

УДК 621.762:669.295

В. А. БОГУСЛАЕВ<sup>1</sup>, П. Д. ЖЕМАНЮК<sup>1</sup>, А. В. ОВЧИННИКОВ<sup>2</sup>,  
З. В. ЛЕХОВИЦЕР<sup>1</sup>, И. О. БЫКОВ<sup>1</sup><sup>1</sup>АО "МОТОР СИЧ", Запорожье, Украина<sup>2</sup>Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

## ПРИМЕНЕНИЕ ТИТАНОВЫХ ПОРОШКОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДАМИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Рассматриваются вопросы, связанные с разработкой новой импортозамещающей технологией получения сложнолегированных, жаропрочных титановых сплавов методами порошковой металлургии. Показано, что изготовление деталей компрессора ГТД возможно путем синтеза сплава VT8 из смеси порошковых компонентов. Приведены результаты исследований состава, структуры и свойств опытного титанового сплава. Показано, что новая технология с применением порошков рационального состава позволяет получать спеченные сплавы по химическому составу соответствующие сплавам, получаемым по традиционной технологии переплава и деформационной обработки, с сопоставимыми значениями механических свойств, таких как предел прочности и твердость. При этом в отличие от ранее применяемой технологии, разработанная имеет ряд преимуществ: в условиях предприятия возможна полная реализация получения заготовок из порошковых смесей, коэффициент использования материала достигает 0,95 (для серийной технологии не превышает 0,35).

**Ключевые слова:** порошковая металлургия, титановый сплав, структура, прочность, пластичность, остаточная пористость, интенсивная пластическая деформация.

### Постановка проблемы и ее связь с практическими задачами

Изготовление титановых деталей авиационного назначения сопряжено с использованием прутковых заготовок разного сортамента. Вне зависимости от габаритных размеров этих заготовок их получение связано с выплавкой многотонных титановых слитков (рис. 1, а) и неоднократного переплава для обеспечения гомогенности химического состава. Масса слитков превышает 3,8 т. В тоже время в современном двигателестроении значительное количество деталей из титановых сплавов, изготавливаемых из прутковых заготовок, имеют небольшие габаритные размеры (рис. 1 а, б).

Таким образом, существует необходимость в оптимизации габаритных размеров получаемых заготовок с учетом реальных размеров конечных деталей. Поскольку по серийной технологии многократного вакуумного переплава повышение рентабельности производства связано с ростом, а не уменьшением веса слитков, то перспективным направлением является получение заготовок под малогабаритные детали газотурбинных двигателей (ГТД) (см. рис. 1 б) методом порошковой металлургии (ПМ) [1 – 3, 5].

В настоящее время значительную актуальность применение методов ПМ приобретает для изготовления короткоресурных ГТД беспилотных летательных аппаратов. Повышение эксплуатационных характеристик таких ЛА в значительной степени связано с необходимостью снижения их веса, а также отличиям требований по надежности и долговечности короткоресурных ГТД по сравнению с двигателями, используемыми в гражданской авиации.

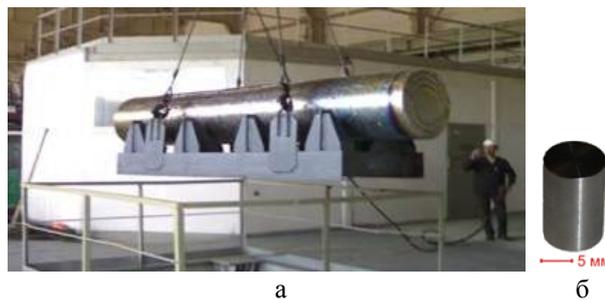


Рис. 1. Вид заготовок применяемых для производства деталей ГТД:  
а – титановый легированный слиток, весом 3,8 т изготавливаемый по традиционной технологии;  
б – малогабаритная заготовка, подготовленная под деформационную обработку методами ИПД для изготовления ответственных деталей со специальными эксплуатационными свойствами, вес готовой детали составляет 10...50 г

Также актуальны мероприятия, направленные на импортозамещение полуфабрикатов титановых сплавов, оказывающие положительное влияние на себестоимость всего изделия в целом.

На сегодняшний день акционерное общество «Мотор Сич» промышленно производит из отечественных порошков детали двигателей методами порошковой металлургии [4, 5]. К числу таких деталей относятся втулки, фланцы, кольца, крестовины и другие детали из серийного экономно легированного порошкового спеченного титанового сплава марки 2М2А изготавливаемые по схеме прессование с последующим спеканием. Поскольку порошковые спеченные сплавы подвержены такому явлению как остаточная пористость, в том числе и сплав 2М2А, этот фактор определил область применения, это детали конструкционного назначения с механическими свойствами близкими к таким сплавам как ВТ5Л или сплав ОТ4-1 и массой 0,002...0,65 кг. не испытывающие заметных ударных и циклических нагрузок. Детали изготовленные из сплава марки 2М2А работоспособны при температуре до 350°C [5]. Однако, для производства методом порошковой металлургии высоколегированных жаропрочных титановых сплавов, применяемых для роторных деталей ГТД, таких как ВТ8 [6, 7] требуется разработка интегрированной технологии, которая включала бы синтез сплава из порошков и последующую деформационную обработку.

Целью работы являлось разработать технологическую схему получения высоколегированных титановых сплавов методами порошковой металлургии в условиях производственных мощностей АО «Мотор Сич». Достижение поставленной цели лежит в контексте научно-производственных задач получения качественной титановой заготовки, соответствующей требованиям отраслевых норм и стандартов.

Таким образом, в настоящей работе решалась задача получения равномерного химического состава в заготовках из сплава типа ВТ8 синтезированного из порошков титана и легирующих элементов. Предметом проведенного исследования стала разработка и апробация технологии синтеза кремне содержащих титановых сплавов типа ВТ8 по химическому составу, удовлетворяющему требованиям ОСТ 1 90013 – 81 методами порошковой металлургии. Для достижения поставленной цели были решены задачи, связанные с оценкой гомогенности составов, а также уровня прочности синтезированного опытного сплава при статических нагрузках.

## Материалы и методы исследований

Химический состав серийного сплава ВТ8 получаемого по традиционной технологии многостадийного вакуумного переплава и последующей термомеханической обработкой (определяемый ОСТ 190013–81) использовали для подбора марки порошка титана (по примесям) и порошков легирующих элементов, для получения легированных спеченных заготовок типа ВТ8 (табл. 1).

Таблица 1  
Химический состав серийного сплава ВТ8  
(ОСТ 190013–81), % мас

Основные легирующие элементы, %					
Ti	Al	Mo	Sn	Si	
основа	5,8 – 7,0	2,8 – 3,8	≤0,4	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

Для изготовления прессовок применен порошок титана марки ПТ5 в состоянии поставки в соответствии с ТУ У 14-10-026-98. Фактический химический состав титанового порошка, обеспечивающий соответствие требованиям ОСТ 1 90013 – 81 по примесям приведен в табл. 2.

Таблица 2  
Химический состав титанового порошка марки ПТ5

Состав	Химический состав, %				
	Ti	Fe	Cl	N	Si
Пор. ПТ5	основа	0,1	0,055	0,02	0,03

Компактирование выполняли односторонним прессованием в жестких пресс-формах при комнатной температуре. Для обеспечения требуемого химического состава прессовок вводили легирующие элементы в виде порошков чистых металлов. 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.

Качество распределения основных легирующих элементов определяли путем рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) в режиме картирования. Металлографическое исследование образцов выполняли на микроскопе JSM-6360LA на неподвижных шлифах.

Механические свойства определяли на цилиндрических контрольных образцах диаметром 5 мм по ГОСТ 1497 – 84 (ИСО 6892 – 84). “МЕТАЛЛЫ. Методы испытаний на растяжение.” на универсальной машине INSTRON 8802 при комнатной температуре. Контрольные образцы изготавливали из заготовок размером 11×11×55 мм (рис. 2).

Проведен сравнительный анализ механических свойств опытного спеченного порошкового титанового сплава типа ВТ8 с механическими свойствами серийного сплава ВТ8 в деформированном состоянии (ГОСТ 26492-85).

Для сравнительного анализа испытывали по пять образцов изготовленных из опытного сплава типа ВТ8 и из прутков титана ВТ8 полученных по серийной технологии в состоянии поставки. Для определения твердости образцов использовали твердомер с автоматическим нагружением.

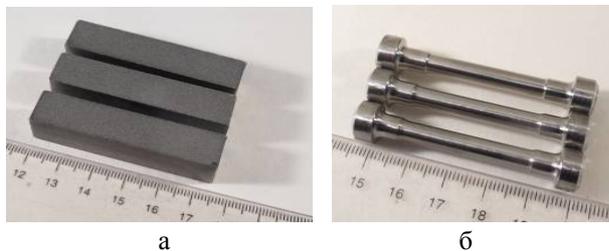


Рис. 2. Спеченные заготовки (а) и контрольные образцы для механических испытаний (б)

### Результаты исследований и их обсуждение

Оценка химического состава опытного сплава после спекания показала, что он соответствует требованиям ОСТ 1 90013-81 к химическому составу жаропрочного сплава ВТ8 (табл. 3).

Таблица 3

Химический состав опытного спеченного титанового сплава типа ВТ8

Основные компоненты, %					
Al	Mo	Sn	Si	Zr	
6,0	3,8	0,2	0,4	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 ВТ8 согласно ОСТ 1 90013-81.

Для полного соответствия необходимо применять порошки титана с более низким содержанием кислорода.

Исследования микроструктуры серийного титанового сплава ВТ8 позволили установить, что она представляла собою зерна  $\alpha$ - и  $\beta$ - фазы с характерной для деформированного прутка сплава ВТ8 текстурой деформации (рис. 3 а).

Микроструктура опытного сплава синтезированного из смеси порошковых компонентов представляла собой игольчатые и мелко пластинчатые прослойки  $\alpha$ - зерен в  $\beta$ - превращенном зерне (рис. 3 б) с размером зерен от 20 до 100 мкм. В объеме образца опытного сплава также присутствуют закрытые остаточные поры размером от 5 до 50 мкм. Такое различие структурных составляющих является следствием технологических особенностей получения опытного сплава типа ВТ8, и указывает на необходимость подбора методики устранения остаточной пористости с приведением микроструктуры опытного сплава к требованиям НД на серийный сплав ВТ8.



Рис. 3. Микроструктура прутка титанового сплава ВТ8 (а) и опытного спеченного порошкового сплава типа ВТ8 (б)

Для оценки качества распределения легирующих элементов по структурным составляющим серийного сплава ВТ8 (рис. 4) и синтезированного спеченного сплава типа ВТ8 (рис. 5) проведен рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) в режиме картирования.

Проведенный РСМА в режиме картирования показал (рис. 4), что структурные составляющие серийного сплава ВТ8 имели химический состав с равномерным распределением легирующих элементов без выраженной структуры зерна и межзеренных границ.

Проведенный РСМА опытного сплава типа ВТ8 в режиме картирования показал равномерное распределение легирующих элементов (рис. 5), что указывает на качественное протекание диффузионных процессов, обесцвеченные участки указывают на остаточные после спекания поры. Несмотря на достаточно равномерное распределение кремния, отмечено несколько мест в районе условно крупных

пор с его повышенным содержанием. Размер локаций кремния не превышает 20мкм.

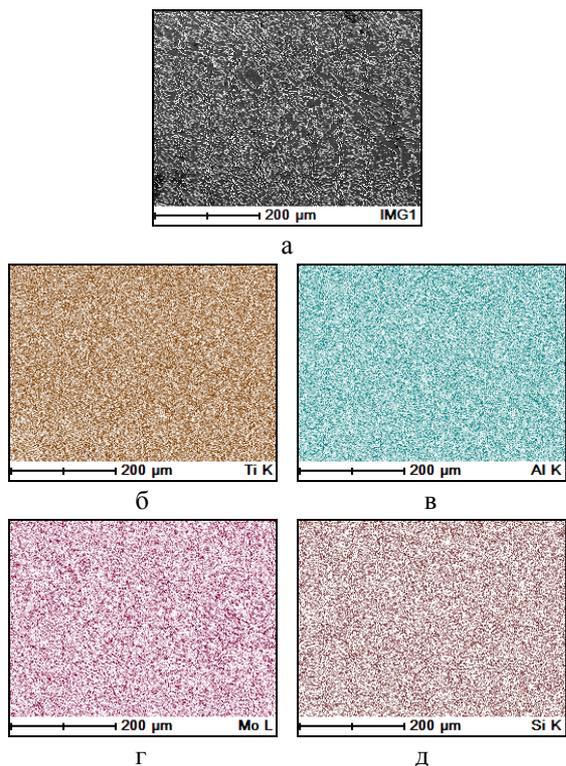


Рис. 4. Микроструктура (а) и карты распределения легирующих элементов в серийном сплаве VT8: б – титан; в – алюминий; г – молибден; д - кремний

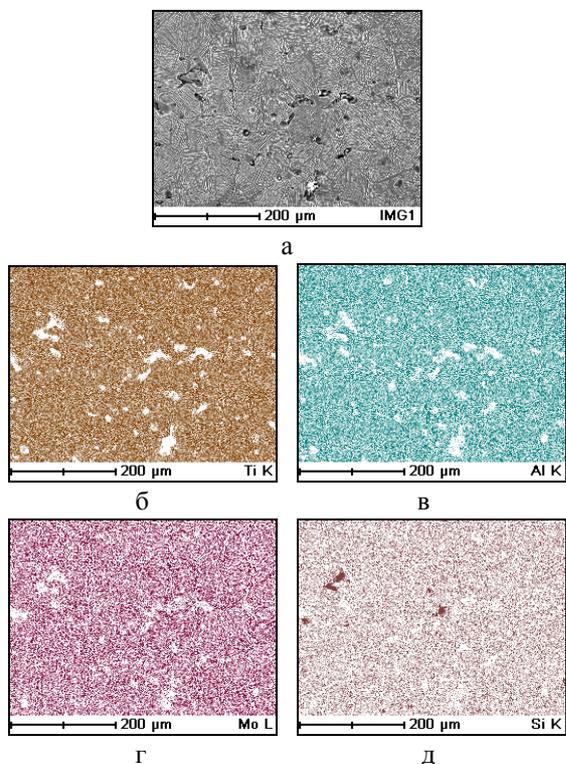


Рис. 5. Микроструктура (а) и карты распределения легирующих элементов в опытном сплаве типа VT8: б – титан; в – алюминий; г – молибден; д - кремний

Анализ результатов измерений и их статистической обработки позволил 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  $\alpha$ - фазе, в то время, как молибден в  $\beta$ - фазе. Аналогичные закономерности присущи для остальных элементов, содержание которых в опытном сплаве не превышало 1%.

Проведенные испытания на прочность партии образцов, изготовленных из прутка серийного сплава VT8 и опытного сплава типа VT8 позволили установить (табл. 4), 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 VT8 соответствовали требованиям ГОСТ 26492-85, которые закладывают при оценке прочностной надежности деталей ГТД.

Таблица 4  
Механические свойства сплавов

Сплав	Предел прочности	Отн. удлинение	Отн. сужение
	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Серийный VT8	951±9	7,2±0,2	17,0±0,5
Опытный спеченный сплав типа VT8	852±24	4,1±0,5	2,2±0,9

Таким образом, анализ результатов оценки состава, структуры и свойств опытного титанового сплава типа VT8 показали, что методами порошковой металлургии, путем синтеза из смеси порошковых компонентов состоящей из порошков основы (порошковый титан марки ПТ5) и порошков легирующих элементов, возможно получение полуфабрикатов сложнолегированных титановых сплавов. При этом его химический состав определяется соотношением порошков титана и легирующих элементов и соответствует требованиям, предъявляемым к химическому составу серийного сплава VT8. Режимные параметры операции синтеза порошков прессованием с последующим вакуумным спеканием обеспечивают протекание диффузионных процессов и равномерного распределения легирующих элементов по всему сечению образцов. В образцах содержатся зерна как  $\alpha$ - так и  $\beta$ - 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 снижения пластичности сплава, вероятно, наряду с порами является повышенное содержание кислорода. Такой уровень физико-механических свойств позволяет использовать опытный порошковый сплав типа ВТ8, как конструкционный материал для деталей не испытывающих ударные и циклические нагрузки в области рабочих температур как для серийного сплава. А для дальнейшего его применения в качестве конструкционного материала деталей ответственного назначения, работающих при сложных условиях нагружения, например, лопаток компрессора газотурбинных двигателей, очевидно требуется включение в технологический процесс операций интенсивной пластической деформации, направленных на устранение пористости, гомогенизации химического и структурного состояния, а также повышения технологической пластичности.

### 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. Шпак, 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. тр. ПГАСА. – Дн-вск. : ПГАСА, 2009. – Вып. 48, Ч. 3. – С. 12–16.

6. Жаропрочные титановые сплавы для деталей ГТД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://viam.ru/ti\\_1](http://viam.ru/ti_1). – 07.08.2016.

7. 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.

### Reference

1. Ivasishin, O. M., Savvakina, D. G., Froes, F. Sintez splava Ti-6Al-4V s nizkoy ostatochoy porestosty metodom poroskovoy metallurgiyi [Synthesis of the alloy Ti-6Al-4V with low residual porosity by powder metallurgy. Powder metallurgy]. *Poroskovaya metallurgiya*, 2000, no. 78, pp. 54–64.
2. Ivasishin, O. M., Shpak, A. P., Savvakina, D. G. Ekonomichnaya texnologiya polycheniya titanovx detaley metodom poroskovoy metallurgiyi [Cost-effective technology for producing titanium components by powder metallurgy. Titan]. *Titan Publ.*, 2006, no. 1, pp. 31–39.
3. Ivasishin, O. M., Savvakina, D. G., Bondareva, K. A. Proizvodstvo titanovx splavov i detaley ekonomichnm metodom poroskovoy metalyrgiyi dla sherokomastabnogo promshlennogo primeneniya [Production of titanium alloys and components by powder metallurgy economical for large-scale industrial applications. Science and innovations]. *Nauka ta innovatsii*, 2005, vol. 1, no. 2, pp. 44–57.
4. JSC Motor Sich. Annual Report 2015. Available at: <http://www.motorsich.com/files/630-GO-2015.pdf> (accessed 07.08.2016).
5. Lekhovitser, Z. V., Gerasimenko, I. A., Miroshnichenko, G. Ya., Bykov, I. O. Issledovanie vliyaniya regyama spekaniya na svoystva poroskovogo materiala 2M2A [Investigation of the effect of the sintering conditions on the properties of the powder material 2M2A. Civil construction, material science, machine building research works]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie : sb. nauch. Trudov*, Dn-vsk, PGASA, 2009, vol. 48, no. 3, pp. 12–16.
6. Heat-resistant titanium alloys for turbine engine parts. Available at: [http://viam.ruti\\_1](http://viam.ruti_1) (accessed 07.08.2016).
7. Pavlova, T. V., Kashapov, O. S., Nochovnaya, N. A. Titanovye splavy dla gazotyrbinnyx dvigateley [Titanium alloys for turbine engines. All materials]. *Entsiklopedicheskii spravochnik*, 2012, no. 5, pp. 12–23.

Поступила в редакцию 15.03.2017, рассмотрена на редколлегии 12.06.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А. А. Митяев, Запорожский национальный технический университет, Запорожье.

**ЗАСТОСУВАННЯ ТИТАНОВИХ ПОРОШКІВ  
ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ  
МЕТОДАМИ ПОРОШКОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ**

*В. О. Богуслаєв, П. Д. Жеманюк, О. В. Овчинников, З. В. Леховицер, І. О. Биков*

Розглянуто питання, пов'язані із розробкою нової імпортозамінюючої технології отримання складнолегованих, жароміцних титанових сплавів методами порошкової металургії. Показано, що виготовлення деталей компресора ГТД можливо шляхом синтезу сплаву BT8 із суміші порошкових компонентів. Наведені результати дослідження складу, структури та властивостей дослідного титанового сплаву. Показано, що нова технологія із застосуванням порошків раціонального складу дозволяє отримувати спечені сплави за хімічним складом відповідні сплавам що отримуються за традиційною технологією перетоплення та деформаційної обробки, із співставними значеннями механічних властивостей, таких як межа міцності та твердість. При цьому, на відміну від раніше застосовуємої технології, розроблена має ряд переваг: в умовах підприємства можлива повна реалізація отримання заготовок із порошкових сумішей, коефіцієнт використання матеріалу досягає 0,95 (для серійної технології не перевищує 0,35)

**Ключеві слова:** порошкова металургія, титановий сплав, структура, міцність, пластичність, залишкова пористість, інтенсивна пластична деформація.

**APPLICATION OF TITANIUM POWDERS FOR PRODUCTION  
OF GAS-TURBINE ENGINE COMPONENTS BY TECHNIQUES  
OF POWDER METALLURGY**

*V. A. Boguslayev, P. D. Zhemanjuk, A. V. Ovchinnikov, Z. V. Lekhovitser, I. O. Bykov*

Questions related to investigation of new import substitution technology of complex doped, heat-resistant titanium alloys production by methods of powder metallurgy are considered. It is demonstrated that production of GTE compressor components is possible by means of synthesis BT8 alloy of powder blends. The results of composition, structure and properties of experimental titanium alloy are given. It is shown that new technology with use of the powder with efficient composition makes possible to obtain sintered alloys adequate to traditional technology of remelting and deformation treatment in chemical composition. Also, this technology has comparable values of mechanical properties such as ultimate strength and hardness. Besides, the new technology as opposed to earlier applied one has series of advantages: in the plant it is possible the overall realization of billets production of powder blends; use factor of the material reaches 0.95 (in serial technology do not exceed 0.35).

**Keywords:** powder metallurgy, titanium, titanium alloy, structure, strength, ductility, residual porosity, severe plastic strain.

**Богуслаєв Вячеслав Александрович** – д-р техн. наук, академик, президент АО "МОТОР СИЧ", Запорожжє, Україна.

**Жеманюк Павел Дмитриевич** – канд. техн. наук, главный инженер АО "МОТОР СИЧ", Запорожжє, Україна.

**Овчинников Александр Владимирович** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. оборудование и технологии сварочного производства Запорожского национального технического университета, Запорожжє, Україна.

**Леховицер Зоя Васильевна** – канд. техн. наук, начальник бюро АО "МОТОР СИЧ", Запорожжє, Україна.

**Биков Игорь Олегович** – ведущий инженер АО "МОТОР СИЧ", Запорожжє, Україна, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Boguslayev Vyacheslav Alexandrovich** – Doctor of Technical Science, Academician, President of "Motor Sich" JSC, Zaporozhye, Ukraine.

**Zhemanjuk Pavel Dmitrievich** – Candidate of Technical Science, Chief Engineer, "Motor Sich" JSC, Zaporozhye, Ukraine.

**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.

**Lekhovitser Zoya Vasilevna** – Candidate of Technical Science, Head Office, "Motor Sich" JSC, Zaporozhye, Ukraine.

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