

УДК 67.02: 62-253.5

**Павленко Д.В.**

Запорожский национальный технический университет. Украина, г. Запорожье

**АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ СХЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ ДЛЯ ЛОПАТОК ГТД МЕТОДАМИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

*Рассмотрены альтернативные схемы построения технологического процесса получения деформированных полуфабрикатов титановых сплавов для лопаток газотурбинных двигателей на основе методов порошковой металлургии. На основании качественного и количественного анализа процессов протекающих на основных операциях, определена оптимальная, с точки зрения получения качественных полуфабрикатов при минимальных энергосиловых затратах, схема построения технологического процесса.*

*Ключевые слова:* порошковая металлургия; технологический процесс; интенсивная пластическая деформация; титановый сплав; полуфабрикат; заготовка; лопатка; метод экспертных оценок

В современных экономических условиях важным фактором успешного развития отечественного авиадвигателестроения является надежное обеспечение качественными и недорогими материалами. Несмотря на высокие характеристики прочности и стойкости к коррозии, титановые сплавы имеют ряд существенных недостатков. В первую очередь к ним следует отнести высокую стоимость, которая связана с особенностями технологии получения.

Принимая во внимание большой объем титановых сплавов, используемых в конструкции современных газотурбинных двигателей (ГТД), а также учитывая, что на сегодняшний день в Украине нет полного замкнутого цикла производства титановых полуфабрикатов, разработка и исследование ресурсосберегающей технологии получения титановых полуфабрикатов и изготовления из них нагруженных деталей ГТД является актуальной задачей авиадвигателестроения.

Для деталей ГТД изготавливаемых из титановых сплавов, например лопаток компрессора, наиболее эффективным путем снижения себестоимости является совершенствование технологического процесса на этапе изготовления полуфабрикатов из исходного сырья.

В настоящее время отечественными и зарубежными исследователями развиваются несколько путей снижения стоимости получения титановых полуфабрикатов для авиационной техники. Основными из наиболее перспективных из них являются технологии, основанные на применении традиционных методов порошковой и гранульной металлургии [1-5]. Анализ технических и экономических аспектов технологий получения заготовок из титановых сплавов для лопаток ГТД показал, что с

точки зрения себестоимости получения, наименее ресурсозатратной является технология, основанная на синтезе полуфабрикатов легированных титановых сплавов из порошковой смеси дисперсных порошков и их последующей интенсивной пластической деформации (ИПД) [6, 7].

Получение заготовок из дисперсных металлических порошков позволяет существенно сократить их стоимость по сравнению с заготовками из сортового проката, а также литыми заготовками. Однако, основными препятствиями к активному внедрению методов порошковой металлургии в авиадвигателестроении, для изготовления нагруженных деталей ротора ГТД, является высокая, по сравнению с компактными материалами, остаточная пористость и ликвации легирующих элементов, приводящие к снижению комплекса функциональных свойств изделий.

Целью настоящей работы являлся качественный и количественный анализ альтернативных технологических схем получения деформированных полуфабрикатов титановых сплавов для лопаток ГТД из металлических порошков.

Разрабатываемая технология основана на уплотнении порошковых заготовок жаропрочных титановых сплавов, гомогенизации легирующих элементов и формирования высокого уровня функциональных свойств, получившим в последнее время широкое распространение методом ИПД винтовой экструзией. Традиционно методы ИПД используются для формирования в заготовке субмикроструктурной структуры и таким образом, повышения уровня свойств [8, 9]. В то же время процессы, протекающие в материале при ИПД, являются перспективными для уплотнения и



устранения дефектов в порошковых и пористых заготовках [10-14].

Технология получения компактных полуфабрикатов из титановых сплавов на основе методов порошковой металлургии включает следующие основные этапы:

- подготовка порошковой смеси;
- получение легированных прессовок (порошковых тел);
- спекание прессовок (получение пористых тел);
- гомогенизация легирующих элементов, устранение ликваций легирующей элементов;
- устранение остаточной пористости методами ИПД путем захлопывания пор;
- устранение дефектов (микрофлокенов) методами ИПД путем заваривания;
- повышение комплекса функциональных свойств полуфабрикатов методами ИПД путем формированием субмикроструктурной структуры (СМК).

Изготовление из полуфабрикатов деталей ГТД например, таких как рабочие лопатки компрессора, реализуется по традиционной схеме технологического процесса, включающего этапы механической обработки для формообразования аэродинамических поверхностей, термической и отделочно-упрочняющей обработки.

Отмеченные этапы перспективной ресурсосберегающей технологии могут быть реализованы по различным технологическим схемам. Среди основных критериев, которыми следует руководствоваться при выборе альтернативной схемы технологического процесса (ТП), можно выделить: качество получаемых полуфабрикатов, трудоемкость и энергозатратность.

Рассматривая альтернативные схемы ТП и составляющие операции можно отметить следующее. Компактирование порошковой смеси и получение прессовок, может выполняться как на предварительной операции в жесткой матрице, так и непосредственно в специальном канале винтовой матрицы. Преимуществом первого подхода является возможность использования серийных гидравлических прессов для одностороннего и двухстороннего прессования. Это позволяет во-первых получить заготовки с однородным распределением пор, во-вторых использовать для прессования отдельные единицы технологического оборудования. Недостатком такого подхода является необходимость проектирования отдельных жестких матриц, и окисление поверхностей частиц порошка титана при хранении неспеченных прессовок. Компактирование непосредственно в канале винтовой матрицы связано с усложнением ее конструкции и увеличением количества переходов операции ИПД.

Консолидация частиц порошка традиционно выполняется путем вакуумного спекания. Данная

операция является наиболее энергозатратной в технологии получения деформированных полуфабрикатов, так как спекание титановых прессовок выполняются при температурах 1200...1300 °С в течении 3...3,5 часов. В процессе спекания в вакууме с поверхностей частиц удаляются окислы, вакуум является защитой от окисления.

Для снижения энергетических затрат, спекание может выполняться в два этапа. На первом этапе прессовки спекают в среде защитного газа. Учитывая активное выделение газов из порошков титана на начальной стадии нагрева, что является значительным затруднением при спекании в вакууме, использование на первой стадии защитной среды является эффективным мероприятием по снижению затрат энергоресурсов. Выделяющийся на втором этапе спекания прессовки в вакууме водород, способствует очистке поверхностей частиц порошка от окислов. Недостатком такого подхода является необходимость использования печей различного типа.

Альтернативным способом консолидации частиц порошка могут являться процессы ИПД. Учитывая высокий уровень шаровой и девиаторной компонент тензора напряжений в плоскости деформации заготовок, формирование металлических границ между частицами порошков может быть реализовано при температуре и времени, значительно меньшем, чем при вакуумном спекании. Однако, такой подход требует реализации комплекса мероприятий, по устранению окислов и других примесей с поверхности частиц. Консолидация в процесс ИПД требует защиты заготовки от соприкосновения как с окружающей средой, так и элементами технологической оснастки, что может быть достигнуто путем предварительной вакуумной капсуляции прессовок.

Устранение пористости может быть выполнено как на этапах прессования и спекания, так и в процессе ИПД. Исследования пористости спеченных заготовок показали [15, 16], что она зависит от таких параметров как давление прессования, время и температура спекания. Так, изменяя усилие прессования возможно получение прессовок с разной величиной пористости. При рекомендуемом давлении прессования для титановых порошков 80...100 МПа получают достаточно плотные и прочные, для транспортировки на последующие операции, прессовки. При этом в них преобладают закрытые поры, что при последующем спекании может за счет активного выделения газов приводить к росту пористости. Преобладание пор закрытого типа исключает возможность контакта порового пространства с окружающей средой в процессе ИПД при повышенной температуре. Многочисленные работы отечественных и зарубежных исследователей в области порошковой металлургии позво-

## Условия реализации интенсивной пластической деформации некомпактных заготовок

Назначение	Режимные параметры ИПД		
	Температура	Время	Деформация
Захлопывание пор (устранение пористости)	$>0,6 T_{пл}$	max	optimal
Заваривание пор (устранение микрофлокенов)	$>0,6 T_{пл}$	max	optimal
Гомогенизация легирующих элементов	$>0,6 T_{пл}$	max	max
Дробление структурных элементов	$<(0,3...0,4) T_{пл}$	min	max

лили установить, что на этапах прессования и спекания удается получить заготовки с пористостью не менее 1...3%, что существенно ограничивает ее применение для деталей, используемых при производстве газотурбинных двигателей [1-3].

Интенсивная пластическая деформация, являясь ключевой операцией в технологической схеме получения компактных полуфабрикатов титановых сплавов, имеет большой набор фактов, от сочетания которых зависит эффективность ее выполнения. В зависимости от целей применения, могут варьироваться способ деформации, степень связанности частиц порошка, температура заготовки, степень ее деформации за цикл и общее количество циклов деформации, величина противодавления и ряд других параметров.

Так, в зависимости от степени связанности частиц порошка, определяемой режимами предшествующих операций прессования и спекания, ИПД

включений. Однако, для захлопывания пор требуется работа, направленная на разрушения созданных на предшествующих этапах прочных металлических связей, что связано с повышенными энергетическими затратами.

Исходя из противоречивых условий, необходимых для реализации каждой из целей применения операции ИПД некомпактных заготовок (табл. 1), существует несколько альтернативных схем построения технологического процесса получения компактных заготовок из смеси порошков титана с необходимыми легирующими добавками.

Согласно первой из возможных технологических схем, предусматривающей двойную интенсивную пластическую деформацию (рис. 1), формование прессовок из предварительно подготовленной порошковой смеси выполняется при минимальном давлении, обеспечивающем получение прессовок с высокой пористостью и достаточной прочностью

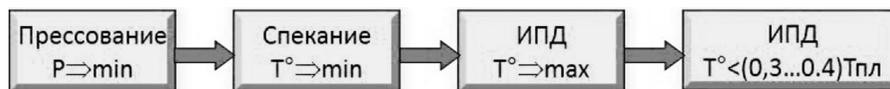


Рис. 1. Схема реализации ТП получения деформированных полуфабрикатов с двумя операциями ИПД.

могут быть подвержены прессовки (порошковые) или спеченные (пористые) заготовки. Прочность связанности между частицами в порошковых заготовках минимальна, что обеспечивает эффективное перемешивание, например при ИПД методом винтовой экструзией [14]. Условия для аккомодации частиц в порошковых заготовках благоприятны с точки зрения устранения пористости. Однако, облегченное взаимное проскальзывание частиц порошка не способствует их фрагментации.

В спеченных заготовках на поверхностях взаимного контакта между частицами формируются высокоугловые границы зерен. В результате затрудненного зернограничного проскальзывания, под действием внешней нагрузки зерна фрагментируются, происходит диспергирование твердых

для транспортировки на последующие операции. Усилие прессование не должно приводить к образованию открытых пор. Спекание выполняется при минимальной температуре и времени. При этом обеспечивается удаление поверхностных окислов и предварительное срачивание частиц порошка. Происходит диффузия легирующих элементов в порошок титана. Уплотнение и устранение микрофлокенов в спеченных заготовках выполняют методами ИПД в два этапа. На первом этапе заготовка деформируется при температуре  $>0,6 T_{пл}$ , с максимальной скоростью при умеренной деформации за цикл. При этом обеспечиваются наиболее благоприятные условия для захлопывания и заваривания пор, а также гомогенизации легирующих элементов. Формируется структура материала

близкая к литой. На втором этапе заготовка деформируется при температуре ниже  $(0,3...0,4)T_{пл}$ , что позволяет эффективно диспергировать структурные элементы. В заготовке формируется СМК структура, отличающаяся большой долей высокоугловых границ. Также обеспечивается дальнейшая гомогенизация легирующих элементов. Существенными недостатком данной схемы является необходимость проведения операции ИПД при высоких температурах, что существенно снижает стойкость дорогостоящей, специальной штамповой оснастки.

Формование прессовок из предварительно подготовленной порошковой смеси согласно второй альтернативной схеме ТП (рис. 2), выполняется при максимальном давлении, что способствует получению прессовок с низкой пористостью, а также закрытого порового пространства. Спекание выполняется при оптимальной, с точки зрения сра-

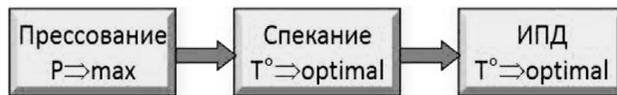


Рис. 2. Схема реализации ТП получения деформированных полуфабрикатов с однократной интенсивной деформацией.

щивания частиц порошка температуре и времени. При этом обеспечиваются благоприятные условия для диффузии легирующих элементов. Захлопывание пор, заваривание микрофлокенов, гомогенизация легирующих элементов и диспергирование структурных выполняется одноэтапно, в процессе ИПД. Режимные параметры ИПД при этом должны находиться в узком диапазоне, одновременно удовлетворяющим условиям реализуемости каждой из стадий процесса (табл. 1).

На первом этапе схемы ТП без предварительного прессования и спекания (рис. 3) выполняют формование прессовок из предварительно подготовленной

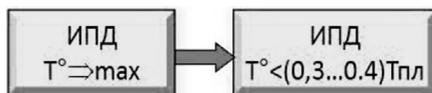


Рис. 3. Схема реализации ТП получения деформированных полуфабрикатов без предварительного прессования и спекания.

порошковой смеси непосредственно в канале матрицы для ИПД при температуре  $>0,6 T_{пл}$ , с максимальной скоростью, при умеренной степени деформации за цикл. На втором этапе выполняют устранение пористости и микрофлокенов, а также формируют

СМК структуру на операции ИПД при температуре ниже  $(0,3...0,4) T_{пл}$ .

Существенным недостатком данной схемы, практически полностью ограничивающим ее применение для порошковых смесей на основе порошка титана, является сложность обеспечения условия отсутствия контакта частиц порошка с поверхностью канала матрицы, нагретой до высокой температуры.

Четвертая альтернативная схема ТП (рис. 4) предусматривает формование порошковых заготовок при минимальном давлении, обеспечивающем получение прессовок с высокой пористостью и достаточной прочностью для транспортировки на последующие операции. Спекание выполняется при оптимальных, с точки зрения срачивания частиц порошка, температуре и времени. При этом обеспечиваются благоприятные условия для диффузии легирующих элементов.

Первичную операцию ИПД заготовок выполняют при температуре в ниже  $(0,3...0,4)T_{пл}$ , с максимальной скоростью и умеренной степенью деформации за цикл. После ИПД заготовку подвергают вторичному спеканию при температуре ниже температуры начала протекания процесса рекристаллизации, что способствует устранению дефектов и не приводит к росту зерна.

Для количественной оценки затрат на реализацию каждой из рассмотренных схем ТП использовали метод экспертных оценок [17]. Применяли способ задания весовых коэффициентов, согласно которого наиболее важному из всех критериев придавали весовой коэффициент, равный единице, а всем остальным – коэффициенты, равные долям единицы (бальный метод).

Оценку каждой из операций ТП выполняли по следующим критериям:

- затраты энергетических ресурсов;
- трудоемкость выполнения операции;
- затраты на оснастку с учетом изнашивания;
- затраты на оборудование;

Затраты энергоресурсов на операции вакуумного спекания при максимальной температуре и времени использовали в качестве опорного значения весового коэффициента равного единице.

Обобщенный коэффициент затрат на выполнение ТП по каждой из рассмотренных схем рассчитывали по формуле:

$$Z_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k \sum_{q=1}^n w_{i,j,q}}{m},$$

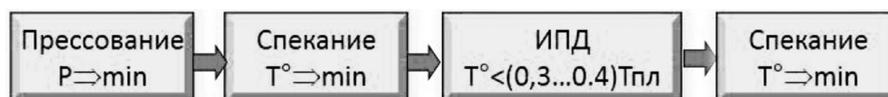


Рис. 4. Схема реализации ТП получения деформированных полуфабрикатов с двойным спеканием.

Таблица 2

## Условия реализации интенсивной пластической деформации некомпактных заготовок

Критерий	Средневзвешенная оценка критерия для операций					
	Прессование		Спекание		ИПД	
	$P \rightarrow \min$	$P \rightarrow \max$	$\tau, T^\circ \rightarrow \min$	$\tau, T^\circ \rightarrow \max$	$<(0,3...0,3) T_{пл}$	$T^\circ > 0,6 T_{пл}$
затраты энергетических ресурсов	0,1	0,12	0,5	1	0,6	0,96
трудоемкость операции	0,09	0,09	0,08	0,1	0,24	0,25
затраты на технологическую оснастку	0,14	0,18	0,08	0,08	0,6	0,7
затраты на оборудование	0,31	0,31	0,82	0,82	0,62	0,62

Таблица 3

## Расчетных значения относительных затрат на реализацию альтернативных схем ТП

Схема технологического процесса	Относительные затраты
Схема №1 с двумя операциями ИПД	6,71
Схема №2 с однократной ИПД	4,74
Схема №3 без предварительного прессования и спекания	4,59
Схема №4 с двойным спеканием	5,66

где  $Z_\Sigma$  – относительные затраты на реализацию ТП по рассматриваемой схеме;

$w_{ijq}$  – оценка  $i$ -м экспертом  $q$ -го критерия  $j$ -й операции,

$m$  – количество экспертов;

$k$  – количество операций в ТП анализируемой схемы;

$n$  – количество критериев, по которым оценивается операция ТП.

Средневзвешенные оценки весовых коэффициентов критериев для основных операций ТП получения деформированных полуфабрикатов из дисперсных порошков, рассчитанные на основании анкетирования восьми экспертов, приведены в табл. 2. Для операций, режимные параметры которых имели оптимальные значения, расчет выполняли по среднему значению соответствующих коэффициентов.

Количественный анализ эффективности применения альтернативных схем ТП показывает (табл. 3), что наиболее эффективными, с точки зрения ресурсозатратности, являются схемы без предварительного прессования и спекания (схема №3) и с однократной операцией ИПД (схема №2).

Таким образом, учитывая особенности реализации рассмотренных схем построения ТП можно считать, что для получения полуфабрикатов тита-

новых сплавов из дисперсных порошков для лопаток ГТД, в условиях опытного и серийного типа производства, наиболее перспективной схемой ТП является схема с однократной интенсивной пластической деформацией.

## Литература

- [1] Ивасишин О.М. Производство титановых сплавов и деталей экономичным методом порошковой металлургии для широкомасштабного промышленного применения [Текст] \ О.М. Ивасишин, Д.Г. Саввакин, К.А. Бондарева, В.С. Моксон, В.А. Дузь \ \ Наука та інновації, 2005. Т1. № 2. – С. 44-57
- [2] Ивасишин О.М. Синтез титанового сплава Ti-5Al-5V-5Mo-3Gr методом порошковой металлургии [Текст] \ О.М. Ивасишин, Д.Г. Саввакин, М.В. Матвийчук, В.И. Бондарчук \ \ Металлофизика и новейшие технологии. 2009. – Т. 31. – № 8. – С. 1125-1142.
- [3] Capus Joseph M. More roads point to cheaper titanium powder \ Joseph M Capus \ \ Metal Powder Report . Volume 60, Issue 2, February 2005, Pages 22-23.
- [4] Moustafa Sayed Hot Forging and Hot Pressing of AISi Powder Compared to Conventional Powder Metallurgy Route \ Sayed Moustafa, Walid Daoush, Ahmed Ibrahim, Erich Neubauer \ \ Materials Sciences and Application. 2011. – № 2. – P. 1127-1133.



- [5] Моисеев В.Н. Металлургия гранул высокопрочных титановых сплавов [Текст] \ В.Н. Моисеев, Н.В. Сысоева, Т.В. Ишунькина \ \ Металловедение и термическая обработка металлов, 1995. № 6. С. 12-17.
- [6] Павленко Д.В. Техничко-економические аспекты технологических схем получения заготовок из титановых сплавов для лопаток ГТД [Текст] \ Д.В. Павленко, А.В. Овчинников \ \ Вестник двигателестроения – 2014. – № 1. – С. 98-103.
- [7] Павленко Д.В. Материаловедческие аспекты ресурсосберегающей технологии получения титановых полуфабрикатов [Текст] \ Д.В. Павленко \ \ Технологические системы. 2013. № 4(65) – С. 21-29.
- [8] Столяров В.В. Деформационные методы измельчения структуры [Текст] \ В.В. Столяров \ \ Вестник научно-технического развития. 2013. – № 4(69) – С. 29-36.
- [9] Валиев Р.З. Использование интенсивных пластических деформаций для получения объемных наноструктурных металлических материалов [Текст] \ Валиев Р.З., Еникеев Н.А., Мурашкин М.Ю., Утяшев Ф.З \ \ Изв. РАН. МТТ. 2012. – № 4. – С. 109-122.
- [10] Бейгельзимер Я.Е. Некоторые соображения по поводу больших пластических деформаций, основанные на их аналогии с турбулентностью / Я.Е. Бейгельзимер // Физика и техника высоких давлений, 2008. – Т. 18. – № 4 – С. 77-87.
- [11] Рябичева Л.А. Деформационное поведение порошковой пористой заготовки при РКУ-прессовании / Л.А. Рябичева, В.В. Смоляк // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ" : Нові рішення в сучасних технологіях № 43 – Вестник НТУ "ХПИ", 2010. – С. 63-67.
- [12] Рябичева Л.А. Экспериментальное исследование влияния исходной плотности на структуру и свойства порошковой меди при рку-прессовании / Л.А. Рябичева, В.В. Смоляк // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Луганськ. – 2010. – С. 18-27.
- [13] Shpak A.P. Nanostructured Al86Gb6Ni6Co2 bulk alloy produced by twist extrusion of amorphous melt-spun ribbons A.P. Shpak, V.N. Varyukhin, V.I. Tkatch, V.V. Maslov, Y.Y. Beygelzimer, S.G. Synkov, V.K. Nosenko, S.G. Rassolov \ \ Materials Science and Engineering A 425 (2006) – 172-177.
- [14] Бейгельзимер Я.Е. Возможности уплотнения образцов из алюминиевой стружки методов винтовой экструзии [Текст] \ Я.Е. Бейгельзимер, А.И. Шевелев, С.Г. Сынков \ \ Порошковая металлургия. – 2004. – № 11-12. – С. 1-5.
- [15] Robertson I. M Review of densification of titanium based powder systems in press and sinter processing \ I. M. Robertson, G. B. Schaffer \ \ Powder Metallurgy. – 2010. – vol 53. – № 2 – P. 146-162.
- [16] Павленко Д.В. Получение деформированных заготовок из титановых сплавов на основе методов порошковой металлургии [Текст] \ Д.В. Павленко, А.В. Овчинников, А.Е. Капустян, А.А. Скребцов \ \ Титан – 2013. – № 1. – С. 24-32.
- [17] Орлов А.И. Экспертные оценки. – М.: 2002. – 31 с.

**Pavlenko D.V.**

Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine, Zaporozhye

#### ALTERNATIVE TECHNOLOGICAL PROCESS SCHEMES OF PRODUCING SEMI-FINISHED PRODUCTS FOR GAS TURBINE ENGINE BLADES BY POWDER METALLURGY

*The alternative process flow sheet of manufacturing semi-finished titanium alloys for gas turbine engine blades based on powder metallurgy techniques are considered. Qualitative and quantitative analysis of process flow sheet carried out. Optimal from the point of view of cost process flow sheet established.*

**Keywords:** powder metallurgy; technological process; severe plastic deformation; titanium alloys; semi-finished; billet; blade; delphi method

#### References

- [1] Ivasishin O.M. Proizvodstvo titanovyh splavov i detalej jekonomichnym metodom poroshkovej metallurgii dlja shirokomasshtabnogo promyshlennogo primeneniya [Tekst] \ O.M. Ivasishin, D.G. Savvakina, K.A. Bondareva, V.S. Mokson, V.A. Duz \ \ Nauka ta innovacii, 2005. – 1. – №2. – P. 44-57.

- [2] Ivasishin O.M. Sintez titanovogo splava Ti-5Al-5V-5Mo-3Gr metodom poroshko-voj metallurgii [Tekst] \ O.M. Ivasishin, D.G. Savvakina, M.V. Matvijchuk, V.I. Bondarchuk \ Metallofizika i novejsie tehnologii . 2009. T. 31. – № 8. – S. 1125-1142.
- [3] Capus Joseph M. More roads point to cheaper titanium powder \ Joseph M Capus \ Metal Powder Report . Volume 60, Issue 2, February 2005, Pages 22–23.
- [4] Moustafa Sayed Hot Forging and Hot Pressing of AISi Powder Compared to Conventional Powder Metallurgy Route \ Sayed Moustafa., Walid Daoush, Ahmed Ibrahim, Erich Neubauer \ Materials Sciences and Application. 2011. – №2. – R. 1127-1133.
- [5] Moiseev V.N. Metallurgija granul vysokoprochnyh titanovyh splavov [Tekst] \ V.N. Moiseev, N.V. Sysoeva, T.V. Ishun'kina \ Metallovedenie i termicheskaja obrabotka me-tallov, 1995. – №6. – S. 12-17.
- [6] Pavlenko D.V. Tehniko-jekonomicheskie aspekty tehnologicheskikh shem poluchenija zagotovok iz titanovyh splavov dlja lopatok GTD [Tekst] \ D.V. Pavlenko, A.V. Ovchinnikov \ Vestnik dvigatelestroenija – 2014. – №1. – S. 98-103.
- [7] Pavlenko D.V. Materialovedcheskie aspekty resursosberegajushhej tehnologii po-luchenija titanovyh polufabrikatov [Tekst] \ D.V. Pavlenko \ Tehnologicheskie sistemy. – 2013. – №4(65) – S. 21-29.
- [8] Stoljarov V.V. Deformacionnye metody izmel'chenija struktury [Tekst] \ V.V. Stoljarov \ Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitija. – 2013. – №4(69) – S. 29-36.
- [9] Valiev R.Z. Ispolzovanie intensivnyh plasticheskikh deformacij dlja poluchenija ob'emnyh nanostrukturnyh metallicheskikh materialov [Tekst] \ Valiev R.Z., Enikeev N.A., Murashkin M.Ju., Utjashev F.Z \ Izv. RAN. MTT. 2012. – № 4. – S. 109-122.
- [10] Beigel'jimer Ja.E. Nekotorye soobrazhenija no povodu bol'shix plasticheskikh de-formacij, osnovannye na ih analogii s turbulentsnost'ju / Ja.E. Beigel'zimer // Fizika i teh-nika vysokih davlenij – 2008. – T. 18. – №4 – S. 77-87.
- [11] Rjabicheva L.A. Deformacionnoe povedenie poroshkovoju poristoj zagotovki pri Rku-pressovanii / L.A. Rjabicheva, V.V. Smoljak // Sbornik nauchnyh trudov "Vestnik NTU "HPI" : Novi rishennja v suchasni tehnologijah №43 – Vestnik NTU "HPI", 2010. – S. 63-67.
- [12] Rjabicheva L.A. Jeksperimental'noe issledovanie vlijanija ishodnoj plotnosti na strukturu i svojstva poroshkovoju medi pri rku-pressovanii / L.A. Rjabicheva, V.V. Smoljak //Resursozberigajuchi tehnologii virobnictva ta obrobki tiskom materialiv u mashinobuduvanni: 3b. nauk. pr.-Lugans'k. – 2010. – S.18-27.
- [13] Shpak a.R. Nanostructured Al86Gb6Ni6Co2 bulk alloy produced by twist extrusion of amorphous melt-spun ribbons A.P. Shpak, V.N. Varyukhin, V.I. Tkatch, V.V. Maslov, Y.Y. Beygelzimer, S.G. Synkov, V.K. Nosenko, S.G. Rassolov \ Materials Science and Engineering A 425 (2006) – 172-177.
- [14] Beigel'zimer Ja.E. Vozmozhnosti uplotnenija obrazcov iz aljuminievoj struzhki metodov vintovoj jekstruzii [Tekst] \ Ja.E. Beigel'zimer, A.I. Shevelev, S.G. Synkov \ Poroshkovaja metallurgija. – 2004. – №11-12. – S. 1-5.
- [15] Robertson I. M Review of densification of titanium based powder systems in press and sinter processing \ I. M. Robertson, G. B. Schaffer \ Powder Metallurgy. – 2010. – vol 53. – №2 – R. 146-162.
- [16] Pavlenko D.V. Poluchenie deformirovannyh zagotovok iz titanovyh splavov na osnove metodov poroshkovoju metallurgii [Tekst] \ D.V. Pavlenko, A.V. Ovchinnikov, A.E. Ka-pustjan, A.A. Skrebcov \ Titan 2013. – №1. – S. 24-32.
- [17] Orlov A.I. Jekspertnye ocenki. – M.: 2002. – 31 s.