

УДК 621.762:669.295:621.452.3

**В. А. БОГУСЛАЕВ<sup>1</sup>, Ю. Ф. БАСОВ<sup>1</sup>, И. О. БЫКОВ<sup>1</sup>,  
А. В. ОВЧИННИКОВ<sup>2</sup>, З. В. ЛЕХОВИЦЕР<sup>1</sup>**<sup>1</sup> АО "МОТОР СИЧ", Запорожье, Украина<sup>2</sup> Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

## ИМПЛЕМЕНТАЦИЯ МЕТОДОВ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ В ПРОЦЕССЫ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЖАРОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ ЛОПАТОК ГТД

Рассматриваются вопросы, связанные с улучшением экономичности производства авиадвигателей. В данном контексте при разработке новых двигателей наблюдается рост доли лёгких материалов таких, как жаропрочные титановые сплавы. Отмечено, что серийная технология изготовления таких сплавов довольно энергозатратна (двойной ВДП) и требует строгого контроля состава по примесям и равномерности их распределения в структуре. Для устранения недостатков серийной технологии предложено применение методов порошковой металлургии (ПМ). Анализ результатов исследования состава, структуры и физико-механических свойств опытного сплава типа ВТ8 показывает, что методами порошковой металлургии, возможно получение полуфабрикатов сложнолегированных титановых сплавов с контролируемым химическим составом после спекания. Механические свойства такого сплава являются приближенными к серийному сплаву ВТ8 и позволяют использовать опытный сплав типа ВТ8 как конструкционный материал. Отличием полученного сплава является наличие остаточной пористости и структура характерная для двухфазных спечённых титановых сплавов. Для приведения опытного сплава типа ВТ8 к требованиям нормативной документации (НД), проведено исследование по определению влияния деформационной обработки на его структуру и свойства.

**Ключевые слова:** титановые жаропрочные сплавы, лопатка, порошковая металлургия, спечённый сплав типа ВТ8, структура, остаточная пористость, деформационная обработка, микротвёрдость.

### Постановка проблемы и её связь с практическими задачами

В настоящее время сохраняется тренд на повышение требований к экономичности, как пилотируемых, так и беспилотных летательных аппаратов (ЛА), с неуклонным снижением массы конструкции планера, которая, например, для самолётов приближена к 26% от взлётной массы [1].

Такая тенденция актуальна и при разработке газотурбинных двигателей (ГТД), где повышение эффективности идёт двумя путями, это совершенствование конструкции и разработка и внедрение новых лёгких материалов с повышенными технологическими и экономическими свойствами. Так, наряду с алюминиевыми, магниевыми и композиционными материалами (КМ) одними из наиболее востребованных в конструкции авиадвигателей являются такие жаропрочные титановые сплавы, как ВТ3-1, ВТ8, ВТ9, ВТ20, ВТ25У и др. Согласно общим тенденциям при разработке новых двигателей доля таких сплавов в общем объёме деталей, в узлах и агрегатах продолжает расти. Это объясняется удачным комплексом физико-механических свойств, главны-

ми из которых является соотношение механических свойств к весу изделия. Одним из перечисленных сплавов, широко применяемым серийно для изготовления деталей со специальными служебными свойствами таких, как лопатки и диски компрессора ГТД на АО «Мотор Сич» является жаропрочный деформируемый сплав ВТ8 получаемый в виде прутков разного сортамента. Сложная система легирования сплава модификаторами изоморфными  $\alpha$  и  $\beta$  фазам (Al, Mo, Si, Zr) во время вакуумно-дугового переплава (ВДП) и последующая деформационная обработка обеспечивает ему оптимальное сочетание физических, механических свойств, при различных видах нагружения, а также удовлетворительную обрабатываемость резанием и свариваемость. Однако, серийная технология изготовления такого сплава довольно энергозатратна (двойной ВДП) и требует строгого контроля состава по легирующим элементам и примесям, и равномерности их распределения в структуре [2,3]. Значительные трудности представляет многоступенчатая деформационная обработка данного сплава из многотонных слитков необходимая для получения малогабаритных полуфабрикатов при производстве серийных лопаток. Как показано в ранее проведенных исследовани-

ях [4], преодоление указанных недостатков для изготовления такого рода сплавов, возможно с более широким применением методов порошковой металлургии (ПМ), что имеет технико-экономические преимущества. Однако для ПМ существуют и ограничивающие факторы, такие как: форма и масса-габаритные размеры заготовок (в значительной степени зависят от применяемого оборудования), особенности структуры сплавов после спекания (наличие остаточной пористости и её морфология), вопросы связанные с гомогенностью распределения легирующих элементов.

### Состояние вопроса

Ранее в рамках НИОКР на «Проведение комплекса конструкторско-технологических исследований для производства лопаток ГТД из титановых сплавов на основе методов порошковой металлургии и интенсивной пластической деформации» проведен комплекс исследований состава, структуры и свойств опытного титанового сплава типа ВТ8.

Анализ результатов показал, что методами порошковой металлургии, путём синтеза из смеси порошковых компонентов, состоящей из порошков основы (порошковый титан марки ПТ5) и порошков легирующих элементов, возможно получение полуфабрикатов сложнелегированных титановых сплавов с контролируемым химическим составом после спекания, который соответствует требованиям, предъявляемым к химическому составу серийного сплава ВТ8. Также исследованы зависимости механических свойств от таких параметров, как удельное давление прессования, температура спекания и время выдержки при спекании. Режимные параметры операции синтеза порошков прессованием с последующим вакуумным спеканием обеспечивают протекание диффузионных процессов и равномерного распределения легирующих элементов по всему сечению образцов. Основными ожидаемыми отличиями опытного сплава от серийного сплава ВТ8 являются размеры структурных составляющих и наличие остаточной пористости, что приводит к некоторому снижению уровня прочности и пластичности.

Данный уровень физико-механических свойств позволяет использовать опытный спечённый сплав типа ВТ8, как конструкционный материал, для деталей, не испытывающих значительные ударные и циклические нагрузки в области рабочих температур, как для серийного сплава аналога [4].

Также отработано изготовление заготовок серийных лопаток с требуемым химическим и фазовым составом и приближенными к серийному спла-

ву ВТ8 физико-механическими свойствами при статических нагрузках. Для получения заготовок лопаток с регламентированной структурой и механическими свойствами, очевидно необходимо проведение дополнительной деформационной обработки спечённых заготовок из опытного сплава типа ВТ8.

### Цели и задачи проводимой работы

Поскольку технология производства спечённого сплава типа ВТ8, как показано в предыдущих исследованиях, имеет ограничения, не позволяющие в полной мере изготовить сплав аналога серийному материалу, то актуальной является проблема дальнейшей обработки изготавливаемых заготовок с применением существующих на предприятии серийных технологий формообразования лопаток. Таким образом, для имплементации опытной технологии изготовления заготовок лопаток из сложнелегированных спечённых сплавов методом (ПМ) в серийную технологию изготовления готовых изделий ответственного назначения со специальными служебными свойствами, необходимо проведение исследований по определению влияния деформационной обработки на структуру спечённого сплава типа ВТ8. Достижение этой цели лежит в контексте научно-производственных задач направленных на устранение остаточной пористости после спекания и приведение структуры и свойств сплава к требованиям, предъявляемым для серийного сплава ВТ8 согласно отраслевым норм и стандартам.

### Материалы и методы исследований

Для изготовления заготовок применён порошок титана марки ПТ5 в состоянии поставки в соответствии с ТУ У 14-10-026-98.

Для обеспечения требуемого химического состава прессовок в материал основы вводили легирующие элементы в виде порошков чистых металлов с последующим смешиванием по серийной технологии, применяемой на предприятии.

Компактирование выполняли односторонним прессованием в жёстких пресс-формах при комнатной температуре. Усилие прессования составляло 800 МПа.

Спекание выполняли в вакууме при температуре 1220...1280°C. Продолжительность изотермической выдержки, составляла 1...4 часа, охлаждение совместно с печью в вакууме.

Деформационная обработка осуществлялась на горячую, в области температуры составляющей порядка 0,75-0,95 температуры полиморфного превращения (ТПП) для опытного сплава типа ВТ8. Для

деформационной обработки применялась серийная оснастка.

Металлографическое исследование заготовок лопаток из опытного спечённого сплава типа BT8 прошедших деформационную обработку выполняли на микроскопе JSM-6360LA на неподвижных шлифах в продольном направлении.

Контроль распределения основных легирующих элементов в деформированной заготовке определяли на многоцелевом растровом микроскопе JSM-IT300LV с системой рентгеноспектрального энергодисперсионного микроанализа (РСМА) X-Max 80.

Испытания механических свойств опытного спечённого порошкового титанового сплава типа BT8 после деформационной обработки и серийного сплава BT8 в деформированном состоянии осуществляли сравнительным способом на микротвёрдомере LECO LM-248AT с системой автоматического измерения твёрдости АМН-43. Замер микротвёрдости HV выполнен по ГОСТ 9450-76 при комнатной температуре с прилагаемым усилием 0,5 МПа на индентор в виде правильной квадратной алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями  $136^\circ$  и с выдержкой усилия 15 с, на шлифованных и полированных теплетях. Места замера конгруэнтны, шлифы для замера твёрдости изготовлены в продольном направлении.

## Результаты исследований и их обсуждение

Оценка химического состава опытного сплава после спекания показала соответствие требованиям ОСТ 1 90013-81 предъявляемым к химическому составу жаропрочного сплава BT8 (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав опытного сплава типа BT8

Основные компоненты, %			
Al	Mo	Si	Zr
6,2	3,7	0,3	0,3

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

Содержание кислорода и азота для синтезированного опытного сплава составило менее 0,2 % и 0,02 % соответственно и фактически приближается к таковым для серийного сплава BT8 ( $O_2 = 0,15\%$ ,  $N_2 = 0,05\%$  не более) согласно ОСТ 1 90013-81. Такая зависимость, с несколько завышенным содержанием кислорода отмечена и в предыдущих исследованиях [4], что указывает на повторяемость в технологических аспектах опытной технологии и регулируется применением порошков титана с более низким содержанием кислорода.

Ранее, металлографическим анализом установлено, что микроструктура опытного сплава синтезированного из смеси порошковых компонентов после спекания представляет собой игольчатые и мелко пластинчатые прослойки  $\alpha$  - зёрен в  $\beta$  - превращённом зерне с размером зёрен от 20 до 100 мкм и остаточной пористостью размером от 5 до 50 мкм [4].

После деформационной обработки по серийной технологии структура спечённого сплава типа BT8 претерпевает значительные изменения, происходит дробление зёрен, границы зёрен хорошо различимы в спечённом сплаве и остаточная пористости устраняются. Структура опытного сплава в центральной части пера (рис. 1, в) приобретает вид характерный для серийного деформированного сплава BT8 в не отожжённом состоянии в виде текстурированной  $\alpha$ - и  $\beta$ - фаз (рис. 2). Отмечено отсутствие остаточной пористости в переходной зоне от замка к перу и на всём протяжении пера (рис. 1, в, г), исключая кромку пера, в которой сконцентрированы некоторая часть остаточных пор (рис. 1, б). Также остаточная пористость частично сохраняется в опорной части основания замка (рис. 1, д). Эти отличия в пористости и структуре по сечению заготовки после деформации, очевидно, связаны с особенностями конструкции применяемой оснастки.

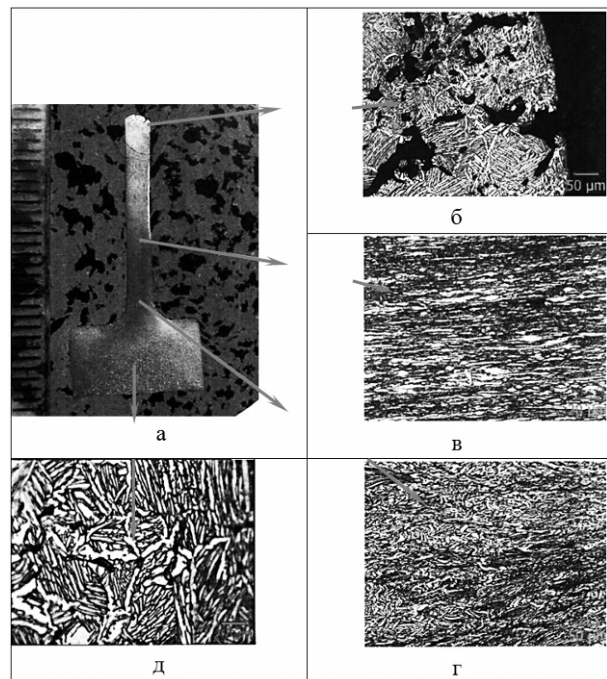


Рис. 1. Макроструктура (а) заготовки лопатки из опытного спечённого сплава типа BT8 после деформационной обработки и характерные микроструктуры в травлёном состоянии в «зона 1» – в торце пера (б); «зона 2» – в середине пера (в); «зона 3» – в переходном участке от замка к перу (г); «зона 4» – опорная часть основания замка (д)

Для сравнения представлена микроструктура из заготовки лопатки серийного титанового сплава BT8 в продольном направлении после деформационной обработки. Структура образована  $\alpha$ - и  $\beta$ - фазами с типичной для деформированной заготовки лопатки из сплава BT8 текстурой деформации в неотожжённом состоянии, на что указывает характерное строение  $\beta$ - фазы (рис. 2).

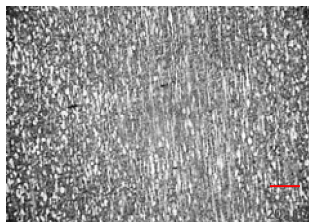


Рис. 2. Микроструктура заготовки лопатки из серийного сплава BT8 после деформационной обработки в неотожжённом состоянии

Некоторое отличие в размерах структурных составляющих опытного и серийного сплава, очевидно является следствием технологических особенностей получения опытного сплава после деформационной обработки. Это указывает на необходимость, подбора методики последующей термомеханической обработки микроструктуры опытного сплава в деформированном состоянии с приведением её к требованиям НД на серийный сплав BT8.

Для оценки качества распределения легирующих элементов по структурным составляющим спечённого сплава типа BT8 после спекания и деформационной обработки проведен рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) в режиме картирования (рис. 3 - 5).

Установлено, что структурные составляющие после деформационной обработки имели схожее с серийным сплавом распределение легирующих элементов, что подтверждает протекание диффузионных процессов после спекания в полном объёме. Также на это указывает отсутствие обесцвеченных участков (поры), которые характерны для спечённых сплавов не прошедших деформационную обработку [4].

Следовательно, можно сделать вывод, что распределение химических элементов в структурных составляющих в опытном сплаве определяется их растворимостью в фазах, алюминий в основном присутствует в  $\alpha$ - фазе, молибден в  $\beta$ - фазе, для остальных элементов, содержание которых в опытном сплаве не превышало 1 % (Si, Zr) присущи аналогичные закономерности.

Анализ результатов измерений и их статистической обработки позволяют сделать вывод о соответствии химического состава спечённого и про-

шедшего деформационную обработку опытного сплава типа BT8 требованиям ОСТ 1 90013-81.

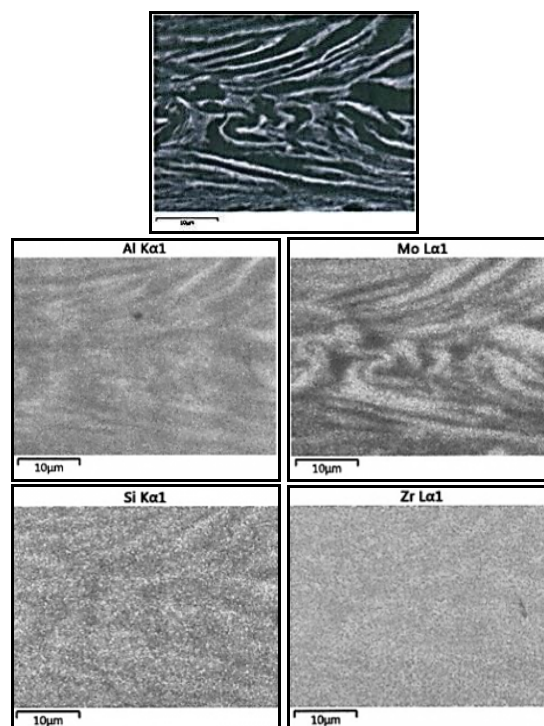


Рис. 3. Микроструктура и карты распределения легирующих элементов в опытном сплаве типа BT8, «зона 1» – в торце пера лопатки

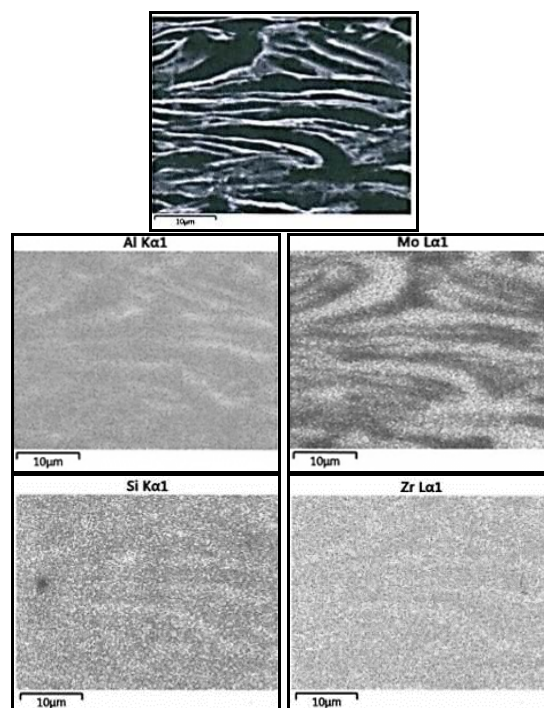


Рис. 4. Микроструктура и карты распределения легирующих элементов в опытном сплаве типа BT8, «зона 2» – в середине пера лопатки

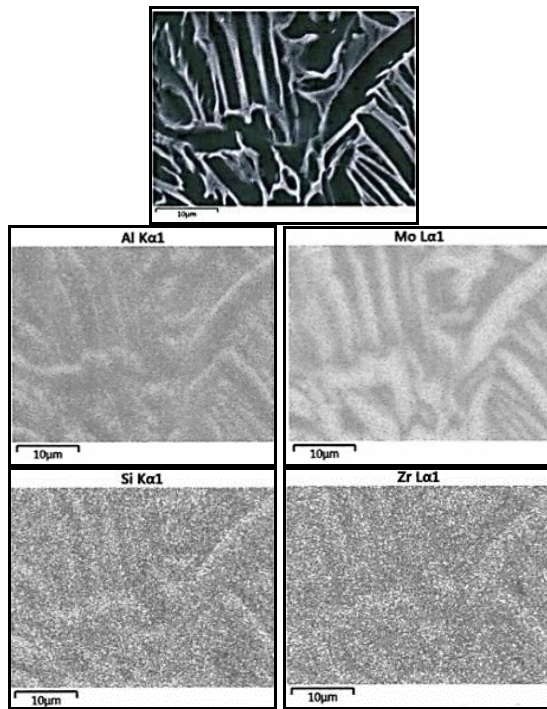


Рис. 5. Микроструктура и карты распределения легирующих элементов в опытном сплаве типа ВТ8, «зона 3» - в переходном участке от замка к перу

Проведенные испытания по определению микротвёрдости показывают, что введение дополнительной деформационной обработки, для спечённого опытного сплава типа ВТ8 приближает его к свойствам заготовок лопаток из серийного сплава ВТ8 после деформационной обработки в неотожжённом состоянии. В торце пера лопатки исключая дефектную зону твёрдость составила 390HV, в середине пера лопатки 408HV, в переходном участке от замка к перу 390HV (для опытного сплава типа ВТ8) против 320HV (для серийного сплава ВТ8).

Таким образом, анализ результатов оценки состава, структуры и свойств опытного титанового сплава типа ВТ8 позволили установить, что методами порошковой металлургии, путём синтеза из смеси порошковых компонентов, возможно получение полуфабрикатов сложнолегированных титановых сплавов, например, лопаток компрессора для газотурбинных двигателей.

Реализация процесса дополнительной деформационной обработки позволяет устранить остаточ-

ную пористость и сформировать структуру сплава сходную со структурой серийного сплава ВТ8 в неотожжённом состоянии. Это даёт основание рекомендовать технологию получения заготовок лопаток из опытного спечённого сплава типа ВТ8, для внедрения в серийное производство взамен импортных прутковых полуфабрикатов.

## Литература

1. *Технология производства титановых самолётных конструкций* [Текст] / А. Г. Братухин, Б. А. Колачев, В. В. Садков [и др.]. – М. : Машиностроение, 1995. – 448 с.
2. *Титановые сплавы. Плавка и литьё титановых сплавов* [Текст] / А. Л. Андреев, Н. Ф. Аношкин, К. М. Борзцовская [и др.]. – М. : Металлургия, 1978. – 384 с.
3. *Горьнин, И. В. Титан в машиностроении* [Текст] / И. В. Горьнин, Б. Б. Чечулин. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.
4. *Применение титановых порошков для производства деталей газотурбинных двигателей методами порошковой металлургии* [Текст] / В. А. Богуслаев, П. Д. Жеманюк, А. В. Овчинников, З. В. Леховицер, И. О. Быков. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2017. – № 9 (144). – С. 86-91.

## Reference

1. Bratuxin, A. G., Kolachev, B. A., Sadkov, V. V. [and other]. *Technologia proizvodstva titanovx samoletnix konstruykiy* [Technology of production titanium alloys in airplane constructions. All materials]. Moscow, Manufacturing Publ., 1995. 448 p.
2. Andreev, A. L., Anoshkin, N. F., Borzecovskaa, K. M. [and other]. *Titanove splavy. Plavka i litio titanovx splavov* [Titanium alloys. Fusion and founding titanium alloys. All materials]. Moscow, Metallurgy Publ., 1978. 384 p.
3. Gorynin, I. V., Chechulin, B. B. *Titan v mashinostroyenii* [Titan in manufacturing. All materials]. Moscow, Manufacturing Publ., 1990. 400 p.
4. Bogyslaev, V. A., Zhemanjuk, P. D., Ovchinnikov, A. V., Lekhovitser, Z. V., Bykov, I. O. *Primenenie titanovx poroshkov dla proizvodstva detaley metodami poroshkovoy metallurgii* [Application titanium alloys for production gas-turbine engine details of powder metallurgy technique]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2017, no. 9 (144), pp. 86-91.

Поступила в редакцию 15.05.2018, рассмотрена на редколлегии 27.07.2018

## ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ МЕТОДІВ ПОРОШКОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ ДО ПРОЦЕСІВ СЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА ЖАРОМІЦНИХ ТИТАНОВИХ ЛОПАТОК ГТД

**В. О. Богуслаєв, Ю. Ф. Басов, І. О. Биков, О. В. Овчинніков, З. В. Леховицер**

Розглянуті питання, які пов'язані з покращенням економічності виробництва авіадвигунів. В даному контексті при розробці нових двигунів спостерігається зростання частки легких матеріалів таких, як жаро-

міцні титанові сплави. Позначено, що серійна технологія виготовлення таких сплавів досить енерговитратна (подвійний ВДП) і потребує суворого контролю складу за домішками та рівномірності їх розподілу у структурі. Для усунення недоліків серійної технології запропоновано використання методів порошкової металургії (ПМ). Аналіз результатів дослідження складу, структури та фізико-механічних властивостей дослідного сплаву типу BT8 показує, що методами порошкової металургії можливо здобуття напівфабрикатів складно легованих титанових сплавів з контрольованим хімічним складом після спікання. Механічні властивості такого сплаву є наближеними до серійного сплаву BT8 і дозволяють використовувати дослідний сплав типу BT8 як конструкційний матеріал. Відмінністю отриманого сплаву є наявність залишкової пористості і структури, що характерна для двофазних спечених титанових сплавів. Для приведення дослідного сплаву типу BT8 до вимог нормативної документації (НД) здійснено дослідження по визначенню впливу деформаційної обробки на його структуру та властивості.

**Ключові слова:** титанові жароміцні сплави, лопатка, порошкова металургія, спечений сплав типу BT8, структура, залишкова пористість, деформаційна обробка, мікротвердість

## IMPLEMENTATION OF THE METHODS OF POWDER METALLURGY INTO PROCESSES OF SERIAL PRODUCTION OF THE GTE HEAT RESISTANT TITANIUM BLADES

*V. A. Boguslayev, Yu. F. Basov, I. O. Bykov, A. V. Ovchinnikov, Z. V. Lekhovitser*

The questions associated with improvement of efficiency of aircrafts and engines manufacture are considered. In the given context when new aircraft engines are developed, the growth of a share of easy materials such as heat resistant titanium alloys is observed. This is explained by successful complex of physical-mechanical properties, where the mechanical properties to weight ratio is the principal ones. It is noticed, that serial production's technology of such alloys has high power inputs (double vacuum arc re-melting) and requires a strict composition control of alloying elements, impurities and uniformity of their distribution in the ingot structure. Significant difficulties are attributed to multi-stage deformation processing of large-tonnage ingots from multi-doped titanium alloys, such as BT8 alloy. This processing is needed in the operation chain for obtaining the small-sized rod-shaped half-products for production of GTE series blades billets. For elimination the shortcomings of serial technology, such as a large number of operations, the application of the powder metallurgy methods (PM) with technical-economical advantages is offered. The analysis of research results of composition, structure and physical-mechanical properties of an experimental alloy as BT8 shows that it is possible to gain the half-finished products of multi-doped titanium alloys with controlled chemical composition after sintering by methods of powder metallurgy. Mechanical properties of such alloy are approximated to serial alloy BT8 and thus it is permitted to use the experimental alloy as BT8 as constructional material for components which are not subjected to impact and cyclic loadings at the work temperatures like for serial alloy prototype. Received alloy is differed by presence of residual porosity and structure typical for two-phase sintered titanium alloys. For reducing of experimental alloy as-BT8 to requirements of the normative documentation (ND) for serial alloy BT8 and further implementation, investigation of influence of deformation processing on its structure and mechanical properties was carried out.

**Keywords:** titanium heat-resistant alloys, blade, powder metallurgy, sintered alloy as BT8, structure, residual porosity, deformation processing, microhardness.

**Богуслаев Вячеслав Александрович** – д-р техн. наук, академик, президент АО "МОТОР СИЧ", Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Басов Юрий Фёдорович** – канд. техн. наук, главный конструктор по серийным изделиям АО "МОТОР СИЧ", Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Быков Игорь Олегович** – аспирант, ведущий инженер АО "МОТОР СИЧ", Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Овчинников Александр Владимирович** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. оборудование и технологии сварочного производства Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: omelchenko15@ukr.net.

**Леховицер Зоя Васильевна** – канд. техн. наук, начальник бюро АО "МОТОР СИЧ", Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Boguslayev Vyacheslav Alexandrovich** – Doctor of Technical Science, Academician, President of "Motor Sich" JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Basov Yuriy Fedorovich** – Candidate of Technical Science, Chief Designer of Serial Production, "Motor Sich" JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Bykov Igor Olegovich** – PhD student, Leading Engineer, "Motor Sich" JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Ovchinnikov Alexander Vladimirovich** – Doctor of Technical Science, Professor, Head of Chair of Equipment and Technology of Welding Production of Zaporizhzhya National Technical University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: melchenko15@ukr.net.

**Lekhovitser Zoya Vasilevna** – Candidate of Technical Science, Head Office, "Motor Sich" JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.