

УДК 621.762

П. Д. ЖЕМАНЮК¹, А. В. ОВЧИННИКОВ², Ю. Ф. БАСОВ¹, З. В. ЛЕХОВИЦЕР¹,
И. О. БЫКОВ¹, А. А. СКРЕБЦОВ², Д. В. ПАВЛЕНКО²

¹АО "МОТОР СИЧ", Запорожье, Украина

²Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

СИНТЕЗ СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Рассматриваются вопросы, связанные с особенностями технологии получения сложнолегированных, жаропрочных титановых сплавов методами порошковой металлургии. Показано, что синтез из смеси порошковых компонентов сплава, по химическому составу, соответствующему серийно применяемому для изготовления деталей ротора ГТД сплаву ВТ8, позволяет получать заготовки соответствующего химического состава. Приведенные результаты исследования состава, структуры и свойств опытного титанового сплава позволили установить, что после дополнительной деформационной обработки методами интенсивной пластической деформации синтезированных заготовок опытного титанового сплава и исследования механических характеристик при различных видах нагружения он может быть применен для изготовления деталей ГТД с низкой себестоимостью.

Ключевые слова: порошковая металлургия, сложнолегированный титановый сплав, состав, структура, свойства, интенсивная пластическая деформация.

Постановка проблемы и ее связь с практическими задачами

Производство деталей из титана и его сплавов методами порошковой металлургии (ПМ) является перспективным направлением в авиадвигателестроении [1 - 3]. На сегодняшний день акционерное общество «Мотор Сич», которое является одним из мировых лидеров в производстве ГТД, промышленно производит детали двигателей методами порошковой металлургии [4, 5]. К числу таких деталей относятся втулки, фланцы, кольца, крестовины и другие. Детали конструкционного назначения из порошкового титанового сплава 2М2А, с близким по механическим свойствам к литейному сплаву ВТ5Л-1, массой 0,002...0,65 кг, имеют механические свойства на уровне литых и штампованных заготовок. Эти детали работают в узлах таких двигателей самолетов и вертолетов как: Д - 36; АИ - 25; двигатель Д - 27; двигатель ТВЗ - 117 и др. с рабочей температурой до 350°C [5].

Повышение в последнее время спроса на коротко ресурсные ГТД и наличие двигателей, к которым выдвигаются требования по снижению себестоимости производства, определило необходимость внедрения ПМ в производство деталей из сложнолегированных, жаропрочных титановых сплавов. Наиболее актуальным применением методов ПМ приобретает для изготовления короткоресурсных ГТД беспилотных летательных аппаратов. Это связано с необходи-

мостью снижения их себестоимости, импортозамещения полуфабрикатов титановых сплавов, а также отличием требований по надежности и долговечности к короткоресурсным ГТД по сравнению с двигателями, используемыми в гражданской авиации.

Анализ исследований синтеза титановых сплавов из порошков

В конструкции компрессора ГТД применяют различные деформированные титановые сплавы типа ВТ3-1, ВТ6, ВТ8, ВТ8-1, ВТ25У и др. [6 - **Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Одним из сплавов, серийно широко применяемым для изготовления лопаток и дисков компрессора ГТД является деформируемый сплав ВТ8 [10, 10]. Сложная система легирования сплава обеспечивает ему оптимальное сочетание физических, механических свойств при различных видах нагружения, а также удовлетворительна обрабатываемость резанием и свариваемость. Однако наличие в составе сплава большого количества легирующих элементов предопределяет сложность его синтеза методами ПМ на всех этапах технологического процесса [11].

Согласно данным работ О. М. Ивасишина [1 - 3] синтез сложнолегированных титановых сплавов осложняется проблемами шихтоподготовки, плохой равномерностью распределения порошков легирующих элементов в порошке основного металла ввиду разной дисперсности порошковых мате-

риалов. В процессе синтеза из смесей, содержащих порошки легирующих элементов, необходимо получить на финальной стадии химически однородный сплав. Это условие является одним из основных для обеспечения высокого уровня механических, физических и служебных свойств синтезируемых сплавов. Также необходимо достичь полной гомогенизации при минимальных температурах и времени синтеза, что определяет экономическую эффективность процесса получения сплава. Так для получения спеченных легированных титановых сплавов, например ВТ8, одновременное присутствие легирующих элементов, стабилизирующие α - и β -фазы, определяет их взаимное влияние на перераспределение и торможение процессов химической гомогенизации системы. Различие в температурах плавления частиц порошков легирующих элементов также может приводить к образованию дополнительной пористости в процессе консолидации вакуумным спеканием. Окисление поверхности порошков титана и легирующих элементов приводит к увеличению доли растворенного кислорода, что способствует увеличению доли α -фазы в сплаве.

Таким образом, для получения заготовок жаропрочных титановых сплавов из порошков с заданным химическим и фазовым составом, свойствами и соответствующей нормативной документации структуре, требуется проведение ряда исследовательских работ, направленных на установления закономерностей влияния гранулометрического состава исходных порошков, структур и свойств заготовок с учетом фракции исходных материалов, химического состава и равномерности распределения примесных и легирующих элементов.

Целью настоящей работы являлась оценка возможности получения заготовок для деталей ГТД из сложнелегированного, жаропрочного титанового сплава ВТ8, в соответствии с требованиями нормативной документации методами ПМ. Основными задачами исследования являлись подготовка порошковой смеси, получение спеченной заготовки, а также исследования ее свойств и структуры.

Материалы и методы исследований

Химический состав серийного сплава ВТ8, получаемый по традиционной технологии многостадийного вакуумного переплава и последующей термомеханической обработкой, определен ОСТ190013-81 (табл. 1.), является определяющим при подборе требуемой марки порошкового титана (по примесям), который может использоваться для изготовления опытного сплава типа «ВТ8». Также для проведения синтеза титанового сплава типа «ВТ8» решен ряд технологических задач. Анализ

системы легирования показал, что изготовление спеченного титанового сплава ВТ8, удовлетворяющего требованиям по химическому составу и примесям, возможно при применении порошка титана марки ПТ5-2 ТУ 14-10-026-98 (табл. 2).

Таблица 1
Химический состав сплава ВТ8 % масс

Основные компоненты, %					
Ti	Al	Mo	Sn	Si	
основа	5,8 – 7,0	2,8 – 3,8	0,4 не более	0,2 – 0,4	
Примеси, % не более					
C	Fe	Zr	O	N	H
0,1	0,3	0,5	0,15	0,05	0,015

Таблица 2
Средний химический состав порошка титана ПТ5-2 ТУ У 14-10-026-98, (не более %, масс.)

Ti	Fe	Cl	N	O	C	Si
основа	0,2	0,08	0,05	–	0,03	0,04

В связи с тем, что фракционный состав порошка ПТ5-2 оказывает влияние на структуру и свойства спеченных заготовок, определяли влияние размера частиц порошков с целью оценки фракционного состава порошка ПТ5-2, который позволяет получать структуру опытного сплава ВТ8 близкую к структуре серийного сплава. Для обеспечения требований отраслевого стандарта по легирующим элементам проведены исследования на определение фракции и вида лигатур. В качестве легирующих элементов использовали порошки алюминия, молибдена, кремния, олова и циркония.

Смесь порошковых компонентов подготавливали путем механического перемешивания предварительно высушенного порошка в течении 4 ч. Порошковую шихту прессовали при усилии 800 МПа на гидравлическом прессе при комнатной температуре. Высокотемпературный синтез проводили в вакуумной печи сопротивления СНВЭ 1.3.1/16 при температуре 1250°C в течении 150 мин. Изготавливали опытные образцы размером 10×10×55 мм. Из полуфабрикатов спеченного титанового сплава изготавливали образцы для механических испытаний при одноосном растяжении. Пористость образцов определяли путем гидростатического взвешивания и анализа микрофотографий поверхности металлографских шлифов.

Химический состав контролировали по стандартным методикам. Металлографические исследо-

вания проводили на оптическом микроскопе «Neophot» и электронном JSM-6360LA. Распределение легирующих элементов изучали с приставкой для рентгеноспектрального энергодисперсионного анализа JED 2200.

Фазовый состав определяли путем рентгенофазового анализа на дифрактометр HZG-4. Использовали кобальтовый анод. Съемку выполняли в диапазоне углов $10...120^\circ$ с дискретностью $0,1^\circ$. Идентификацию фаз выполняли расчетным методом.

Для определения содержания в сплаве азота и кислорода применяли газоанализатор модели ON900 фирмы «ELTRA». Количественный анализ структурных элементов выполняли по плоскости микрофотографий с использованием специализированного программного комплекса ImagePro.

Результаты исследований и их обсуждение

Оценка химического состава опытного сплава показала, что он соответствует требованиям ОСТ 1 90013-81 к химическому составу жаропрочного сплава BT8 (табл. 3).

Таблица 3

Химический состав опытного сплава

Основные компоненты, %					
Al	Mo	Sn	Si	Zr	
6,0	3,8	0,2	0,04	0,5	
Примеси, % не более					
C	Fe	Cl	O	N	H
0,030	0,2	0,6	–	–	–

Для определения содержания азота и кислорода применяли газоанализатор модели ON900 фирмы «ELTRA».

Содержание кислорода и азота для синтезированного опытного сплава составляло 0,207% и 0,018% и фактически приближается к таковым для серийного сплава BT8 согласно ОСТ 1 90013-81. Для полного соответствия необходимо применять порошки титана с более низким содержанием кислорода.

Исследования микроструктуры серийного титанового сплава BT8 позволили установить, что она представляла собою зерна α - и β - фазы с характерной для деформированного прутка сплава BT8 текстурой деформации (рис. 1).

Микроструктура опытного сплава синтезированного из смеси порошковых компонентов представляла собой прослойки α - зерен в β - превращенном зерне (рис. 1б). В объеме образца опытного сплава присутствовали закрытые поры. Общая пористость образцов находилась в диапазоне 5...7%.

Количественный анализ размеров структурных элементов опытного сплава показал, что размер зерен опытного, спеченного титанового сплава был больше размера зерен серийного сплава BT8 на 40...50%. Такое различие в размерах структурных составляющих является технологической особенностью получения опытного сплава.



а



б

Рис. 1. Микроструктура прутка титанового сплава BT8 (а) и опытного спеченного сплава типа BT8 (б)

Результаты рентгенофазового анализа позволили подтвердить наличие в структуре опытного сплава α - и β - фаз (рис. 2). Также было установлено, что в опытном сплаве присутствует соединение оксида титана Ti_2O .

Исследование распределения легирующих элементов в опытном сплаве позволило установить отсутствие их ликваций во всем объеме образцов (рис. 3). Равномерное распределение легирующих элементов свидетельствует о протекании диффузионных процессов между частицами титана и легирующих элементов.

Для установления составов по структурным составляющим и получения полной картины по распределению химических элементов, содержание которых регламентировано требованиями ОСТа 1 90013-81, проводили исследования в структурных точках (рис. 4).

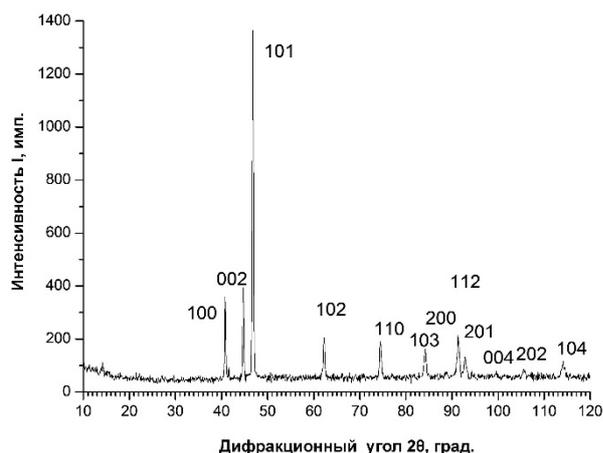


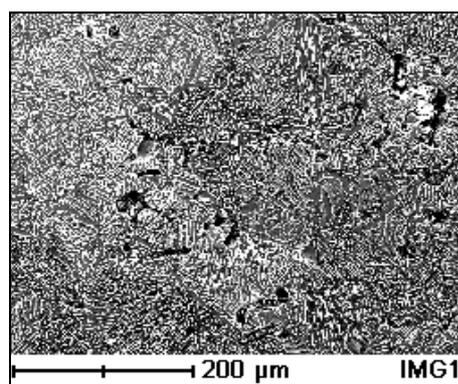
Рис. 2. Дифрактограмма опытного сплава

Анализ результатов измерений и их статистической обработки позволяет сделать вывод о соответствии химического состава требованиям ОСТ 1 90013-81. Распределение химических элементов в структурных составляющих в опытном сплаве определялось их растворимостью в фазах. Так алюминий в основном присутствует в α - фазе, в то время как молибден в β - фазе. Аналогичные закономерности присущи для остальных элементов, содержание которых в опытном сплаве не превышало 1%.

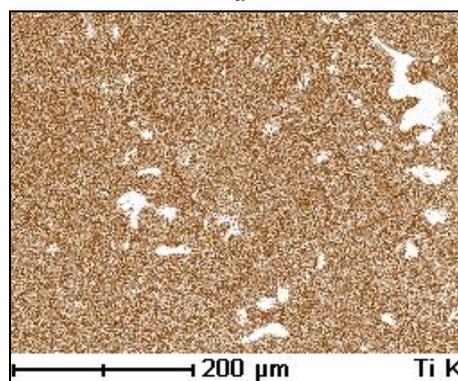
Испытана на прочность партия образцов, изготовленных из прутка серийного сплава BT8 и опытного сплава. Это позволило установить (табл. 4, 5), что средняя величина предела прочности опытного сплава ниже аналогичной величины для серийного сплава на 98 МПа (11%), относительное удлинение на 3,1 ед (58%), а относительное сужение на 14,8 ед (87%). Снижение уровня прочности и характеристик пластичности вероятно связано с наличием в структуре образцов пор, а также оксидов титана. Характеристики прочности для образцов из серийного сплава BT8 соответствовали требованиям ГОСТ 26492-85, которые закладывают при оценке прочностной надежности деталей ГТД.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

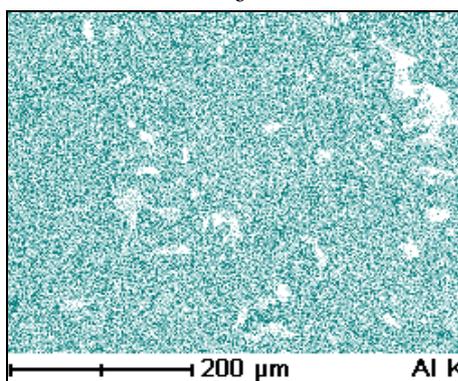
Результаты оценки состава, структуры и свойств опытного титанового сплава близкого к сплаву BT8 показали, что методами порошковой металлургии, путем синтеза из смеси порошковых компонентов, состоящей из порошков определенных фракций порошка ПТ5-2 и порошков легирующих элементов, возможно получение полуфабрикатов сложнолегированных титановых сплавов. При этом его химический состав определяется соотношением порошков титана и легирующих элементов и соот-



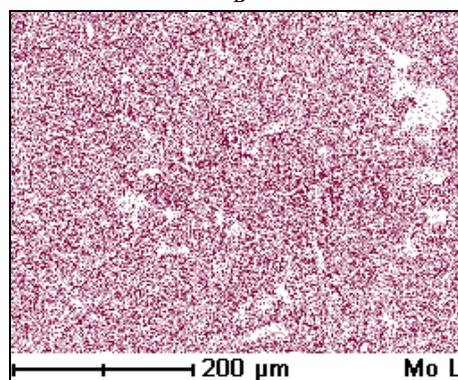
а



б



в



г

Рис. 3. Микроструктура (а) и карты распределения легирующих элементов в опытном сплаве: б – титан ; в – алюминий; г – молибден

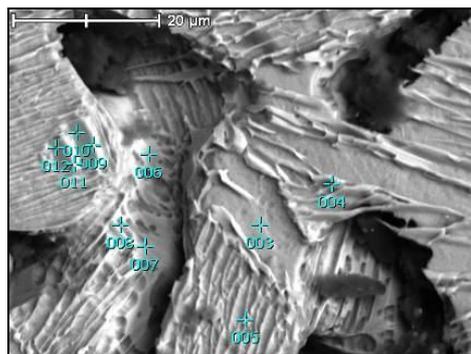


Рис. 4. Электронная микрофотография (а) и содержание элементов (б) в опытном сплаве

Таблица 4
Содержание легирующих элементов
в различных точках опытного сплава

№ точки	Содержание элемента, %					
	Al	Si	Ti	Zr	Mo	Sn
003	3,98	0,12	88,47	0,38	6,07	0,98
004	3,45	0,16	90,71	0	4,96	0,72
005	4,52	0,34	91	0,5	3,64	0
006	5,07	0,32	93	0,39	1,22	0
007	4,59	0,18	90,47	0	4,42	0,34
008	3,7	0,36	90,03	0,62	3,79	1,5
009	3,96	0,53	90,9	0,12	4,47	0,02
010	2,55	0,47	91,46	0,44	5,08	0
011	4,64	0,3	90,81	0,69	3,44	0,12
012	3,19	0,29	93,06	0,15	3,26	0,05
ср.знач	3,97	0,31	90,99	0,33	4,04	0,37
СКО	0,77	0,13	1,34	0,25	1,31	0,52

Прим.: ср.знач – среднее значение;

СКО – среднеквадратическое отклонение

Таблица 5
Механические свойства сплавов

Сплав	Предел прочности	Отн. удлинение	Отн. сужение
	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
Серийный ВТ8	951±9	7,2±0,2	17,0±0,5
Опытный	852±24	4,1±0,5	2,2±0,9

ответствует требованиям, предъявляемым к химическому составу сплава ВТ8. Режимные параметры операции синтеза порошков вакуумным спеканием обеспечивают протекание диффузионных процессов и равномерного распределения легирующих элементов по всему сечению образцов. При этом в образцах содержатся зерна как α -, так и β - фазы, однако их количественное соотношение требует дальнейшего уточнения. Основными отличиями опытного сплава от серийного сплава ВТ8 являются размеры зерен и наличие пор, что приводит к снижению уровня прочности и пластичности. Причиной сни-

жения пластичности сплава, вероятно, наряду с порами является повышенное содержание кислорода.

Таким образом, методами порошковой металлургии возможно получение полуфабрикатов сложнoleгированных титановых сплавов с низкой, по сравнению с традиционной технологией получения, себестоимостью. Однако изготовление из них ответственных деталей ГТД требует разработки мероприятий, по устранению ряда дефектов материала. Так, наличие пор недопустимо для деталей, работающих в условиях периодического нагружения, так как, являясь концентраторами напряжений, приведут к резкому снижению долговечности деталей.

Для устранения таких дефектов как увеличенный размер зерен, а также пористости спеченные полуфабрикаты титановых сплавов должны быть подвергнуты деформационной обработке. Учитывая их низкую пластичность и возможные структурно-фазовые превращения в процессе нагрева, наиболее рациональными методами деформационной обработки могут являться методы интенсивной пластической деформации. В ряде исследований показано, что применение, например, для спеченных из порошков титана, метода интенсивной пластической деформации винтовой экструзией [12 - 14] позволило устранить остаточную пористость в заготовках, сформировать субмикроструктурную структуру, и, таким образом, повысить прочность и пластичность заготовок. Обработка винтовой экструзией также позволит повысить технологическую пластичность сплава, что обеспечит возможность обработки лезвийным инструментом в широком диапазоне режимом резания [15], а также применение методов обработки давлением. За счет эффекта перемешивания и массопереноса, устранить локальные концентрации кислорода и других примесей [16]. Учитывая, что детали ГТД, например, лопатки компрессора и диски, в процессе эксплуатации подвергаются различным видам нагружения, для дальнейшего практического применения опытного сплава необходимо проведение широкого спектра исследований, направленных на его испытания при переменных и динамических нагрузках, циклической трещиностойкости и др.

Литература

1. Синтез сплава Ti-6Al-4V с низкой остаточной пористостью методом порошковой металлургии [Текст] / О. М. Ивасишин, Д. Г. Саввакин, Ф. Фроес [и др.] // Порошковая металлургия. – 2000. – № 7/8. – С. 54-64.
2. Ивасишин, О. М. Экономичная технология получения титановых деталей методом порошковой металлургии [Текст] / О. М. Ивасишин, А. П. Шнак, Д. Г. Саввакин. // Титан. – 2006. – № 1. – С. 31-39.

3. Производство титановых сплавов и деталей экономичным методом порошковой металлургии для широкомаштабного промышленного применения [Текст] / О. М. Ивасишин, Д. Г. Саввакин, К. А. Бондарева [и др.] // Наука та інновації. – 2005. – Т 1, № 2. – С. 44-57.

4. АО "МОТОР СИЧ". Годовой отчет за 2015 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.motorsich.com/files/630-GO-2015.pdf>. – 07.08.2016.

5. Исследование влияния режима спекания на свойства порошкового материала 2M2A [Текст] / З. В. Леховицер, И. А. Герасименко, Г. Я. Мирошниченко [и др.] // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. трудов. – Днепропетровск, ПГАСА. – 2009. – С. 12-16.

6. Богуслаев, В. А. Прочность деталей ГТД : научное издание [Текст] / В. А. Богуслаев, В. Б. Жуков ; 2-е изд., перераб. и доп. – Запорожье : ОАО "Мотор Сич", 2003. – 528 с.

7. Авиационно-космические материалы и технологии : учебник / В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, Н. Е. Калинина [и др.]. – Запорожье : ИК ОАО "Мотор Сич", 2007. – 382 с.

8. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД [Текст] : монография. Ч. 1. Лопатки компрессора и вентилятора / В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк [и др.]. – Запорожье, 2003. – 395 с.

9. Жаропрочные титановые сплавы для деталей ГТД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://viam.ru/ti_1 – 07.08.2016

10. Павлова, Т. В. Титановые сплавы для газотурбинных двигателей [Текст] / Т. В. Павлова, О. С. Кашапов, Н. А. Ночовная // Энциклопедический справочник. – 2012. – № 5. – С. 12-23..

11. Получение комплексных лигатур для синтеза сложнолегированных титановых сплавов методом порошковой металлургии [Текст] / Д. В. Павленко, А. В. Овчинников, С. И. Давыдов [и др.] // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. – Днепропетровск : ПГАСА. – Вып. 80. – 2015. – С. 235-240.

12. Pavlenko, D. V. Effect of Deformation by the Method of Screw Extrusion on the Structure and Properties of VT1-0 Alloy in Different States [Text] / D. V. Pavlenko, A. V. Ovchinnikov // Materials Science. – 2015. – Vol. 51, № 1. – P. 52-60.

13. Павленко, Д. В. Технологические методы уплотнения спеченных титановых заготовок [Текст] / Д. В. Павленко // Вестник двигателестроения – 2015. – №1 – С. 87-93.

14. Формирование субкристаллической структуры в сложнолегированных титановых сплавах [Текст] / Д. В. Павленко, А. В. Овчинников, А. Я. Качан [и др.] // Перспективные материалы. – 2009. – № 7. – С. 240-244.

15. Павленко, Д. В. Повышение технологической пластичности спеченных титановых сплавов [Текст] / Д. В. Павленко // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2015. – Вип. 15. – С. 1 – 14.

16. Pavlenko, D. V. Vortices in Noncompact Blanks During Twist Extrusion [Text] / D. V. Pavlenko,

Ya. E. Beygel'zimer // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2016. – P. 1-8.

Reference

1. Ivasishin, O. M., Ivasishin, D. G., Savvakina, F. F. Sintez splava Ti-6Al-4V s nizkoj ostatocnoju poristost'ju metodom poroshkovej metallurgii [Synthesis of the alloy Ti-6Al-4V with low residual porosity by powder metallurgy]. *Poroshkovaya metallurgiya*, 2000, no. 78, pp. 54-64.

2. Ivasishin, O. M., Shpak, A. P., Savvakina, D. G. Jekonomichnaja tehnologija poluchenija titanovykh detalej metodom poroshkovej metallurgii [Cost-effective technology for producing titanium components by powder metallurgy]. *Titan*, 2006, no. 1, pp. 31-39.

3. Ivasishin, O. M., Savvakina, D. G., Bondareva, K. A. Proizvodstvo titanovykh splavov i detalej jekonomichnym metodom poroshkovej metallurgii dlja shirokomasshtabnogo promyshlennogo primeneniya [Production of titanium alloys and components by powder metallurgy economical for large-scale industrial applications]. *Nauka ta innovatsii*, 2005, vol. 1, no. 2, pp. 44-57.

4. АО "МОТОР СИЧ". Годовой отчет за 2015 год [JSC Motor Sich. Annual Report 2015 Elektronnyi resurs]. Available at: <http://www.motorsich.com/files/630-GO-2015.pdf> (accessed 07.08.2016).

5. Lekhovitser, Z. V., Gerasimenko, I. A., Mirshnichenko, G. Ya., Bykov, I. O. Issledovanie vlijaniya rezhima spekanija na svojstva poroshkovogo materiala 2M2A [Investigation of the effect of the sintering conditions on the properties of the powder material 2M2A]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie : sb. nauch. trudov – Construction, materials science, mechanical engineering*. Dnepropetrovsk, PGASA Publ., 2009, pp. 12-16.

6. Boguslzev, V. A., Zhukov, V. B. *Strength GTE parts: scientific edition*, Zaporozh'e, ОАО Motor Sich Publ., 2003. 528 p.

7. Boguslaev, V. A., Kachan, A. Ja., Kalinina, N. E. *Aviacionno-kosmicheskie materialy i tehnologii* [Aerospace Materials and Technologies]. Zaporozh'e, Motor Sich Publ., 2009. 383 p.

8. Boguslaev, V. A., Muravchenko, F. M., Zhemanjuk, P. D. *Tehnologicheskoe obespechenie jekspluatacionnykh karakteristik detalej GTD. Ch. 1. Lopatki kompressora i ventiljatora* [Technological security performance turbine engine. Part 1. Compressor blades]. Zaporozh'e, ОАО Motor Sich Publ., 2007. 423 p.

9. *Zharoprochnye titanovyje splavy dlja deta-lej GTD* [Heat-resistant titanium alloys for turbine engine parts]. Available at: http://www.viam.ru/ti_1 (accessed 07.08.2016).

10. Pavlova, T. V., Kashapov, O. S., Nochovnaya, N. A. Titanovyje splavy dlja gazoturbinnykh dvigatelej [Titanium alloys for turbine engines]. *Entsiklopedicheskiy spravochnik*. 2012, no. 5, pp. 12-23.

11. Pavlenko, D. V., Ovchinnikov, A. V., Davydov, S. I., Skrebtsov, A. A. Poluchenie kompleksnykh ligatur dlja sinteza slozhnolegirovannykh titanovykh splavov metodom poroshkovej metallurgii [Preparation of complex ligatures for the synthesis of complex-titanium alloy powder]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie : sb. nauch. tr. – Construction, materials*

science, mechanical engineering. Dnepropetrovsk, PGASA Publ., 2015, vol. 80, pp. 235-240.

12. Pavlenko, D. V., Ovchinnikov, A. V. Effect of Deformation by the Method of Screw Extrusion on the Structure and Properties of VT1-0 Alloy in Different States. *Materials Science*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 52-60.

13. Pavlenko, D. V. Tehnologicheskie metody uplotneniya spechennykh titanovykh zagotovok [Technological methods of sealing the sintered titanium billets]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2015, no. 1, pp. 87-93.

14. Pavlenko, D. V., Ovchinnikov, A. V., Kachan, A. Ya. Formirovaniye subkristallicheskoj struktury v

slozhnolegированных titanium splavah [Formation subkristallicheskoj structure in the complex-titanium alloys]. *Perspektivnye materialy*, 2009, no. 7, pp. 240-244.

15. Pavlenko, D. V. Povysheniye tehnologicheskoy plastichnosti spechennykh titanium splavov [Increasing the technological plasticity of the sintered titanium alloys]. *Protsezi mekhanichnoi obrobki v mashinobuduvanni*, 2015, vol. 15, pp. 1-14.

16. Pavlenko, D. V., Beygel'zimer, Ya. E. [Vortices in Noncompact Blanks During Twist Extrusion]. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2016, pp. 1-8.

Поступила в редакцию 7.08.2016, рассмотрена на редколлегии 16.09.2016

СИНТЕЗ СКЛАДНОЛЕГОВАНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД

*П. Д. Жеманюк, О. В. Овчинников, Ю. Ф. Басов, З. В. Леховицер,
І. О. Биков, А. А. Скребцов, Д. В. Павленко*

Розглядаються питання, що пов'язані з особливостями технології одержання складнолегованих, жароміцних титанових сплавів методами порошкової металургії. Показано, що синтез із суміші порошкових компонентів сплаву, за хімічним складом, який відповідає серійно застосовуваному для виготовлення деталей ротору ГТД сплаву ВТ8, дозволяє одержувати заготовки відповідного хімічного складу. Наведені результати дослідження складу, структури і властивостей дослідженого титанового сплаву дозволили встановити, що після додаткової деформаційної обробки методами інтенсивної пластичної деформації синтезованих заготовок з титанового сплаву, що досліджують та дослідження механічних характеристик при різних видах навантаження він може бути застосований для виготовлення деталей ГТД із низькою собівартістю.

Ключові слова: порошкова металургія, складно легований титановий сплав, склад, структура, властивості, інтенсивна пластична деформація.

SYNTHESIS OF COMPLEX-TITANIUM ALLOYS FOR GTE PARTS

*P. D. Zhemanjuk, O. V. Ovchinnikov, Ju. F. Basov, Z. V. Lehovicer,
I. O. Bikov, A. A. Skrebcev, D. V. Pavlenko*

The questions related to the peculiarities of the technology of complexly, heat-resistant titanium alloys by powder metallurgy. It has been shown that the synthesis of a mixture of powder components of the alloy, the chemical composition of the corresponding series alloys for the manufacture of rotor components GTE alloy VT8 produces billet, respectively spending chemical composition. The results of studying the composition, structure and properties of titanium alloy experienced it possible to establish that after the additional deformation processing methods of severe plastic deformation experienced synthesized pieces of titanium alloy and research of mechanical characteristics for different types of load it can be applied to the manufacture of gas turbine engine parts at low cost.

Key words: powder metallurgy, complex-titanium alloy, composition, structure, properties, intensity plastic deformation.

Жеманюк Павел Дмитриевич – канд. техн. наук, главный инженер АО "МОТОР СИЧ", Запорожье, Украина.

Овчинников Александр Владимирович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. оборудования и технологии сварочного производства, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

Басов Юрий Федорович – зам. главного конструктора АО "МОТОР СИЧ", Запорожье, Украина.

Леховицер Зоя Васильевна – начальник бюро АО "МОТОР СИЧ", Запорожье, Украина.

Быков Игорь Олегович – ведущий инженер АО "МОТОР СИЧ", Запорожье, Украина.

Сребцов Андрей Андреевич – канд. техн. наук, доцент кафедры механики, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

Павленко Дмитрий Викторович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии авиационных двигателей, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина, e-mail: dvp_zntu@mail.ru.

Zhemanjuk Pavel Dmitrievich – PhD, chief engineer, JSC "Motor Sich".

Ovchinnikov Alexander Vladimirovich – doctor of sciences, prof., head of chair of Equipment and technology of welding production of Zaporizhzhya National Technical University.

Basov Jurij Fedorovich – deputy chief designer, JSC "Motor Sich".

Lekhovitser Zoya Vasilevna – head office, JSC "Motor Sich".

Bykov Igor Olegovich – leading engineer, JSC "Motor Sich".

Srebtssov Andrei Andreevich – PhD, associate professor of Mechanics chair of Zaporizhzhya National Technical University.

Pavlenko Dmytro Viktorovich – PhD, associate professor, docent, Zaporizhzhya National Technical University, Aircraft engines technologies department, e-mail: dvp_zntu@mail.ru.