

УДК 669.295:6920.1

**А.В. Овчинников, д-р техн. наук,**

*Запорожский национальный технический университет  
ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063  
kafedra\_mex@zntu.edu.ua*

**А.П. Фалалеев, профессор, д-р техн. наук,**

**В.В. Мешков, доцент, канд. техн. наук,**

**Г.Н. Сикавин**

*Севастопольский национальный технический университет  
ул. Университетская, 33, г. Севастополь  
auto@sevntu.sebastopol.ua*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕМОНТА ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

*Установлено, что применение серийных методов восстановления деталей газотурбинных двигателей из титановых сплавов приводит к снижению механических свойств сварных соединений до 30% и причиной этого являлись структурные изменения, а также дефекты сварного шва. Разработаны модифицированные (La, Y и B) присадочные материалы из титановых сплавов с субмикроструктурной структурой, которые формируют равноосный и пластинчатый тип структуры в сварных соединениях титановых сплавов, что обеспечило в них механические свойства на уровне 0,9 от основного металла.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, титановые сплавы, сварные соединения, деформация, механические свойства.

**Введение.** Применение титановых сплавов в машиностроении и энергетике для изготовления высоконагруженных деталей является крайне перспективным, но ограничивается высокой стоимостью материала. Анализ эксплуатации деталей турбин из титановых сплавов показывает, что они более чувствительны к различного рода дефектам формы по сравнению со стальными деталями, поэтому крайне важно иметь технологии, позволяющие производить своевременный ремонт подобных дефектов. Традиционные формы ремонта деталей сложной формы связаны с наплавкой или изготовлением ремонтных вставок и последующей механической обработке [1]. Применение сварки позволяет решить сложные конструктивные задачи. Так, например, для снижения вибраций известно применение электронно-лучевой сварки лопаток с ободом диска, положительные результаты испытаний позволили внедрить эту конструкцию в рабочих колесах диаметром до 1200 мм в роторной части энергетических турбинных установок [**Ошибка! Закладка не определена.**]. Прогрессивным является применение центробежных моноколес из титановых сплавов, которые позволяли улучшить газодинамические характеристики компрессора. Изготовление монодеталей связано с применением 5-ти координатных фрезерных станков с программным управлением, поэтому моноколеса являются дорогостоящими, замена которых вследствие наличия повреждений при эксплуатации, не всегда возможна и целесообразна. Ремонт монодеталей путем механической замены поврежденных элементов невозможен, поэтому их ресурс, в первую очередь, зависит от эффективности восстановления свойств методом сварки. В тоже время действие термического цикла сварки приводит к изменению типа и параметров структурных составляющих в шве данных сплавов. Это ведет к снижению расчетного ресурса деталей, а иногда и невозможности проведения ремонтных работ для ряда деталей. Поэтому важной задачей является приближение уровня свойств сварного шва к свойствам основного металла.

Как указывалось в работе [2], разрабатывая новую технологию изготовления детали, необходимо параллельно с ней разрабатывать и технологию ее восстановления с применением сварки. Высокая неоднородность зеренной структуры сварного шва титанового сплава, полученного электронно-лучевой сваркой, отмечена в различных публикациях [3, 4]. В указанных работах в качестве регламентированной структуры титановых сплавов для деталей паротурбинной установки рекомендована структура бимодального типа взамен  $\beta$ -превращенной, что позволило повысить на 20% предел циклической прочности. Сделан вывод, что для более полной реализации резервов несущей способности лопаток, дисков, крепежа ответственных узлов судовых паротурбинных установок необходим определенный тип структуры титановых сплавов, обеспечивающий заданный уровень прочности. Восстановить весь комплекс свойств в деталях, работающих при сложных нагрузках на уровне исходного материала, практически невозможно. Перспективным направлением решения проблемы восстановления деталей из титановых сплавов может стать новый материаловедческий подход, учитывающий высокий уровень сопротивления разрушению под действием эксплуатационных нагрузок, действующих на деталь. С учетом габаритных размеров и ответственности восстанавливаемых изделий даже микродефекты в

структуре сварного шва (пористость, неметаллические включения, химическая и структурная неоднородность и др.) могут привести к полной потере их работоспособности. Одной из основных причин образования перечисленных дефектов сварного шва являются состав и качества присадочных материалов, поэтому важная роль в надежной работе восстановленных титановых деталей принадлежит структуре присадочных материалов.

**Цель работы** заключалась в решении проблемы повышения долговечности дорогостоящих высокотехнологичных узлов и деталей, в частности лопаток и моноколес компрессоров ГТД, путем их восстановления методами сварки с применением новых модифицированных присадочных материалов в специальном структурном состоянии.

**Методика проведения исследований.** В качестве присадочных материалов использовали сплавы стандартного химического состава (BT2св, BT8), а также выплавляли опытные сплавы: сплав BT2 с добавлением модификаторов (лантан, иттрий, бор). Слитки сплава BT2 с модифицирующими добавками получали путем вакуумно-дугового переплава. Химический состав слитков опытных сплавов, содержащих Al, La, Y, В и присадочных материалов из деформируемых титановых сплавов (BT2, BT8), а также сварных швов определяли спектральным методом с использованием прибора «SPECTROMAX» по стандартным методикам (ГОСТ 19863.1 – ГОСТ 19863.8). Определение содержания иттрия и лантана проводили (прибор "ContrAA 300BU"), бора – оптико-эмиссионным искровым методом ("Spectrolab"). Микроструктуру изучали с использованием инвертированного микроскопа отраженного света «Observer.D1m» (фирма «Carl Zeiss»), а также растрового электронного микроскопа JSM – T300 при ускоряющем напряжении 20 кВ. СМК структуру в титановых сплавах получали по технологии интенсивной пластической деформации (ИПД) методом винтовой экструзии (ВЭ) [5]. Из заготовок, полученных методом ВЭ, а также из выплавленных слитков и готовых деформируемых прутков сплавов стандартного состава для испытания механических свойств вырезали плоские образцы толщиной 2 мм. Присадочную сварочную проволоку из сплавов опытных составов получали путем вырезки из плоских заготовок с последующей шлифовкой на Ø2,0 мм. Сварные соединения получали методом аргонодуговой сварки (АДС) с параметрами ( $I_{св.} = 180$  А;  $U_{св.} = 10$  В;  $V_{св.} = 0,24$  м/мин; вольфрамовый электрод Ø1,8 мм). Для испытаний на статическую прочность согласно ГОСТ 6996-66 сваривали пластины. Усталостные испытания проводили как на сварных образцах, так и на натуральных лопатках, после восстановления их наплавкой. Испытания проводили на базе  $2 \cdot 10^8$  циклов нагружений по ГОСТ 25.505-85 [6]. Испытания лопатки (надполочная часть) проводили способом динамического возбуждения колебаний по четвертой изгибаемой форме на вибростендах ВЭДС-1000 и ВЭДС-200 при частоте 1074 Гц и напряжении 285 МПа до появления макротрещины длиной 1...3 мм.

**Обсуждение результатов исследований.** Проводили исследования влияния состава серийных присадочных материалов на структуру и свойства сварных соединений из сплава BT8, широко применяемого для изготовления роторных деталей ГТД. Структура пластин основного металла соответствовала регламентированной стандартами для производства лопаток (равноосный тип). Исследование свойств сварных соединений стандартными присадочными материалами, показали, что механические свойства изменялись в широком диапазоне: предел прочности от 0,88 до 0,96  $\sigma_{в. осн.мет.}$ , угол загиба от 0,6 до 1,6  $\phi_{осн. мет.}$ , ударная вязкость от 0,13 до 0,33 КСТ<sub>осн.мет.</sub>. В зависимости от состава присадочного материала и исходной структуры основного материала, значения механических свойств находились ниже требуемого уровня, при этом разрушение происходило непосредственно по литому металлу сварного шва. Снижение уровня механических свойств металла сварного шва связано с несколькими факторами. Один из них – это образование в шве структуры нерегламентированного типа, что привело к изменению характера разрушения от пластического, свойственного основному металлу, до квазихрупкого. Установлено изменение типа и структуры сварного шва и образование грубопластинчатой структуры с размером первичных  $\beta$ -зерен до 350 мкм и  $\alpha$ -пластин до 5 мкм (рис. 1). Структурные изменения вызвали снижение уровня статической прочности до 20 %, предела выносливости – до 30 %, угла загиба – до 20 %.

Результаты испытаний предела выносливости ( $\sigma_{-1}$ ) сварных образцов из сплавов BT3-1 и BT8 представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Предел выносливости на базе  $10^8$  при МнЦУ сварных соединений сплавов BT3-1 и BT8, полученных методом АДС с различными присадочными материалами

Основной материал (тип структуры)	Присадка, марка сплава	$\sigma_{-1св.}$ МПа
BT8 (структура равноосного типа)	BT8	360
	BT2	310
BT8 (пластинчатая микроструктура)	BT8	348
	BT2	295



Рисунок 1 – Структура сварных соединений сплава VT8, полученных с присадочными материалами различного состава (а – VT8; б VT2)

Из данных таблицы 1 видно, что предел выносливости сварных соединений ниже основного металла более чем на 30%. Причиной такого существенного снижения предела выносливости являлись структурные изменения.

Сплавы, полученные присадкой VT2, имели уровень предела выносливости в среднем на 20% ниже, чем сплавы полученные с более легированной присадкой (VT8). Это обусловлено различной структурой сварного шва, которая зависела от степени легированности присадочных материалов. Размер пластин в структуре сварного шва для присадок из α-титана составлял около 8 мкм, а в структуре сварного шва более легированных присадок не превышал 5 мкм (рисунок 2). Грубые выделения пластинчатой структуры, а также имеющая место оторочка α-фазы по границам первичных β-зерен являлись источниками образования трещин.

На основании результатов исследований установлено, что составы присадочных материалов не обеспечивают комплекса механических свойств сварных соединений жаропрочных титановых сплавов на уровне 0,9 от основного металла. Для повышения свойств необходима разработка составов присадочных материалов, которые позволят формировать необходимый тип и размер структурных составляющих в металле сварных швов жаропрочных титановых сплавов с минимально возможным количеством дефектов.

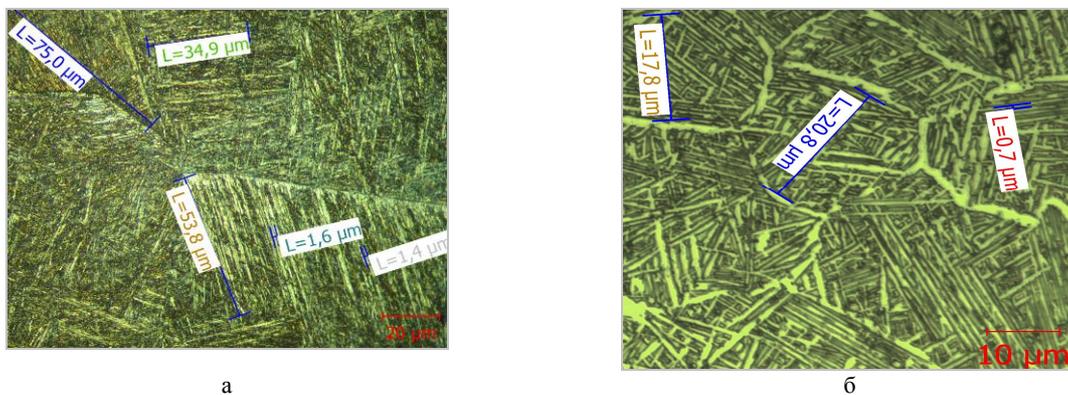


Рисунок 2 – Микроструктура сварного шва соединений из сплава VT8 с присадками, 500<sup>×</sup>  
а – присадка VT2; б – присадка VT8

Разрушение образцов при циклических нагрузках имело смешанный характер и происходило по межкристаллитному и транскристаллитному механизмам (рисунок 3). При исследовании микрорельефа поверхностей разрушения установлено, что разрушение образцов происходило вдоль α – пластин, (рисунок 3 а, б). Как следует из анализа фрактограмм поверхности разрушения сварных пластин, размер «бороздок» при продвижении трещины и образовавшиеся при этом сколы, имели ширину около 5 мкм. Это соответствовало толщине пластин α-фазы в структуре сварного шва. В ряде случаев очагами зарождения трещин являлись микропоры (рисунок 3 в, г).

Для обеспечения в сварных швах титановых сплавов необходимого уровня механических свойств следует формировать в них конкретный тип структуры с определенным размером структурных составляющих. Структуру металла сварного шва необходимо приблизить к равноосному, пластинчатому или бимодальному типам.

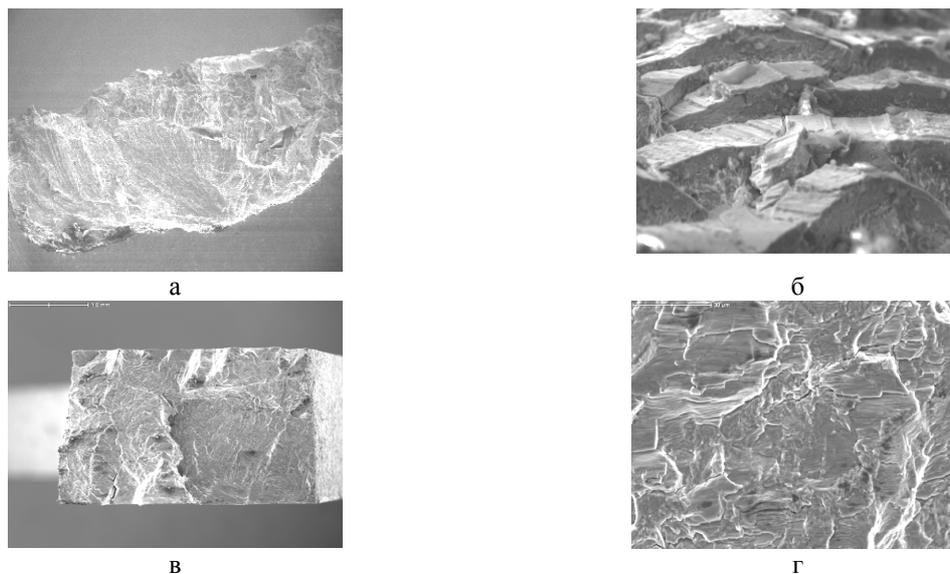


Рисунок 3 – Характерное разрушение образцов после МнЦУ сварных соединений сплава VT8 с присадкой того же состава (VT8).  
а, в – 35 $\times$ ; б, г – 2000 $\times$

Для решения поставленной задачи предложено в состав присадочных материалов вводить модифицирующие элементы (La, Y, B). Из анализа микроструктур выплавленных слитков установлено, что сплавы с повышенным содержанием иттрия образуют пластинчатую внутризеренную структуру с разной ориентировкой пачек  $\alpha$ -пластин толщиной около 1 мкм.

Высокое содержание лантана и бора до 0,26% и до 0,10% соответственно способствовало образованию равноосных первичных  $\beta$ -зерен размером около 20 мкм. Получены регрессионные зависимости влияния модификаторов в присадочных материалах на уровень механических свойств сварных соединений сплава VT8. Из анализа полученных зависимостей установлено, что при повышении содержания лантана с 0 до 0,25% имело место повышение уровня предела прочности с 885 МПа до 1040 МПа, а предела выносливости с 270 до 460 МПа. Анализ характера разрушения сварных соединений показал, что механизм влияния лантана и бора на прочность складывался из изменения типа структуры с пластинчатой на равноосную, уменьшения размеров первичных  $\beta$ -зерен и аннигиляции негативного влияния  $\alpha$ -оторочки, что обусловило повышение энергии разрушения сварных соединений (рисунок 4).

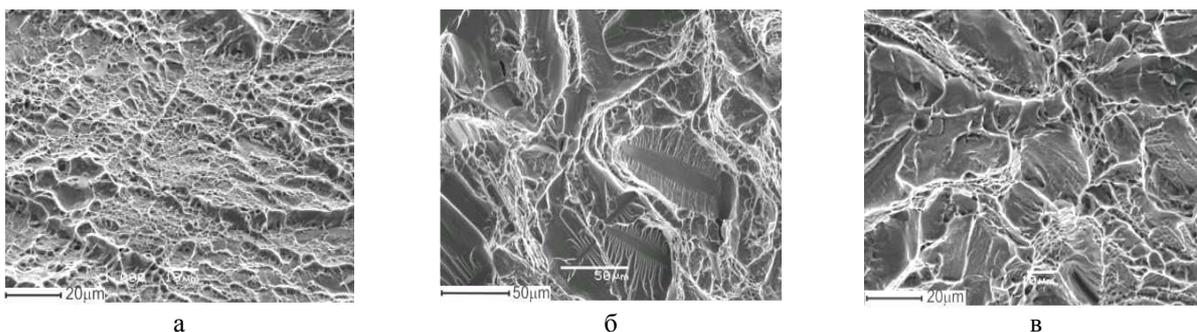


Рисунок 4 – Поверхности разрушения сварных швов сплава VT8, полученных опытными присадочными материалами  
а – Ti-основа, 3,4% Al, 0,20% La, 0,02% Y, 0,02% B; б – Ti-основа, 3,6% Al, 0,05% La, 0,02% Y, 0,09% B;  
в – Ti-основа, 3,7% Al, 0,06% La, 0,09% Y, 0,01% B

Угол загиба повысился с 61,5 до 70 градусов, а относительное удлинение с 5,3% до 6,0%. Лантан, оказал негативное влияние на ударную вязкость, которая снизилась с 0,40 МДж/см<sup>2</sup> до 0,18 МДж/см<sup>2</sup> при допустимых значениях для сплава VT8  $\geq 0,2$  МДж/см<sup>2</sup>. Снижение показателя ударной вязкости связывали с меньшим сопротивлением дисперсной структуры развитию трещины. Бор при содержании до 0,04% действовал на механические свойства сварных соединений аналогично лантану. Однако при содержании более 0,04% уменьшал уровень прочностных свойств как при статических так и при циклических нагрузках. Угол загиба при этом уменьшался с 62 град до 28 град, ударная вязкость снизилась до 3 раз. Причиной снижения механических свойств являлось образование в сварном шве хрупкой структурной

составляющей – эвтектики TiV. При увеличении содержания иттрия до 0,08% установлено повышение уровней предела прочности и предела выносливости с 885 МПа до 980 МПа и с 260 до 390 МПа соответственно. Ударная вязкость при увеличении содержания иттрия до 0,08% возросла с 0,40 МДж/см<sup>2</sup> до 0,57 МДж/см<sup>2</sup>, что являлось следствием повышения энергии разрушения металла сварного шва в результате образования тонкодисперсной пластинчатой структуры. Таким образом, разработаны два состава присадочных материалов:

– **состав №1** (% мас.) основа – Ti, 3...4 Al, 0,125...0,20 La, 0,01...0,02 Y, 0,02...0,04V формирует в сварном шве структуру равноосного типа (рис. 5 а);

– **состав №2** (% мас.) основа –Ti, 3...4 Al, 0,01...0,10 La, 0,05...0,08 Y, 0,01...0,03 V формирует в сварных швах α + β – титановых сплавов структуру пластинчатого типа (рисунок 5б).

Для устранения дефектов сварного шва (пористость, включения, химическая и структурная неоднородность) разработаны принципиально новые присадочные материалы с субмикроструктурной (СМК) структурой [14, 15]. В результате ИПД имело место дробление включений, содержащих элементы Y и La (рисунок 6).

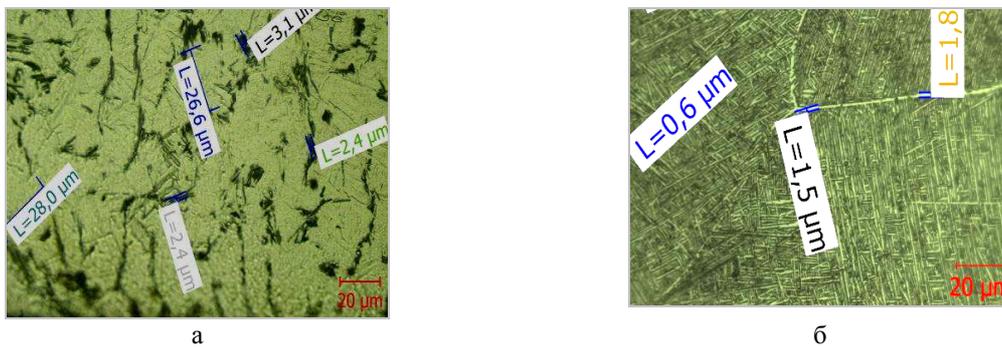


Рисунок 5 – Микроструктура сварных швов сплава VT8, полученных с применением присадочных материалов опытных составов: а – состав № 1; б – состав № 2

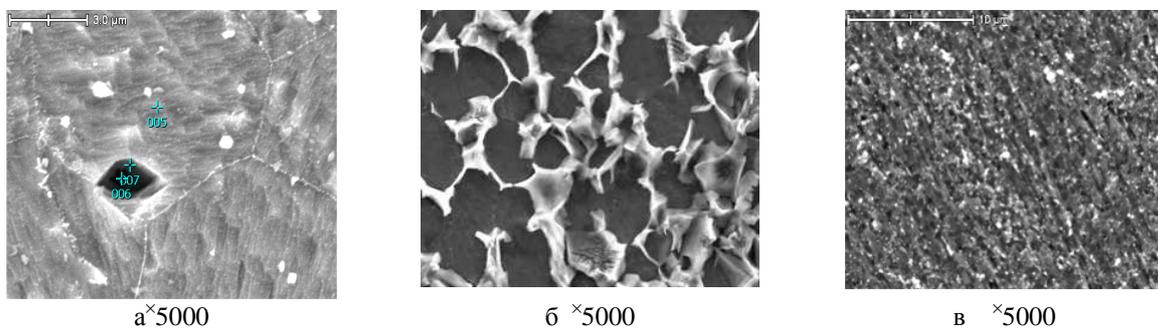


Рисунок 6 – Микроструктура присадочных материалов а – проволоки из титана VT2; б – прутка из сплава VT8; в – пруток титана VT2 с СМК структурой

Применение присадочных материалов опытных составов №1 и №2 с СМК структурой позволило повысить уровень механических свойств сварных соединений из сплава VT8 (таблица 2). Проведены циклические испытания по 4-й изгибной форме на натуральных лопатках и определены величины действующих в лопатке напряжений. Установлена область и величина (285 МПа) максимальных напряжений в лопатке.

Таблица 2 – Механические свойства сварных соединений жаропрочных титановых сплавов

Основной металл	Присадка	Механические свойства			
		$\sigma_{св}$ , МПа	$\delta_{св}$ , %	$\varphi_{св}$ , град	$\sigma_{-1св}$ , МПа
VT8	состав №1	1088	6,2	80	477
	состав №2	1010	5,5	68	440

Результаты исследований показывают, что подобное восстановление титановых деталей может производиться в автоматизированном режиме с применением технологий лазерного плавления титанового сплава в состоянии порошка. Для дальнейшего исследования возможности автоматизации

процесса восстановления деталей сложной геометрической формы требуется создание установки, позволяющей мониторить состояние изношенной детали, осуществлять позиционирование детали на столе и разработать технологию автоматизированного нанесения ремонтного порошка на поврежденные участки детали.

**Выводы.** Установлены зависимости влияния модификаторов на свойства сварных соединений жаропрочных титановых сплавов и разработаны два состава присадочных материалов (*состав №1* (% мас.) основа – Ti, 3...4 Al, 0,125...0,20 La, 0,01...0,02 Y, 0,02...0,04B; *состав №2* (% мас.) основа – Ti, 3...4 Al, 0,01...0,10 La, 0,05...0,08 Y, 0,01...0,03 B), обеспечивающие формирование в сварном шве структуры равноосного и пластинчатого типов. Формирование СМК структуры в присадочных материалах опытных составов №1 и №2 позволило повысить уровень механических свойств ( $\sigma_B$  – на 3%;  $\sigma_1$  – на 5%;  $\delta$  – на 7%;  $\varphi$  – на 8%).

#### *Библиографический список использованной литературы*

1. Иванова Л.А. Основы использования свариваемых псевдо-альфа-титановых сплавов в паротурбостроении / Л.А.Иванова, А.С.Кудрявцев, В.В.Травин// Титан. — 2011. — № 2. — С. 37–47.
2. Гейкин В.А. Технология производства двигателей нового поколения / В.А. Гейкин, Н.И. Шаронова // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2010. — № 3/2. — С. 11–13.
3. Муравьев В.И. Зеренная структура и твердость титанового сплава BT20 после электронно-лучевой сварки / В.И. Муравьев, В.А. Ким, А.А. Шпилева / МиТОМ. — 2008. — № 4 (634). — С. 40–43.
4. Кудрявцев А.С. Исследование характеристик вязкости разрушения высокопрочных свариваемых псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов применительно к изделиям морской техники / А.С. Кудрявцев, Д.А.Паночкин // Титан. — 2010. — № 2. — С. 9–15.
5. Beygelzimer Y. Grain refinement versus voids accumulation during severe plastic deformations of polycrystals: mathematical simulation // Y. Beygelzimer / Mechanics of Materials. — 2005. — № 37. — P. 753–767.
6. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытаний на малоцикловую усталость при термомеханическом нагружении: ГОСТ 25.505:1985. – [Срок введения с 1985-03-22]. — М.: Издательство стандартов, 1985. — 10 с. — (Государственный стандарт Союза ССР).

*Поступила в редакцию 11.01.2014 г.*

#### **Овчинков О.В., Фалалеев А.П., Мешков В.В., Сикавин Г.Н. Дослідження можливості ремонту високонавантажених деталей виготовлених із титанових сплавів**

Встановлено, що застосування серійних методів відновлення деталей газотурбінних двигунів із титанових сплавів веде до знижки механічних властивостей зварних з'єднань до 30%. Засноваю цього є структурні зміни та дефекти зварного шва. Розроблено модифіковані (La, Y та B) присадочні матеріали із титанових сплавів з субмікроструктурною структурою, які формують рівновісний та пластинчатий тип структури в зварних з'єднаннях титанових сплавів, що забезпечило в них механічні властивості на рівні 0,9 від базового металу.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, титанові сплави, зварні з'єднання, деформація, механічні властивості.

#### **Ovchinnikov A., Falaleev A., Meshkov V., Sikavin G. Investigation of repair possibility for highloaded parts produced from titan alloys**

It was found that the use of production methods to restore titanium parts of gas-turbine engines reduces the mechanical properties of welded joints by 30%, the reason for this is a structural change, as well as defects of the weld. Modified (La, Y and B) submicrocrystal welding consumables which form equiaxed and lamellar structure of welding consumables and ensure the mechanical properties level at 0.9 of ones in base metal has been worked out.

**Keywords:** gas-turbine engines, titanium alloys, welded joint, deformation, mechanical properties.