий в Центральной и Восточной Европе. Выставка является ежегодной и объединяет ряд специализированных выставок, посвященных ряду новейших технологий и оборудования для обрабатывающей промышленности.

В этом году на выставке было представлено оборудование таких производителей, как: SPAW-TECH, CENTRO-СПАВ, Spartus SAP-WELD, Сварка, STARYS, PFERD VSM ACONEXIM, Klimawent, ULTRAPRAS, Hyundai Welding Co., CLOOS, KEMPER, DYJAS (все Германия), SELCO (Италия), TECHNAX (Франция) и др.

В качестве эксклюзивной демонстрации разработок ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона в Польше было представлено сварочное оборудование серии ПАТОН™, которое смогли оценить более 12 тыс. посетителей из 35 стран мира. В частности, были представлены такие новинки инверторного сварочного оборудования, как выпрямители ВДИ 315S и ВДИ 315P, инвертор нового поколения для аргонодуговой сварки АДИ-200РАС и мультифункциональный инвертор МФИ-250P MultiPRO. ВДИ 315S на 380 В — это мощный и надежный инвертор серии STANDARD, предназначенный для ручной дуговой сварки на постоянном токе до 315 А. ВДИ 315P-380V — цифровой инверторный выпрямитель профессиональной серии, предназначен для сварки MMA, TIG и MIG/MAG на постоянном токе до 315 А. За счет большого количества дополнительных регулировок, данный аппарат можно настроить на наиболее оптимальные установки для различных задач и условий сварки, что делает его идеально подходящим для промышленного использования. АДИ-200РАС — аргонодуговой инвертор нового поколения, который пред-

назначен для аргонодуговой сварки TIG AC/DC (постоянным/переменным током) и ручной сварки MMA (постоянным током). Также в аппарате есть дополнительный режим выполнения электрозаклепок — RIW, который имеет 4 регулировки и может использоваться для быстрых прихваток. Среди дополнительных преимуществ нового АДИ-200РАС стоит отметить также следующие: сохранение до 10 наборов пользовательских настроек для всех режимов сварки, расширенный функционал в режиме MMA, существенно расширенный диапазон регулировки параметров во всех режимах сварки.

Настоящий фурор среди участников и посетителей выставки произвела новинка от ПАТОН™, гордость наших разработчиков — многофункциональный цифровой инвертор МФИ MultiPRO. Данная модель выполнена в двух сериях: однокорпусные аппараты серии Standard и двухкорпусные серии Professional. Данные аппараты предназначены для промышленного использования в качестве наиболее универсального помощника для выполнения очень широкого спектра задач в области сварки. Линейка профессиональной серии представлена тремя моделями: на номинальном токе 250 А для однофазной сети 220 В и трехфазной 380 В, а также на 315 А для трехфазной сети. Это наиболее продвинутое и универсальные инверторы не только в линейке ПАТОН™, но и в целом на украинском рынке сварочного оборудования. Аппарат позволяет выполнять сварку в большом диапазоне режимов и имеет огромное количество дополнительных функций, таких как: контактный и бесконтактный поджиг дуги в режиме TIG, импульсный режим для всех видов сварки, возможность отделения источника от механизма подачи и т. д. В стандартную комплектацию аппаратов МФИ входят все аксессуары, необходимые для работы на всех режимах сварки: сварочные кабели с электрододержателем и клеммой «масса», полуавтоматическая горелка, а также горелка для аргонодуговой сварки. На сегодня сварочное оборудование и материалы производства Опытного завода сварочного оборудования Института электросварки им. Е. О. Патона экспортируются в более чем 20 стран мира и из года в год география поставок расширяется. Участие Завода в специализированных отраслевых выставках, таких как Targi Kielce Industrial Spring, призвано в значительной степени усилить европейский вектор развития экспорта продукции ведущего отечественного производителя сварочного оборудования.



Стенд ОЗСО ИЭС им. Е. О. Патона

Пост-релиз

## КОНФЕРЕНЦИЯ «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ – 2018»

16–17 мая 2018 г. состоялась ежегодная конференция-выставка «Неразрушающий контроль-2018», организованная группой компаний «Ассоциация «ОКО». Целью конференции был обмен опытом в области неразрушающего контроля, информирование участников о новых разработках, а также установление деловых и коммерческих контактов и в перспективе создание новой техники и технологий.

Конференция была приурочена к 25-летию НПФ «Ультракон-сервис». Первое пленарное заседание конференции открыли председатель УО НКТД проф. Троицкий В.А. и генеральный директор Ассоциации «ОКО» Луценко Т.М. Участников конференции также приветствовал зам. директора ИЭС им. Е.О. Патона, академик НАН Украины Лобанов Л.М.

Во время пленарного заседания были представлены следующие доклады:

- Современные ультразвуковые каналы для автоматизации контроля. Прецизионная толщинометрия, порталные дефектоскопы (Галаненко Д.В.);
- Система автоматизированного вихретокового контроля авиационных колес SmartScan (Опанасенко А.В.);
- Использование ультразвуковых, вихретоковых и магнитных дефектоскопов в железнодорожной отрасли (Мищенко В.П.);
- Новые автоматизированные и механизированные системы НК, внедренные в 2017–2018 гг. (Бондарчук Д.Н.);
- Автоматизация неразрушающего контроля прокатных валков при производстве. Интеграция системы со всеми типами шлифовальных станков (Дидык А.В.);
- TOFD метод как средство для повышения качества и производительности проведения ультразвукового контроля сварных соединений. Система «TOFD-man» (Галаненко Д.В.);

• Оборудование вихретокового контроля для применения в авиационной промышленности (Опанасенко А.В.);

• Особенности сертификации персонала по НК, в том числе на украинских железных дорогах (Радько В.И.);

• Особенности изготовления и применения УЗ преобразователей в соответствии с требованиями заказчика (Черненко А.И.);

• Вихретоковый метод оценки напряжения в конструкциях из ферромагнитных сталей (Минаков С.Н., Учанин В.Н.);

• Автоматизация ультразвукового контроля железнодорожных осей при выпуске из производства в соответствии с международными стандартами (Свистун А.В.);

• Автоматизация магнитопорошкового контроля продукции при выпуске из производства (Бондарчук Д.Н.);

• Типы ВТП, применяемые для контроля теплообменных труб парогенераторов ПГВ-1000М (Ильчинин Р.В.);

• Акустикоэмиссионный контроль технологических трубопроводов (Галаненко Д.В.).

Второй рабочий день конференции был посвящен работе в секциях «НК на железнодорожном транспорте», «НК в авиации», «НК в энергетике», «НК в металлургии и машиностроении», «Сертификация персонала НК».

На специализированной выставке, которая работала во время конференции, участники могли познакомиться с продукцией НПФ «Ультракон-сервис»; НПФ «Промприбор» и Украинского НИИ неразрушающего контроля.

Участники конференции (а их было более 150) посетили заповедник «Феофания» и смогли плодотворно пообщаться во время общего дружественного ужина.



Пост-релиз

## Зарубежные партнеры

**Профессор Ян Пилярчик (Jan Pilarczyk)**

Тесные многолетние дружеские взаимоотношения связывают коллективы Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и Польского института сварки в Гливицах. Во многом этому способствовали многократные контакты специалистов обоих институтов, а также личные встречи академика Б. Е. Патона с Я. Пилярчиком, многие годы возглавлявшим Польский институт. Ниже представлена информация о многогранной деятельности Яна Пилярчика.



Профессор Ян Пилярчик

Вся профессиональная деятельность Я. Пилярчика неразрывно связана с Институтом сварки в Гливицах, который играет фундаментальную роль в польской промышленности благодаря всесторонней поддержке многих предприятий в области применения инновационных сварочных процессов и технологий.

Проф. Ян Пилярчик начал свою трудовую деятельность в Институте 1 марта 1963 г. Его рабочий стаж составляет 52 года, из которых 25 на должности директора Института. После ухода на пенсию профессор перешел на должность Советника директора по развитию научных исследований. Профессиональную активность проф. Яна Пилярчика невозможно отделить от деятельности Института.

Вступление на должность директора Института сварки в Гливицах произошло в 1990 г., когда Институт начал функционировать в новых условиях свободного и конкурентного рынка. В это время в

Польше было опубликовано постановление об институтах. Это постановление давало институтам большую самостоятельность, но одновременно определяло полное самофинансирование и ответственность за принимаемые решения. Реализация работ в новых условиях требовала проведения быстрой перестройки, которая предопределяла глубокую реорганизацию Института и интенсификацию поиска новых направлений деятельности, приносящих доход. Поиск этих направлений в условиях свободного рынка не был легким. При производстве сварных изделий и конструкций нужны предложения, учитывающие современные достижения, высокий профессионализм персонала, быстрое решение задач, ответственный подход и соблюдение сроков выполнения услуг, а также огромная гибкость при проведении переговоров с потенциальными заказчиками.

Многолетний эффективный труд директора Института проф. Яна Пилярчика привел к тому, что Институт сварки постепенно превратился в ведущий центральный научно-исследовательский институт польского сварочного производства и в качестве единственной такой организации в Польше выполняет роль Польского центра по сварке. Результатом успешного создания Европейского исследовательского пространства было получение Институту статуса Польского сварочного центра совершенства, подтвержденного дипломом министра науки. Получение этого статуса было возможным также благодаря реализации проекта «Польский сварочный центр совершенства» в рамках 5-й Рамочной Программы Европейского Союза.

Современное оснащение Института оборудованием и аппаратурой находится на очень хорошем уровне и не уступает тому, которым обладают подобные сварочные институты в



Во время подписания меморандума о сотрудничестве между ИЭС и Польским институтом сварки (слева — акад. Б. Е. Патон, справа — проф. Ян Пилярчик)

мире. На данный момент Институт в области сварки может предложить потенциальным потребителям практически все, в чем нуждается промышленность, а потребности являются очень большими, поскольку в Польше работает несколько тысяч предприятий, занимающихся соединением металлов с помощью сварки и родственных технологий.

Проблемы сварочного производства не замыкаются в границах одной страны. Польше также необходимы были связи со сварочным сообществом зарубежных стран. И здесь большую роль сыграл проф. Ян Пилярчик, который всегда имел многочисленные тесные личные контакты со специалистами по сварке во всем мире. После образования Европейского Союза в 1992 г. профессор ввел Институт сварки в качестве первого из сварочных институтов стран Восточной Европы в состав Европейской Федерации по Сварке (ЕФС). Польша была принята в Европейский Союз только в 2004 г., в то время как Институт сварки уже с 1996 г. обладал статусом чрезвычайного уполномоченного национального органа (ANB), а с 1997 г. статусом настоящего члена Европейской Федерации по Сварке. Год спустя Институт получил подтверждение своего статуса в Международном институте сварки (МИС).

Профессор Ян Пилярчик был представителем Института сварки в обеих организациях: ЕФС и МИС. Был также президентом Европейской Федерации по сварке и вице-президентом Международного института сварки, инициатором внедрения в Польше международной гармонизированной системы обучения, аттестации и сертификации сварочного персонала и сертификации предприятий, занимающихся сварочным производством.

Отдельным и очень важным разделом профессиональной деятельности проф. Яна Пилярчика являлось установление контактов с Институтом электросварки им. Е. О. Патона (г. Киев). Сначала это было участие в работе группы XIX «Свариваемость материалов», которая была одной из 49 групп, функционирующей в организации, объединяющей сварочные институты бывшего Совета Экономической Взаимопомощи (СЭВ). Встречи проходили в Киеве, Софии, Братиславе, Галле, Берлине, Тимишоаре и Гливицах с 1975 по 1989 г. После роспуска СЭВ решено было образовать новую, добровольную организацию стран Центрально-Восточной Европы под названием Международная Ассоциация «Сварка» (МАС). Происходило это на рубеже 1990-1991 гг., а в организационных работах, требующих многократных командировок в Киев, принимал участие также проф. Ян Пилярчик, уже тогда директор Института сварки в Гливицах. Сотрудничество в рамках МАС продолжается до сих пор.

Проф. Ян Пилярчик принимал также участие в организованных в Киеве конференциях. Особенно важными были конференции, связанные с юбилеями директора Института электросварки в Киеве — акад. Б. Е. Патона: 80-летием (в 1998 г.) и 90-летием (в 2008 г.). Со своей стороны, акад. Б. Е. Патон в 1995 г. принимал участие в праздновании 50-летия образования Института сварки в Гливицах.

Ниже приведен фрагмент интервью, которое дал академик Б. Е. Патон вроцлавской газете *Gazeta Południowa* № 21/2003 от 3.12.2003 г. (перепечатанный в издаваемом в Украине журнале «Криниця» (*Krynica*) № 95–96, 2017, стр. 125):

«Особенно тесные контакты мы имеем с учеными и специалистами из Института сварки в Гливицах, которым руководит проф. Ян Пилярчик — известный ученый в области теории сварочных процессов, в особенности свариваемости материалов. Недавно он стал президентом Европейской Федерации Сварки. Вместе с этим Институтом мы выполнили много очень интересных исследований и разработок. Касаются они таких областей, как оборудование и материалы для сварки и наплавки, систем автоматизации технологических процессов, анализа свариваемости металлов с применением математических методов, исследования прочности сварных конструкций и их работоспособность, диагностики их качества. В 1990 г. Институт сварки совместно с нашим Институтом стал основателем Международной Ассоциации «Сварка» и вносит существенный вклад в ее деятельность в обеих странах. Ученые киевского и гливицкого институтов активно сотрудничают при организации международных конференций, семинаров, классов, издании информационных материалов, организации выставок достижений

## ИНФОРМАЦИЯ

ученых и специалистов-сварщиков по проблемам сварки и родственных технологий. Польские коллеги печатаются в наших журналах «Автоматическая сварка», «Сварщик», а ученые ИЭС размещают свои статьи в польских журналах «Бюллетень Института сварки» (Biuletyn Instytutu Spawalnictwa) и «Обзор сварочного производства» (Przegląd Spawalnictwa).

Проф. Ян Пилярчик всегда принимал активное участие в проведении исследований. Проводил и руководил многими исследовательскими работами, а их результаты печатал в сварочных журналах, брошюрах и книгах. Занимался преподавательской деятельностью в Силезском политехническом институте и Познаньском политехническом институте. Был руководителем многочисленных кандидатских диссертаций, часто выступал оппонентом по кандидатским и докторским диссертациям, а также принимал участие в оценке кандидатов на должность профессора.

Был и далее остается членом многих комитетов и организаций, в том числе членом Комитета машиностроения Польской академии наук и председателем секции технологий этого комитета.

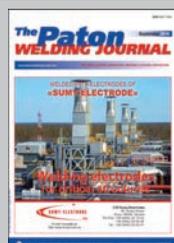
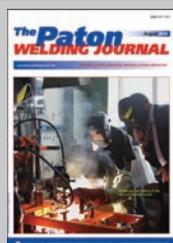
В период с 1989 по 2005 гг. был главным редактором журнала «Обзор сварочного производства». В настоящее время является председателем программного комитета этого журнала, главным редактором журнала «Бюллетень Института сварки», членом редколлегии журнала «Автоматическая сварка».

За свою многолетнюю и плодотворную работу проф. Ян Пилярчик был удостоен многих государственных орденов, медалей и наград. Среди наиболее значимых Кавалерский Крест Ордена Возрождения Польши и Золотая Медаль за многолетнюю службу. Заслуги проф. Яна Пилярчика отмечены Министерством народного хозяйства Польши — «Почетной наградой за заслуги по развитию народного хозяйства Польши».

Наиболее весомые зарубежные награды: диплом MERITE DE L'INVENTION (Брюссель — 1998), Медаль им. Prof. Jozefa Čabelki (Проф. Йозефа Чабельки) (Словакия — 2000), AWS — Атланта 2006 «INTERNATIONAL MERITORIOUS CERTIFICATE AWARD» за заслуги для международного сварочного сообщества (in recognition of their wise counsel, devotion, time and generous contributions in promoting cordial global relations with industry and with other organizations and for their service to the International Welding Community), а также IIW — The WALTER EDSTRÖM Medal (2015).

От редакции журнала «Автоматическая сварка»

Журнал «**Автоматическая сварка**» в полном объеме переиздается на английском языке под названием «**The Paton Welding Journal**» и распространяется по редакционной подписке (тел./факс: 38044 200-82-77, 200-54-84, E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)).



**Правила для авторов, лицензионные соглашения, архивные выпуски журналов на сайте издательства [www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com). В 2018 г. в открытом доступе выпуски журналов с 2009 по 2016 гг. в формате \*.pdf.**

Подписано к печати 19.07.2018. Формат 60×84/8. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,34.  
Печать ООО «ДИА».  
03022, г. Киев-22, ул. Васильковская, 45.

## Интервью с А. И. Панфиловым — директором Департамента сварки ООО «Стил Ворк»



А. И. Панфилов на объединенном стенде украинских компаний во время проведения выставки «Сварка и резка», 25–29 сентября 2017 г. (г. Дюссельдорф, Германия)

ООО «Стил Ворк» (г. Кривой Рог) производит износостойкие биметаллические листы и изделия из них, а также осуществляет восстановление, упрочнение и ремонт различного оборудования, подвергающегося абразивному изнашиванию.

В компании «Стил Ворк» функционирует Система менеджмента качества, которая сертифицирована на соответствие требованиям Международного стандарта ISO 9001 и Система менеджмента профессиональной безопасности и здоровья на соответствие требованиям Международного стандарта OHSAS 18001.

Продукция компании поставляется на обогатительные, горнодобывающие и металлургические предприятия Украины и других стран.

### **Андрей Иванович, каковы истоки появления вашей компании?**

Изначально была создана компания ООО «Бест Лайн», которая занималась ремонтом горного оборудования с помощью сварки и наплавки, а также повышением износостойкости узлов мельниц дробилок и воздуходувной техники. В процессе работы возникла идея производства биметалла и изделий из него. У истоков создания компании ООО «Стил Ворк» стояли такие специалисты как Панфилов И. И., Пелешко В. Н., Панфилов С. А. и другие преданные делу люди.

**Компания «Стил Ворк» в последние годы успешно развивается, наращивает выпуск продукции, большую часть которой составляют биметаллические листы, полученные электродуговой наплавкой. В условиях сокращения рынка в Украине чем можно объяснить интенсивное развитие вашего предприятия?**

Огромную роль в успехе играет коллектив компании, успешный менеджмент и желание занимать лидирующие позиции на мировом рынке.

### **Для каких конструкций в последнее время были реализованы технологии ООО «Стил Ворк»?**

Самыми знаковыми были: газоочистка доменной печи, калибратор Тарасова, сбросные трубы доменной печи, воронка загрузочная, лоток БЗУ, цилиндр вставной, скип 13,5 м, роторы НР-7500 и НР-9000, автостеллы и много других узлов.

**На предприятии постоянно проводится реконструкция производственных мощностей. Что делается для выпуска конкурентоспособной продукции?**

Используем качественные материалы, совершенствуем технологии производства, включая автоматизацию и роботизацию производственных процессов. Также работаем над внедрением системы





Повысилась износостойкость изделий и конструкций за счет использования качественных материалов и применения более современных технологий. Также увеличилась номенклатура производимой продукции.



управления качеством, в частности, 5S и 6SIGMA.

**Как на предприятии решаются кадровые вопросы, в том числе в связи с оттоком профессиональных кадров в Европу?**

Благодаря успешному менеджменту. Стараемся повышать заработную плату, улучшать условия труда. Используем и другие стимулы.

**Предприятие выпустило почти 10000 биметаллических листов SWIP<sup>®</sup>. Какие изменения в качестве листов произошли от начала их выпуска к настоящему времени?**

**Чем можно объяснить тот факт, что «Стил Ворк» фактически не имеет конкурентов в Украине?**

Первоначально такое производство требует огромных инвестиций, срок окупаемости которых более 15 лет. Не все готовы так рисковать.

**Что вам дало сотрудничество с исследовательскими институтами, в том числе с ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, и какие проблемы производства необходимо решить вместе с ними?**

Сотрудничество с ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины обеспечило компании «Стил Ворк» конкурентное преимущество по цене и качеству продукта. Данное сотрудничество позволяет решать самые сложные проблемы на предприятиях заказчиков. Благодаря совместной работе мы добиваемся повышения производительности труда, эксплуатационной надежности и улучшения качества выпускаемой продукции.

**Одним из направлений диверсификации производства является технология сварки взрывом и получение плакированного биметаллического листа. Какие задачи необходимо решить с точки зрения производства и бизнеса?**

Мы работаем в этом направлении, но для этого тоже нужны немалые инвестиции и специальные производственные мощности — участок, цех и полигон для проведения взрывных работ.

**Ваше предприятие фактически использует технологии XX века, а сейчас в XXI веке в промышленности во всем мире используются цифровые технологии в контексте концепции «Индустрия 4.0». Что делается в этом направлении?**

Мы, как и весь мир, стремимся развиваться в этом направлении и, как я уже говорил, занимаемся роботизацией и автоматизацией производственных процессов с целью улучшения качества продукции.

**Андрей Иванович, Вы предложили создать музей сварки в г. Кривой Рог и провели серьезную подготовительную работу. Почему именно музей сварки, а не какой-либо другой технологии и почему в Кривом Роге?**

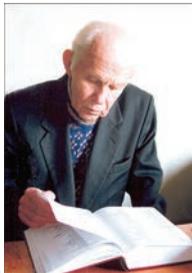
Кривой Рог — крупный индустриальный центр. Профессия сварщика очень важна в нашем производстве. Много открытий было сделано в области сварки, и поэтому моя задача заключается в популяризации этой профессии. В связи с этим у меня и у руководства компании есть огромное желание создать музей сварки в г. Кривой Рог и предложить отмечать в последнюю пятницу мая профессиональный праздник — День сварщика.

*Благодарю Вас, Андрей Иванович, за проявленное желание поделиться с читателями журнала направлениями деятельности компании и желаем успехов в поиске и внедрении инновационных технологий сварки.*

Интервью записал А. Т. Зельниченко

## Календарь августа

**1 августа 1927**



Родился Владимир Федорович Грабин (1927–2010) — ученый в области металловедения и сварки, представитель Патоновской школы. Внес существенный вклад в разработку основ сварочного материаловедения металлов и сплавов, которые позволили уточнить ряд положений по влиянию фазового состава на структуру и свойства сварных соединений металлов различных классов, склонность к образованию трещин при сварке.

**2 августа 1930**



Родился Сергей Иванович Кучук-Яценко — крупный ученый в области сварки металлов давлением, академик, представитель Патоновской школы. Фундаментальные исследования ученого легли в основу разработки новых способов контактной сварки непрерывным, импульсным и пульсирующим оплавлением, запатентованных во многих странах мира. На их основе С. И. Кучуком-Яценко с коллективом специалистов ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология сварки различных изделий, созданы системы управления и новые образцы сварочного оборудования, не имеющие аналогов в мировой практике.

**3 августа 1934**

Был запущен двигатель танкера «Poughkeepsie Socony» американского торгового флота. Это было одним из наиболее важных достижений корабельного строительства в США. Танкер одним из первых превысил стоимость судостроительной программы в 5 млн долларов США и явился крупнейшим цельносварным торговым судном своего времени из построенных в США и, вероятно, в мире.



**4 августа 2009**

Британский энтузиаст и инженер Алан Рой Хэндли (Alan Roy Handley) решил вернуться к идее создания металлического дирижабля. Свой проект он назвал Varialift. Алан решил создать гибридную систему, способную объединить в себе преимущества самолета, вертолета и дирижабля. Первый аппарат серии Varialift – ARH-50 A. Хэндли позиционирует как дирижабль для транспортировки грузов весом 50–55 т. В 2011 г. он был успешно протестирован. Оболочка аппарата сваривалась из алюминиевых листов, несущий газ — гелий, длина аппарата — 150 м.



**5 августа 1973**

С пусковой площадки космодрома Байконур-5 был запущен космический аппарат «Марс-б» ракетой-носителем «Протон-К». В марте 1974 г. с него был отделен спускаемый аппарат. При изготовлении космических аппаратов среди прочих технологий применяли различные способы сварки для получения неразъемных соединений.



\* 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.

**6 августа 1961**

Ракетой-носителем Р-7 был запущен корабль, получивший название «Восток-2», с летчиком-космонавтом Германом Степановичем Титовым (1935–2000) на борту. Ракеты носители Р-7 открыли человечеству космическую эру. При их помощи, среди всего прочего, были осуществлены: вывод на орбиту Земли первого искусственного спутника, вывод на орбиту Земли первого спутника с живым существом на борту, вывод на орбиту Земли первого корабля с человеком. Основными методами сварки конструкции ракеты из алюминиевых сплавов являлись ручная и механизированная сварка в среде инертного газа (аргона), а также контактная точечная сварка.



**7 августа 1842**

Родился Николай Николаевич Бенардос (1842–1905) — инженер, изобретатель электрической дуговой сварки, автор более 100 изобретений. Мировую славу ему принесло изобретение электрической дуговой сварки и резки металлов. Способ Бенардоса стал известен во всем мире — так появилась возможность довольно легко сваривать отдельные металлические фрагменты. Но понадобилось полвека для того, чтобы сварка стала основной технологией соединения металлов. Особенно много внимания Н. Н. Бенардос уделял дуговой сварке угольным электродом, получившее название «способ Бенардоса».



**8 августа 1932**



Родился Юрий Сергеевич Борисов — представитель Патоновской школы, известный ученый в области материаловедения покрытий, в том числе газотермических, содержащих аморфные и квазикристаллические фазы. Ю. С. Борисов заслуженный деятель науки и техники Украины, автор более 400 статей, монографий, авторских свидетельств и патентов.

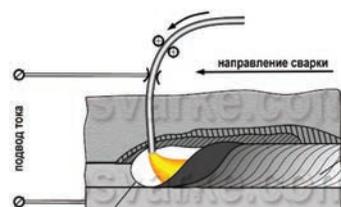
**9 августа 1951**

К августу 1951 г. группа ученых и специалистов Института электросварки (Н. Г. Остапенко, В. К. Лебедев, С. И. Кучук-Яценко, В. А. Сахарнов, Б. А. Гальян) впервые разработала способ стыковой контактной сварки оплавлением и соответствующие машины для контактной сварки рельсов, труб и других изделий. В дальнейшем благодаря совершенствованию системы управления удалось создать новые образцы машин, не имеющих аналогов в мире.



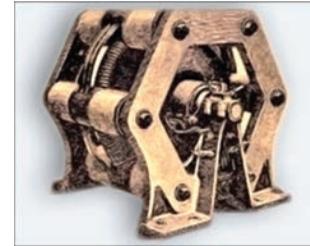
**10 августа 1943**

В августе 1943 г. Б. Е. Патон и А. М. Макара (Институт электросварки) при исследовании процесса сварки под флюсом доказали наличие дугового разряда. Позже и другими исследователями были определены размеры газового пузыря, измерены напряжения между электродами, температура столба дуги и другие параметры процесса.



**11 августа 1885**

Опубликовано сообщение о создании Э. Томсоном динамо-машины. Элихью Томсон (1853–1937) сконструировал динамо-машину с самовозбуждением (мощность 18,3 кВт., 1800 об/мин, масса 22,5 кг), которая обеспечивала сварочный трансформатор переменным током. Именно ее трехфазная модель стала базой для новой системы дугового освещения, которую Томсон разработал совместно с Э. Дж. Хьюстоном.

**12 августа 1908**

Родился Аркадий Ефимович Аснис (1908–1987) — известный ученый, представитель Патоновской школы. Им разработано множество материалов для сварки и наплавки, оригинальные методы и методики исследования соединений и оценки их прочности в условиях нагрузки. А. Е. Аснис, разработчик научных основ создания и выбора хорошо свариваемых экономно легированных и нечувствительных к старению сталей. Участвовал в разработке универсального полуавтомата с дистанционным управлением для сварки и резки на больших глубинах. Автор более 300 научных работ.

**13 августа 1927**

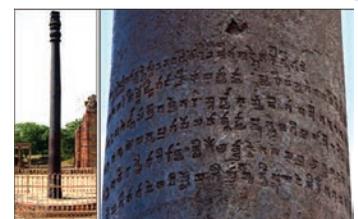
Заложен головной сторожевой корабль типа «Ураган» — первый в СССР боевой надводный корабль. Проектированием руководил молодой инженер-кораблестроитель Владимир Александрович Никитин. Никитин одним из первых в отрасли рискнул применить сварку корпусных конструкций, к которой многие судостроители и военные моряки в те годы относились с недоверием, предпочитая проверенную временем клепку. «Ураган» вошел в историю советского кораблестроения как корабль-пионер, с которого началось строительство советского надводного флота.

**14 августа 1948**

На «Заводе № 402» в Молотовске заложен «Огненный» — советский эскадренный миноносец проекта 30-бис. Создание эсминцев этого типа потребовало значительно увеличить объемы сварочных работ. Специалистов не хватало, и тогда нелегкую профессию стали осваивать девушки. Создание корабля велось с внедрением позиционно-монтажного конвейера, крупногабаритной сборки и широким применением электросварки. С 12 февраля 1950 г. «Огненный» входил в состав Северного флота.

**15 августа 1947**

День независимости Индии, отмечается с 1947 г. Одной из достопримечательностей Индии является железная (99,722 % Fe) колонна в Дели, возрастом более 1500 лет. Исследователями установлено, что она изготовлена из отдельных стальных блоков весом 20–30 кг, соединенных с помощью кузнечной сварки. Высокая коррозионная стойкость ее определяется повышенным содержанием фосфора (0,114 % P) в ней и сухим климатом.



**16 августа 1930**



Родился Василий Степанович Гвоздецкий, представитель Патоновской школы — известный ученый в области теории катодных процессов в сварочной дуге, основывающихся на явлении ионно-электронной эмиссии катода. Эти исследования стали основой создания новых способов микроплазменной сварки металлов и сплавов толщиной 0,1...1,0 мм. Благодаря его работам изготовлено и внедрено в производство более 15000 аппаратов для различных способом микроплазменной сварки.

**17 августа 1987**

Состоялся первый полет Су-33 — советского палубного истребителя четвертого поколения. Много проблем вызвала необходимость сварки титановых узлов больших и малых толщин. Были приобретены специализированные сварочные установки, отработаны режимы сварки и методы контроля качества сварных швов. В числе освоенного уникального оборудования — установка электронно-лучевой сварки в вакууме ЭЛУ-21.



**18 августа 1942**

Были изготовлены первые танки «Тигр» — немецкие тяжелые танки времен Второй мировой войны. Крыша башни танка соединялась с бортами сваркой. Броневые листы стыковались методом «ласточкин хвост» и соединялись при помощи сварки. Большое внимание уделялось качеству сварных швов не только для обеспечения жесткости конструкции, но и обеспечения снарядостойкости. В иностранных источниках британские и американские инженеры, а также советские ученые-сварщики критиковали как качество присадочного материала электродов, использовавшихся для сварки корпусов танков «Тигр», так и технологию исполнения самих швов.



**19 августа 1932**

Состоялся первый полет скоростного самолета АИР-7 конструкции ОКБ Яковлева. 20 ноября 1932 г. пилот Юлиан Пионтковский на самолете АИР-7 достиг рекордной в СССР скорости — 325 км/ч. При производстве самолета для экономии веса активно применяли сварку. Фюзеляж — ферменный, сварной из стальных труб с легким каркасом, придававшим полотняной обшивке округлый контур. К фюзеляжу присоединен небольшой центроплан той же сварной конструкции. Основные стойки сварной конструкции из стальных труб прикреплялись к концам центроплана.



**20 августа 1927**

Спущен на воду крейсер «Карлсруэ» — немецкий легкий крейсер, принимавший участие во Второй мировой войне. Разработка проекта новых крейсеров с учетом ограничений по Версальскому договору началась в 1924 г. В рамках проекта (тип «К») было построено три крейсера: «Кенигсберг», «Карлсруэ» и «Кельн». Корабельный корпус был собран из продольных стальных каркасов, где была использована сварка; до 85 процентов корпуса было сварным, а не привычным клепанным. Корпус был разделен на девятнадцать водонепроницаемых отсеков, имел двойное дно, составляющее 72 % длины корпуса судна, и соединялся при помощи сварки. 9 апреля 1940 г. крейсер был потоплен британской подводной лодкой «Труант».



**21 августа 1938**

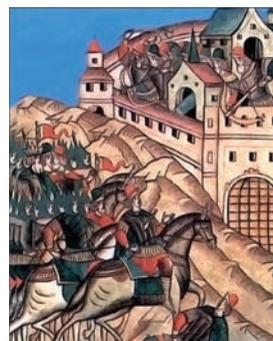
Доктор Чарльз Кэдуэлл в 1938 г. существенно улучшил конструкцию системы экзотермической сварки Ганса Гольдшмидта, запатентовавшего в 1898 г. опробованный им в коммерчески значимых масштабах способ алюмотермитной сварки рельсов. С этого времени началось ее массовое применение. Оригинальное использование процесса экзотермической сварки применялось при монтаже железнодорожных путей, которые ранее соединялись с помощью накладок, через отверстия в рельсах.

**22 августа 1972**

Поднялся в воздух опытный экземпляр «Т-4» — ударно-разведывательный бомбардировщик-ракетоносец ОКБ Сухого. При изготовлении машины были применены новые технологии, многие из которых не имели аналогов в отечественном и мировом авиастроении. Планер самолета был сделан с использованием титановых сплавов. Весь цикл производства Т-4 был в максимальной степени автоматизирован (95 % сварочных работ). Предусмотренный при серийном производстве полный перевод монолитных деталей на сборно-сварные конструкции, по оценкам НИАТ, должен был обеспечить снижение расхода материалов на 70 %, трудоемкости — на 45 %, сокращения производственных циклов — в два-три раза.

**23 августа 1382**

Началась оборона Москвы от нашествия хана Тохтамыша. В летописи 1382 г. впервые упоминается об успешном использовании сварных артиллерийских орудий во время обороны. Выкованный из крицы железный лист скручивали на железной оправке в трубу и сваривали продольным швом внахлест. Затем на эту трубу наварили еще одну или две трубы большего диаметра, следя за тем, чтобы продольные сварные швы располагались в разных местах. Выкованные таким образом трубы-заготовки были короткими. Поэтому для получения достаточно длинного ствола орудий несколько таких заготовок соединяли между собой при помощи кузнечной сварки.

**24 августа 1939**

Родился Георгий Михайлович Григоренко — академик, представитель Патоновской школы. Принимал непосредственное участие в разработке новых методов, оборудования и технологии плазменно-дугового, дугошлакового переплавов, электрошлаковой технологии, индукционной выплавки с комбинированными источниками нагрева и в водоохлаждаемых секционных кристаллизаторах. Разрабатывал технологии выплавки высокоазотистых сталей, технологии легирования сталей азотом из газовой фазы. Впервые проанализировал и классифицировал газообменные процессы в электрометаллургии при плавке и переплаве.

**25 августа 1981**

Опубликован один из патентов Николая Николаевича Рыкалина (1903–1985), академика, ученого в области сварки и металлургии. В годы войны Н. Н. Рыкалин проводил исследования по расплавлению электродов и проплавлению основного металла. Автор многочисленных трудов по теплофизическим основам обработки металлов, сварке металлов, плазменным процессам в металлургии. Созданная им теория тепловых процессов при сварке послужила основой для разработки технологических процессов, в которых на вещество воздействуют высококонцентрированные источники энергии — термическая плазма, электронный луч, ионные потоки, лазерное излучение.

**26 августа 1934**

Спущена на воду подводная лодка «Щ-121» «Зубатка». Это был первый тип средних подводных лодок, построенных в СССР. Трубы торпедных аппаратов были связаны с переборками дифференциальных цистерн и составляли часть конструкции прочного корпуса. Шесть сварных переборок разделяли корпус на семь отсеков. Крепление балок к обшивке производилось при помощи сварки. Удачные эксперименты со сваркой позволили обеспечить большую живучесть, а также уменьшить вес лодки.



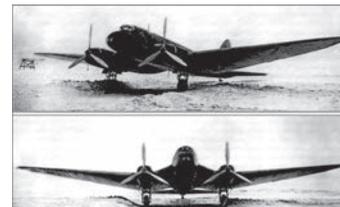
**27 августа 1956**

Токарь-новатор А. И. Чудиков подал заявку и получил на нее авторское свидетельство № 106270 на «Способ сварки встык». Чудиков понял, что для осуществления сварки трением необходимо соблюдать три основных условия: работать на больших оборотах детали, не меньше 750–1000 об./мин; мгновенно останавливать обрабатываемую деталь, чтобы металл, перешедший в пластическое состояние, не прокручивался по участку соединения; прилагать осевое усилие.



**28 августа 1937**

Пилот Н. П. Шебанов на самолете «Сталь-7» установил мировой рекорд скорости. Самолет показал прекрасные для своего времени характеристики по дальности и скорости полета: средняя скорость по маршруту Москва–Свердловск–Севастополь–Москва длиной 5068 км составила 405 км/ч. Стальные трубы и фасонные профили, соединенные сваркой, образовывали силовой каркас крыла и оперения. Конструкция самолета с обилием сварных элементов получилась достаточно прочной.



**29 августа 1932**

Заложена головная подводная лодка серии VI «Малютка». Инженер-конструктор Алексей Николаевич Асафов (1886–1933) предложил заменить клепку прочного корпуса подводной лодки электросваркой, в том числе, для снижения шероховатости корпуса и повышения скорости.



**30 августа 1940**

Спущен на воду монитор типа «Хасан» (проект 1190) — первый в серии советских мониторов, служивших в составе Амурской военной флотилии. Корпус корабля был клепаным, наружная обшивка и палуба — сварными. Высота борта в середине корпуса составила 4 м, длина наибольшая — 88,03 м, ширина наибольшая — 11,09 м, осадка наибольшая — 2,94 м.



**31 августа 1900**

В начале 1900-х гг. газовая горелка (точнее резак) для целей резки появилась практически в нескольких странах. В 1904 г. Жоттран (Бельгия) к сварочной горелке добавил трубку с соплом для подачи кислорода. В этом же году Э. Висс (США) запатентовал горелку-резак с концентрическими соплами, предложенную Э. Смитом.

