

УДК 621.762

Тарасов А. Ф.
Бейгельзимер Я. Е.
Павленко Д. В.
Штерн М. Б.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОСНАСТКИ ДЛЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ ЗАГОТОВОК С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Методы порошковой металлургии в настоящее время находят все более широкое применение в технике ответственного назначения, работающей в сложных условиях эксплуатации. Причиной расширения применения деталей, синтезированных из металлических порошков, является более низкая себестоимость их получения, что связано с рядом преимуществ процесса: возможность относительно просто создавать новые составы материалов, получать высокий коэффициент использования материала, исключить из технологического процесса производства дорогостоящие и ресурсозатратные операции печного переплава. В частности, методы порошковой металлургии могут использоваться в технологии получения компактных полуфабрикатов сложнолегированных сплавов [1, 2, 3].

При указанных выше достоинствах порошковой металлургии использование деталей из порошков в конструкции ответственных и высоконагруженных изделий, например, в газотурбинных двигателях, ограничивается изготовлением узкого круга слабонагруженных элементов. Основными причинами снижения уровня механических характеристик изделий из порошков является наличие в них пор и ликваций легирующих элементов. В основе технологических процессов, позволяющих справиться с этими проблемами, лежат методы уплотнения порошковых заготовок путем пластического деформирования с применением интенсивных пластических деформаций (ИПД). При этом выбор вида процесса, последовательности и параметров операций, конструктивных решений для оснастки и др. требуют рассмотрения широкого круга задач как теоретического, так и экспериментального плана. В связи с этим, совершенствование технологических процессов и оснастки для деформирования порошковых заготовок с применением интенсивной пластической деформации является актуальной задачей.

Проблема применения различных методов деформационной обработки для уплотнения порошковых заготовок достаточно активно изучается как отечественными, так и зарубежными исследователями. В литературе приведены результаты исследования уплотнения алюминиевой стружки [4] и порошков [5], а также смеси порошковых компонентов для получения компактных титановых [6], медных [2] и др. сплавов. Имеются сведения о применении для уплотнения современных технологических методов, таких как горячее изостатическое прессование [7, 8] и методов, основанных на интенсификации сдвиговых деформаций [9]. Достаточно много работ, указывающих на эффективность применения различных методов ИПД для повышения свойств компактных материалов в литом и деформированном состояниях [10, 11, 12, 13, 14, и др.]. В тоже время, несмотря на наличие работ, посвященных разработке ресурсосберегающих технологий получения титановых полуфабрикатов методами порошковой металлургии [15, 16], проблема получения деформированных полуфабрикатов сложнолегированных титановых сплавов из смеси порошковых компонентов с применением методов ИПД изучена недостаточно полно. Имеется ограниченное количество исследований, посвященных классификации и систематизации процессов интенсивного пластического деформирования для формирования ультрамелкозернистых и нанокристаллических структур в объемных заготовках [17], при этом аналогичные исследования применительно к порошковым заготовкам практически отсутствуют.

В целом, для получения качественных изделий из порошковых материалов необходимо решить круг задач, связанных с принципами выбора операций технологического процесса и применяемыми методами обработки: подготовка составов (порошковых смесей), уплотнение порошковых материалов, спекание прессовок (порошковых заготовок) и их последующего деформирования для повышения свойств изделий, а также совершенствования технологической оснастки и оборудования для реализации принятой технологии. Важными являются и вопросы теоретического обоснования условий, необходимых для деформирования порошковых материалов и заготовок на различных этапах производства изделий.

Целью работы является анализ путей совершенствования методов и технологии деформирования порошковых заготовок, методов моделирования этих процессов и разработка технологической оснастки для их реализации.

Рассмотрим возможности методов обработки металлов давлением и ИПД в частности применительно к порошковым материалам и заготовкам. Классификация типовых методов ИПД применительно к сплошным металлическим заготовкам приведена в работе [17].

Для обоснованного выбора путей достижения основных целей обработки давлением порошковых материалов и заготовок, видов технологических операций, в частности, методов деформирования порошковых заготовок, а также оптимизации технологии деформирования разработана прикладная классификация (рис. 1).



Рис. 1. Методы повышения плотности и пластичности порошковых материалов и заготовок при обработке давлением

В основу классификации положен принцип разделения технических решений по этапам выбора элементов технологии: цель, которую предполагается достигнуть при пластиче-

ской деформации порошкового материала или заготовки, ограничения на технологический процесс и возможные схемы деформирования, из которых осуществляется выбор. Наличие такой информации позволяет сформулировать правила выбора рационального технологического процесса деформирования и обеспечить получение качественных изделий с учетом всей совокупности предъявляемых требований. При этом моделирование процесса позволяет получить количественную оценку технологических факторов.

Анализ различных процессов получения деталей конструкционного назначения из порошков показал, что основной целью обработки давлением в данном случае является получение заготовок с минимальной пористостью. Для этого порошковую заготовку, полученную из смеси порошковых компонентов, подвергают специальным видам пластического деформирования с реализацией схемы простого сдвига – ИПД. За счет интенсивных сдвиговых деформаций при обработке существенно повышают плотность материала заготовки. Учитывая, что плотность связана с прочностью порошковых заготовок, уплотнение можно рассматривать и как способ повышения прочности. При этом прочность при деформации повышается как за счет устранения пор и дефектов типа флокенов (плоских трещин), так и за счет формирования субмикроструктурной структуры в объеме заготовки. Повышению уровня свойств и снижения величины их рассеяния способствует также наблюдаемое для некоторых видов деформационной обработки, например, винтовой экструзии (ВЭ), явление гомогенизации, приводящее к устранению ликваций легирующих элементов, свойственное порошковым заготовкам.

Следует отметить, что наличие пор снижает пластичность заготовок, поэтому для их деформирования без разрушения используют методы, при которых в объеме заготовок реализуются схемы всестороннего неравномерного сжатия, а также нагрев, изменяющий механизм пластической деформации, или их комбинации.

Для повышения плотности порошковых заготовок при прессовании используют ряд технологических приемов: двойное прессование, выдержка под давлением и др. (см. рис. 1). В процессах ИПД используют активные силы трения, обеспечивающие устранение застойных зон и снижение нагрузок на рабочий инструмент.

Ограничения, накладываемые методом деформирования на процесс деформации, определяют допустимые размеры и форму заготовки, а также применяемое технологическое оборудование и оснастку. При этом ограничения на размеры заготовки могут быть продиктованы как особенностями процесса деформации, так и габаритами изготавливаемых из них деталей. Классификация возможных технологических схем реализации процесса деформации порошковых заготовок делает возможным выбор рационального метода деформирования исходя из наличия технологического оборудования. Так, например, порошковые заготовки после спекания могут быть подвергнуты деформации равноканальным угловым прессованием, гидроэкструзией, ВЭ, осадкой в штампе с последовательным изменением осей деформирования и т.д. Выбор параметров для конкретной схемы должен быть сделан, исходя из результатов моделирования поведения заготовки в процессе деформирования с наложением ограничений.

На основе анализа разработанного классификатора, с учетом особенностей объекта, для которого будут изготовлены полуфабрикаты, например, лопаток компрессора газотурбинных двигателей, для дальнейшей практической реализации выбран метод деформации винтовой экструзией. Учитывая стоимость технологической оснастки для ВЭ, оптимизацию условий деформации на начальных этапах наиболее рационально выполнять путем численного моделирования с применением САЕ-систем.

Учитывая особенность поведения порошковых материалов в процессе уплотнения, моделирование их деформации необходимо выполнять, основываясь на знании поверхности текучести материала. В этом случае появляется возможность учитывать прочность связи частиц порошка, что позволяет моделировать обработку как неспеченных прессовок, обладающих достаточно низкой прочностью, так и спеченных заготовок. Альтернатива их применения весьма неоднозначна. Так, использование прессовок приводит к необходимости при-

менения защитной оболочки [18], что существенно осложняет технологический процесс. С другой стороны, операция спекания для титановых сплавов в вакууме при температуре более 1200°C, существенно увеличивает затраты ресурсов. Моделирование поведения порошковых заготовок позволяет также выполнить оптимизацию режимов обработки, обеспечивая такое их сочетание, при котором заданный уровень гидростатического давления способствует сохранению целостности заготовки.

В основе примененного для моделирования варианта теории пластичности пористых тел использовали представление о пластическом потенциале как о функции компонентов тензора напряжений, которой в пространстве напряжений соответствует гладкая, выпуклая и замкнутая поверхность. Контур этой поверхности может быть представлен в виде одной из эквивалентных форм [19]:

$$F = \frac{\tau^2}{\varphi} + (1+m)^2 \frac{\left(p + \frac{m}{m+1} \bar{\rho} \sigma_s \sqrt{\psi} \right)^2}{\psi} - \bar{\rho} \sigma_s \tag{1}$$

$$F = \tau - \sqrt{\varphi} \sqrt{(1-\theta)(k_0 + \alpha p)^2 - \frac{p^2}{\psi}} \tag{2}$$

где θ – пористость заготовки; m и α – параметры, связанные с наличием двумерных дефектов и аккомодацией частиц; φ и ψ – некоторые функции пористости [21]; σ_s и k_0 – параметры, характеризующие напряжение течения твердой фазы пористого тела.

Изменение положения контура поверхности текучести относительно девиаторной плоскости позволяет выполнять моделирование заготовок с различной степенью связанности частиц (рис. 2). На практике управление контуром поверхности текучести может быть реализовано путем варьирования режимами компактирования и консолидации в процессе прессования и спекания.

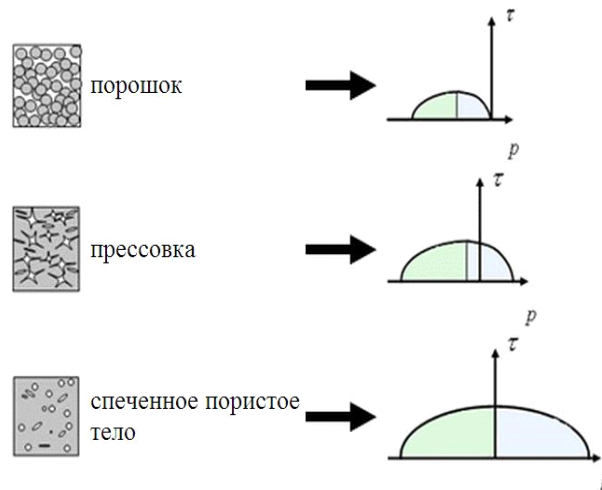


Рис. 2. Положение контура поверхности текучести в зависимости от степени связанности частиц порошка [20].

Скорость накопления деформаций в твердой фазе пористого тела оценивали выражением вида [19]:

$$w = \sqrt{1-\theta} \cdot \left(-\frac{m}{1+m} \sqrt{\psi e} + \frac{\sqrt{(1+m)^2 \gamma^2 \varphi + e^2 \psi}}{1+m} \right). \tag{3}$$

Моделирование поведения порошковых заготовок в процессе деформации методом ВЭ выполняли численным методом в системе ABAQUS. Анализ выполняли при условии, что исходная пористость заготовки составляла 30%, а ее неоднородным распределением вначале ВЭ можно пренебречь.

Результаты моделирования позволили установить важное условие эффективности уплотнения порошковых заготовок – наличие высокого уровня противодействия. Так, в отсутствие противодействия пористость в отдельных частях заготовки, подверженной ВЭ составляла 30%, в то время как наличие противодействия снижает пористость в данных областях до 13,4%. Также в результате моделирования было установлено, что в отсутствие противодействия наблюдается заметное разрыхление, приводящее к уменьшению плотности. Приложение противодействия меняет характер изменения объема: практически во всей области, занимаемой заготовкой, плотность возрастает. Также установлено, что наличие противодействия обуславливает более равномерный характер распределения деформации твердой фазы в объеме деформируемой заготовки.

На основании моделирования поведения порошковых и пористых тел был установлен ряд требований к конструкции оснастки для их деформирования винтовой экструзией и опытно-промышленной установки для ее реализации. Важнейшим из них является необходимость деформации с противодействием, величина которого составляет порядка 30% от давления прессования. Практический опыт реализации процесса ВЭ компактных образцов из медных и титановых сплавов [22, 23, 24, 25] позволил разработать и ряд других технических требований к новой опытно-промышленной установке для деформации порошковых заготовок и ряда перспективных авиационных материалов таких, например, как сплавы на основе алюминидов титана и никеля. Так, конструкция установки должна исключать образование облоя между всеми рабочими элементами установки: между частями матрицы, контейнером, пуансоном и матрицей. После всех циклов обработки заготовки должны иметь длину однородно деформированного участка не менее двух диаметров, их поперечное сечение не должно отличаться от исходного более чем на 0,5 мм по всему контуру; угол разворота торцевых сечений конечных заготовок не должен превышать 3°. Для обеспечения эффекта измельчения зеренной структуры материала и возможности не только уплотнения заготовок, но и формирования в них субмикроструктурной структуры, среднее значение эквивалентной деформации Мизеса по поперечному сечению образца должно быть не менее 1,0, а минимальное значение – не менее 0,5.

Учитывая особенности деформации материала при простом сдвиге, для расчета среднего значения эквивалентной деформации использовали соотношение (4), полученное на основе обработки результатов численных экспериментов, выполненных в пакете DEFORM-3D. Коэффициент множественной корреляции для соотношения (4) составляет $R^2 = 0.93$ [25]:

$$e_{mean} = 3,46 \cdot \left(\frac{h_s}{R}\right)^{-0,47} \cdot \left(\frac{l_d}{h_s}\right)^{0,55} \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^{-0,56}, \quad (4)$$

где h , b – соответственно высота и ширина поперечного сечения призматической заготовки; R – радиус описанной вокруг сечения заготовки окружности; l_d – длина винтового участка матрицы, h_s – длина полного шага винтовой линии.

Минимальную величину эквивалентной деформации рассчитывали по формуле (5), коэффициент множественной корреляции для которой составляет $R^2 = 0.97$ [25]:

$$e_{min} = 3,08 \cdot \left(\frac{h_s}{R}\right)^{-0,56} \cdot \left(\frac{l_d}{h_s}\right)^{0,87} \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^{-1,15} \quad (5)$$

Анализ зависимостей (4) и (5) позволил установить, что диаметр поперечного сечения заготовки должен находиться в диапазоне от 25 мм до 50 мм, а ее длина составлять не менее 2,5 диаметра. Для работы с широкой номенклатурой материалов установка должна обеспечить возможность нагрева внутренней поверхности контейнеров и матрицы в диапазоне

от 350°C до 550°C. На протяжении всего времени деформирования заготовки, от момента вхождения ее переднего торца в матрицу, до момента выхода ее заднего торца из калибрующего участка матрицы, к нижнему торцу заготовки должно быть приложено противодействие. Установка должна обеспечивать величину противодействия до 700 МПа и возможность задавать его с точностью 50 МПа. Конструкция приемного контейнера должна предусматривать устройство для быстрого извлечения образца. Установка должна обеспечивать обработку в режиме «заготовка за заготовкой». Не более, чем через 30 с после извлечения заготовки из приемного контейнера, установка должна быть полностью готова к обработке следующей заготовки. Исходя из этих требований, была спроектирована специальная опытно-промышленная установка для интенсивной пластической деформации порошковых заготовок методом ВЭ (рис. 3).

Разработанная установка имеет ряд существенных преимуществ перед аналогами. Отличительной особенностью новой установки от аналога [22] является изменение силовой схемы передачи рабочего усилия от пуансона 8 на нижнюю плиту 2 и стол пресса за счёт установки рабочей матрицы 9 на неподвижной плите 3 блока штампа. Также устранена передача рабочей нагрузки через клин на нижнюю плиту, которая применялась в аналоге установки. При этом клинья 15, в отличие от установки аналога, воспринимают только нагрузку от трения при выпрессовке заготовки 14 в приёмный контейнер 12 с противодействием, что значительно повышает ресурс приемного контейнера и исключает возможность его разрушения. Эти и ряд других конструктивных решений обеспечили выполнение основных условий, необходимых для ИПД порошковых заготовок.

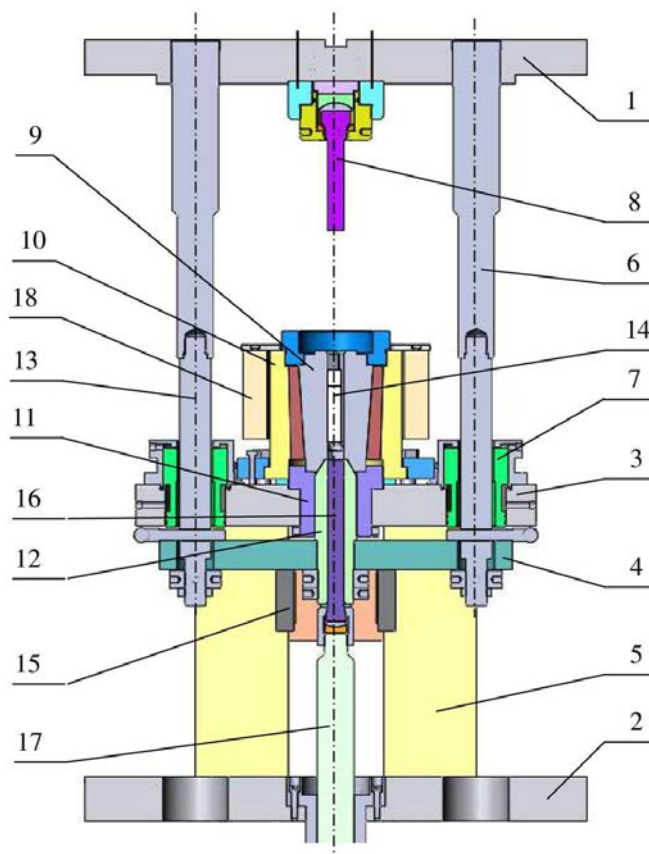


Рис. 3. Общий вид установки для интенсивной пластической деформации порошковых заготовок методом винтовой экструзии

Установка состоит из блока, который состоит из подвижной верхней 1 и неподвижной нижней 2 плит, закрепленных соответственно на ползуне и столе пресса, а также неподвижной 3 и подвижной 4 промежуточных плит. Плита 3 установлена на опоры 5, размещенные и закрепленные на плите 2. Таким образом они образуют недвижимую основу блока штампа.

Позиционирование плит 1 и 3 относительно друг друга и рабочего инструмента осуществляется с помощью двух колонок 6 и втулок 7. Узел крепления рабочего пуансона 8 закреплен на плите 1, а узел контейнера 10 с матрицей 9 расположен на промежуточной плите 3 и центрируется относительно нее бандажом 11 приемного контейнера 12. Подвижная плита 4 связана тягами 13 с колонками 6 и имеет возможность временной фиксации от осевого смещения. Приемный контейнер 12 предназначен для обеспечения противодействия на заготовку 14 и фальшзаготовку при их деформации в винтовой матрице 9. Он закреплен на плите 4, направляется бандажом 11, перемещается тягами 13 и прижимается к нижнему торцу матрицы 9 в верхнем положении клиньями 15.

Для создания в процессе деформации заготовки высокого уровня гидростатического давления, обеспечивающего сохранение ее целостности, установка содержит узел подпора. Он включает нижний пуансон 16, закрепленный на промежуточном штоке 17, который, в свою очередь, установлен на штоке цилиндра выталкивателя пресса. Для деформации жаропрочных титановых сплавов штамп оснащен нагревателем 18, расположенным concentricly контейнеру 10.

Перед началом обработки выполняется нагрев контейнера 10 с матрицей 9 с помощью узла нагрева 18. После чего в матрицу 9 устанавливаются и деформируются фальшзаготовки. В цикле прессования в канал матрицы 9 устанавливаются заготовка 14 и еще одна фальшзаготовка. После этого выполняется рабочий ход плиты 1 и прессование заготовки 14 и фальшзаготовок пуансоном 8. При этом нижний пуансон 16 синхронно с верхним также перемещается вниз и создает усилие противодействия на нижний торец заготовки, что обеспечивает требуемый уровень гидростатического давления.

После рабочего хода прессования плиту 1 с рабочим пуансоном 8 поднимают в верхнее положение, плиту 4 фиксируют относительно тяг 13. Затем плиты 1 и 4 снова опускают вниз вместе с приемным контейнером 12, заготовкой 14, фальшзаготовкой и нижним пуансоном 16. При этом заготовку 14 и фальшзаготовку выпрессовывают из приемного контейнера 12 нижним пуансоном 16. Затем цикл деформации повторяется.

ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенные исследования по систематизации методов уплотнения порошковых и спеченных заготовок в комплексе с результатами моделирования, позволили обосновать применение метода винтовой экструзии в качестве основной операции по снижению остаточной пористости в порошковых заготовках. Конструкция разработанной установки позволяет реализовать деформацию порошковых заготовок с учетом установленных требований, что обеспечивает получение компактных полуфабрикатов с высоким уровнем механических свойств.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павленко Д. В. *Материаловедческие аспекты ресурсосберегающей технологии получения титановых полуфабрикатов* / Д. В. Павленко // *Технологические системы*. – 2013. – №4(65) – С. 21–29.
2. 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.
3. A Jae-keun Iiong, Cüiae-Iiun Lee, Jeoung-Iian Kim Jong-Taek Yeom, Nho-Kwang Park *Ti Strip Properties Fabricated By Powder Rolling Method* // *Surface Review and Letters*. – 2010. – Vol. 17. – № 2. – P. 229–234.
4. Бейгельзимер Я. Е. *Исследование возможности уплотнения образцов из алюминиевой стружки методом винтовой экструзии* / Я. Е. Бейгельзимер, А. И. Шевелев, С. Г. Сынков // *Порошковая металлургия*. – 2004. – № 11–12. – С. 1–5.
5. Reza Derakhshandeh Haghighi. *Simulation of aluminum powder in tube compaction using equal channel angular extrusion* / Reza Derakhshandeh Haghighi, Ahmad Jenabali Jahromi, Behnam Estandiar Jahromi // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2012. – Vol. 21 (2) – P. 143–152.
6. Lapovok R. *Low-temperature compaction of Ti-6Al-4V powder using channel angular extrusion with back pressure* / R. Lapovok, D. Tomus, B. C. Muddle // *Materials Science and Engineering*. – 2008. – A490. – P. 171–180.
7. Khor K. A. *Post-spray hot isostatic pressing of plasma sprayed Ti-6Al-4V hydroxyapatite composite coatings* / K. A. Khor, C. S. Yip, P. Cheang // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1997. – №71. – P. 280–287.

8. Павленко Д. В. Технологические методы уплотнения спеченных титановых заготовок / Д. В. Павленко // *Вестник двигателестроения*. – 2015. – №1. – С. 87–93.
9. Баглюк Г. А. Повышение эффективности уплотнения пористых заготовок за счет интенсификации сдвиговых деформаций / Г. А. Баглюк // *Реология, структура, властивості порошкових та композиційних матеріалів : зб. наук. праць*. – Луцьк : РВВ ЛДТУ, 2004. – С. 35–48.
10. Тарасов А. Ф. Моделирование процесса интенсивного пластического деформирования заготовок по схеме реверсивного сдвига / А. Ф. Тарасов, А. В. Алтухов // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2013. – №4. – С. 47–54.
11. Effect of 2θ -punch shape on material waste during ECAE through a 2θ -Die / A. V. Perig, A. F. Tarasov, I. G. Zhabankov, S. N. Romanko // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2015. – Vol. 30. – Iss 2. – P. 222–231.
12. Столяров В. В. Деформационные методы измельчения структуры // *Вестник научно-технического развития*. – 2013. – № 4 (68). – С. 29–35.
13. Валиев Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : Академкнига, 2007. – 397 с.
14. Применение винтовой экструзии для получения субмикроструктурной структуры и гомогенизации титанового сплава ВТ3-1 / Д. В. Павленко [и др.] // *Вестник двигателестроения*. – 2007. – №2. – С. 185–188.
15. Ивасишин О. М. Экономичная технология получения титановых деталей методом порошковой металлургии / О. М. Ивасишин, А. П. Шпак, Д. Г. Саввакин // *Титан*. – 2006. – №1. – С. 31–39.
16. Синтез сплава Ti-6Al-4V с низкой остаточной пористостью методом порошковой металлургии / О. М. Ивасишин, Д. Г. Саввакин, Ф. Фроес [и др.] // *Порошковая металлургия*. – 2002. – №7/8. – С. 54–64.
17. Алтухов А. В. Систематизация процессов интенсивного пластического деформирования для формирования ультрамелкозернистых и нанокристаллических структур в объемных заготовках / А. В. Алтухов, А. Ф. Тарасов, А. В. Периг // *Письма о материалах*. – 2012. – Т. 2. – № 1. – С. 54–59. – ISSN 2218-5046.
18. Получение неспеченных гетерогенных композиционных материалов методом винтовой экструзии / Я. Е. Бейгельзимер [и др.] // *Физика и техника высоких давлений*. – 2009. – Т. 19. – № 3. – С. 120–124.
19. Винтовая экструзия порошковых заготовок. Численный анализ методом конечного элемента / Я. Е. Бейгельзимер [и др.] // *Физика и техника высоких давлений*. – 2008. – Т. 18. – № 1. – С. 69–82.
20. Штерн М. Б. Модифицированные модели деформирования порошковых материалов на основе пластичных и труднодеформируемых порошков / М. Б. Штерн, О. В. Михайлов // *Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія машинобудування. – 2011. – №62. – С. 13–19.
21. Скороход В. В. Реологические основы теории спекания / В. В. Скороход. – К : Наукова думка, 1972. – 152 с.
22. Винтовая экструзия порошковых заготовок. Эксперимент и обсуждение результатов / Я. Е. Бейгельзимер [и др.] // *Физика и техника высоких давлений*. – 2008. – Т. 18. – № 3. – С. 92–97.
23. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов, С. Г. Сынков. – Донецк : ТЕАН, 2003. – 87 с.
24. Совершенствование конструкций штамповой оснастки, средств автоматизации и прессового оборудования для реализации процесса винтовой экструзии / Я. Е. Бейгельзимер [и др.] // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 4 (37). – С. 184–189.
25. Twist Extrusion – Technique for the Structure Formation / Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, R. Kulagin, O. Prokofeva, A. Reshetov // *Bulk Metal Forming. Proc. 10th Int. Conf. Techn. Plast. (ICTP 2011)*. – 2011. – P. 244–248.

REFERENCE

1. Pavlenko D. V. Materialovedcheskie aspekty resursosbergajushhej tehnologii poluchenija titanovyh polufabrikatov / D. V. Pavlenko // *Tehnologicheskie sistemy*. – 2013. – №4(65) – S. 21–29.
2. Rjabicheva L. A. Jeksperimental'noe issledovanie vlijanja ishodnoj plotnosti na strukturu i svojstva poroshkovej medi pri RKU-pressovanii / L. A. Rjabicheva, V. V. Smoljak // *Resursozberigajuchi tehnologii virobnictva ta obrobki tiskom materialiv u mashinobuduvanni: zb. nauk. pr.* – Lugans'k. – 2010. – S. 18–27.
3. A Jae-keun Iiong, Cüiae-Iiun Lee, Jeoung-Iian Kim Jong-Taek Yeom, Nho-Kwang Park Ti Strip Properties Fabricated By Powder Rolling Method // *Surface Review and Letters*. – 2010. – Vol. 17. – № 2. – P. 229–234.
4. Bejgel'zimer Ja. E. Issledovanie vozmozhnosti uplotnenija obrazcov iz aljuminievoj struzhki metolom vintovoj jekstruzii / Ja. E. Bejgel'zimer, A. I. Shevelev, S. G. Synkov // *Poroshkovaja metallurgija*. – 2004. – № 11–12. – S. 1–5.
5. Reza Derakhshandeh Haghighi. Simulation of aluminum powder in tube compaction using equal channel angular extrusion / Reza Derakhshandeh Haghighi, Ahmad Jenabali Jahromi, Behnam Estandiar Jahromi // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2012. – Vol. 21 (2) – P. 143–152.
6. Lapovok R. Low-temperature compaction of Ti-6Al-4V powder using channel angular extrusion with back pressure / R. Lapovok, D. Tomus, B. C. Muddle // *Materials Science and Engineering*. – 2008. – A490. – P. 171–180.
7. Khor K. A. Post-spray hot isostatic pressing of plasma sprayed Ti-6Al-4V hydroxyapatite composite coatings / K. A. Khor, C. S. Yip, P. Cheang // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1997. – №71. – P. 280–287.
8. Pavlenko D. V. Tehnologicheskie metody uplotnenija spechennyh titanovyh zagotovok / D. V. Pavlenko // *Vestnik dvigatelestroenija*. – 2015. – №1. – S. 87–93.

9. Bagljuk G. A. *Povyshenie jeffektivnosti uplotnenija poristyh zagotovok za schet intensivnizacii sdvigovyh deformacij* / G. A. Bagljuk // *Reologija, struktura, vlastivosti poroshkovih ta kompozicionnih materialiv : zb. nauk. prac'.* – Luc'k : RVV LDTU, 2004. – S. 35–48.
10. Tarasov A. F. *Modelirovanie processa intensivnogo plasticheskogo deformirovanija zagotovok po sheme reversivnogo sdviga* / A. F. Tarasov, A. V. Altuhov // *Metallurgicheskie processy i oborudovanie.* – 2013. – №4. – S. 47–54.
11. *Effect of 2θ-punch shape on material waste during ECAE through a 2θ-Die* / A. V. Perig, A. F. Tarasov, I. G. Zbankov, S. N. Romanko // *Materials and Manufacturing Processes.* – 2015. – Vol. 30. – Iss 2. – P. 222–231.
12. Stoljarov V. V. *Deformacionnye metody izmel'chenija struktury* // *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya.* – 2013. – № 4 (68). – S. 29–35.
13. Valiev R. Z. *Obemnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svojstva* / R. Z. Valiea, I. V. Aleksandrov. – M. : Akademkniga, 2007. – 397 s.
14. *Primenenie vintovoj jekstruzii dlja poluchenija submikrokristallicheskoj struktury i gomogenizacii titanovogo splava VT3-1* / D. V. Pavlenko [i dr.] // *Vestnik dvigatelestroenija.* – 2007. – №2. – S. 185–188.
15. Ivasishin O. M. *Jekonomichnaja tehnologija poluchenija titanovyh detalej metodom poroshkovoje metallurgii* / O. M. Ivasishin, A. P. Shpak, D. G. Savvakina // *Titan.* – 2006. – №1. – S. 31–39.
16. *Sintez splava Ti-6Al-4V s nizkoj ostatnochnoj poristost'ju metodom poroshkovoje metallurgii* / O. M. Ivasishin, D. G. Savvakina, F. Froes [i dr.] // *Poroshkovaja metallurgija.* – 2002. – №7/8. – S. 54–64.
17. Altuhov A. V. *Sistematizacija processov intensivnogo plasticheskogo deformirovanija dlja formirovanija ul'tramelkozernistyh i nanokristallicheskih struktur v obemnyh zagotovkah* / A. V. Altuhov, A. F. Tarasov, A. V. Perig // *Pis'ma o materialah.* – 2012. – T. 2. – № 1. – S. 54–59. – ISSN 2218-5046.
18. *Poluchenie nespechennyh geterogennyh kompozicionnyh materialov metodom vintovoj jekstruzii* / Ja. E. Bejgel'zimer [i dr.] // *Fizika i tehnika vysokih davlenij.* – 2009. – T. 19. – № 3. – S. 120–124.
19. *Vintovaja jekstruzija poroshkovyh zagotovok. Chislennyj analiz metodom konechnogo jelementa* / Ja. E. Bejgel'zimer [i dr.] // *Fizika i tehnika vysokih davlenij.* – 2008. – T. 18. – № 1. – S. 69–82.
20. *Shtern M. B. Modificirovannye modeli deformirovanija poroshkovyh materialov na osnove plastichnyh i trudnodeformiruemyh poroshkov* / M. B. Shtern, O. V. Mihajlov // *Visnik nacional'nogo tehničnogo universitetu Ukraini «Kiivs'kij politehničnij institut». Serija mashinobuduvannja.* – 2011. – № 62. – S. 13–19.
21. Skorohod V. V. *Reologicheskie osnovy teorii spekanija* / V. V. Skorohod. – K : Naukova dumka, 1972. – 152 s.
22. *Vintovaja jekstruzija poroshkovyh zagotovok. Jekspieriment i obsuzhdenie rezul'tatov* / Ja. E. Bejgel'zimer [i dr.] // *Fizika i tehnika vysokih davlenij.* – 2008. – T. 18. – № 3. – S. 92–97.
23. *Vintovaja jekstruzija – process nakoplenija deformacii* / Ja. E. Bejgel'zimer, V. N. Varjuhin, D. V. Orlov, S. G. Synkov. – Doneck : TEAN, 2003. – 87 s.
24. *Sovershenstvovanie konstrukcij shtampovoj osnastki, sredstv avtomatizacii i pressovogo oborudovanija dlja realizacii processa vintovoj jekstruzii* / Ja. E. Bejgel'zimer [i dr.] // *Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov.* – Kramatorsk : DGMA, 2013. – № 4 (37). – S. 184–189.
25. *Twist Extrusion – Technique for the Structure Formation* / Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, R. Kulagin, O. Prokofjeva, A. Reshetov // *Bulk Metal Forming. Proc. 10th Int. Conf. Techn. Plast. (ICTP 2011).* – 2011. – P. 244–248.

Тарасов А. Ф. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ИТ ДГМА;

Бейгельзимер Я. Е. – д-р техн. наук, проф., гл. научн. сотр. ДонФТИ НАНУ;

Павленко Д. В. – канд. техн. наук, доц. каф. ТАД ЗНТУ;

Штерн М. Б. – д-р техн. наук, проф., член-кор. НАНУ, зав. отд. ИПМ НАНУ.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск;
ДонФТИ НАНУ – Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина Национальной академии наук Украины, г. Киев;

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье;

ИПМ НАНУ – Институт проблем материаловедения им. И. М. Францевича Национальной академии наук Украины, г. Киев.

E-mail: dvp_zntu@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.09.2015 г.