

УДК 621.77 : 621.762 : 669.295

Павленко Д. В.

## ОСОБЕННОСТИ УПЛОТНЕНИЯ СПЕЧЕННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДАМИ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Учитывая мировую тенденцию увеличения стоимости энергоресурсов, в последнее время наблюдается повышенный интерес промышленности к технологиям порошковой металлургии. Обладая рядом существенных преимуществ по сравнению с литыми заготовки, полученные методами порошковой металлургии, находят все более широкое применение в автомобильной, энергетической, авиационной и других сферах. Основное из них – высокий коэффициент использования материала. В некоторых случаях спеченные заготовки не требуют механической обработки или обработке подвергается незначительное количество поверхностей. Однако, остаточная пористость, присущая спеченным заготовкам, снижающая весь комплекс характеристик прочности и пластичности, является основным препятствием широкого использования методов порошковой металлургии при изготовлении нагруженных элементов конструкций.

Вторым вариантом использования методов порошковой металлургии, учитывая низкий уровень энергетических затрат при твердофазном синтезе заготовок из порошков, является получение относительно дешевых полуфабрикатов сложнолегированных сплавов для последующей обработки давлением и изготовления, путем механической обработки, деталей машин. Применение методов обработки давлением (ОМД) к спеченным полуфабрикатам титановых сплавов позволяет устранить пористость и обеспечить уровень свойств, сопоставимый со сплавами в деформированном состоянии получаемым по традиционной технологии многостадийного вакуумного переплава и последующей деформационной обработки [0].

С точки зрения применения методов ОМД, основной особенностью спеченных титановых сплавов является низкая пластичность и большая удельная площадь поверхности пор, что приводит к разрушению при деформации, активному газонасыщению и окислению при нагреве. В связи с этим, повышение их технологической пластичности путем обработки в горячем состоянии без защитной среды, например, свободной ковкой, может приводить к появлению альфированного слоя. Деформация ковкой при относительно низких температурах приводит к появлению ковочных трещин. Повышение температуры деформации приводит также к процессам рекристаллизации и роста зерна, что сопровождается снижением уровня механических свойств полуфабрикатов.

Учитывая низкую пластичность, особенностью деформации спеченных заготовок является необходимость обеспечения высокого уровня гидростатической компоненты тензора напряжений в очаге деформации, что позволяет исключить их разрушение. В связи с этим для уплотнения применяют методы ОМД, обеспечивающие пластическую деформацию в условиях близких к гидростатическому сжатию. Наиболее распространенными из них являются горячее изостатическое прессование (ГИП), интенсивная пластическая деформация (ИПД), гидроэкструзия (ГЭ), динамическое прессование, изотермическая штамповка в замкнутый объем и др. [0].

Известно, что для заготовок и деталей из широкого круга сплавов, используемых при производстве газотурбинных двигателей: алюминиевых [0, 0], никелевых [0, 0] и титановых [0], а также алюминидов титана [0] и покрытий [0] эффективно применяют технологию горячего изостатического прессования. Основными преимуществами ГИП является высокий уровень гидростатического давления, что исключает возможность разрушения в процессе обработки как компактных, так и некомпактных (спеченных и порошковых) заготовок. В работах [0, 0] рассмотрены особенности уплотнения образцов из титанового сплава аналогичного по химическому составу сплаву ВТ6 из порошков частицы которых имели сферическую форму

горячим изостатическим прессованием. Показано, что возможность относительного перемещения сферических частиц в значительной степени способствует ранней стадии уплотнения.

Для уплотнения и получения компактных полуфабрикатов в настоящее время широко применяют методы интенсивной пластической деформации, такие как равноканальное угловое прессование и винтовая экструзия [0, 0, 0]. Их преимуществом по сравнению с ГИП является действие высокого уровня гидростатического давления в совокупности с деформацией сдвигом, что приводит к интенсификации процесса уплотнения [0, 0].

Альтернативным способом уплотнения спеченных заготовок, обладающим рядом технологических преимуществ в сравнении с методами ИПД и ГИП является гидроэкструзия [0]. Авторы работы [0] указывают, что при обработке ГЭ достаточно пластичных материалов не только исключается появление микронесплошностей, но имеет место залечивание имеющихся в металле микротрещин, пор и других дефектов. Главная особенность ГЭ состоит в том, что она характеризуется особыми условиями обработки, а именно, до начала деформирования заготовка подвергается всестороннему сжатию. Уровень гидростатического давления, достигаемого до начала процесса опрессовывания заготовки, однозначно определяется пределом текучести материала. Пока он не будет достигнут в зоне контакта с матрицей, заготовка продавливаться через матрицу не начнет [0]. Указанная особенность предопределяет эффективность применения ГЭ для деформации спеченных заготовок, для сохранения целостности которых важным фактором является высокий уровень гидростатической компоненты напряжений в очаге деформации.

Таким образом, указанные методы являются альтернативными. В настоящее время отсутствуют исследования направленные на оценку эффективности их применения для устранения пористости в спеченных заготовках из титановых сплавов.

Целью настоящей работы являлся анализ основных методов обработки давлением применимых для объемного уплотнения спеченных заготовок титановых сплавов. Задачи, которые были решены, связаны с исследованием структуры спеченных титановых образцов, подвергнутых горячему изостатическому прессованию, винтовой экструзии и гидроэкструзии.

Спеченные образцы получали путем прессования в жесткой цилиндрической пресс-форме и последующего вакуумного спекания порошков титана ПТ5 ТУ У14-10-026-98 (фракционный состав  $-0,5/+0,16$  мкм) получаемых из отсеков титана губчатого. Прессование выполняли на гидравлическом прессе при давлении 700 МПа. Спекание выполняли в вакуумной печи СНВЭ-1.3.1/16ИЗ при вакууме  $10^{-5}$  Па, температуре 1250°C в течении 3-х часов. Охлаждение образцов выполняли в вакууме совместно с печью.

Горячее изостатическое прессование выполняли в газостатическом прессе швейцарской фирмы AVURE модели Qvinus QIN при температуре  $960 \pm 10^\circ\text{C}$  в течение 4,5 ч и давлении 140 МПа. Обработке подвергали призматические образцы размером 50x10x10 мм.

Гидроэкструзии подвергали цилиндрические образцы диаметром 50 мм. Коэффициент вытяжки образцов  $\mu$  составлял 1,6 и 2,5.

Интенсивную пластическую деформацию выполняли на установке с винтовой матрицей прямоугольного сечения 28x18 мм и углом закрутки 30°. С целью увеличения технологической пластичности материала к переднему концу образцов прикладывали противодавление. Образцы предварительно нагревали в печи сопротивления до температуры 400° С. Оснастка в процессе деформации имела такую же температуру. Выполняли пять последовательных циклов деформации.

Пористость образцов определяли методом гидростатического взвешивания и путем анализа микрофотографий металлографических шлифов. Исследования структуры выполняли с использованием оптического микроскопа НЕОРНОТ и растрового электронного микроскопа фирмы JEOL во вторичных электронах.

Исследования микроструктуры исходных образцов после спекания позволили установить, что она представлена зернами  $\alpha$ -фазы, морфология которых характерна для промышленных спеченных титановых сплавов полученных на основе порошка ПТ5 (рис. 1). Пористость исходных образцов после прессования и спекания находилась в диапазоне 11...14 %.

Поровое пространство характеризовалось высоким значением фрактальной размерности, являющейся количественной оценкой отклонения пор от сферической формы [0, 0].

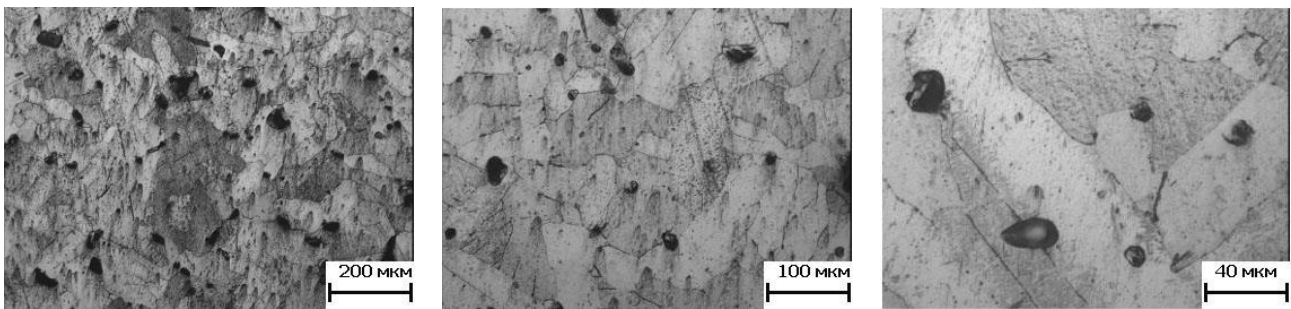
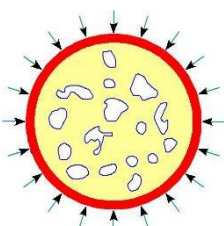
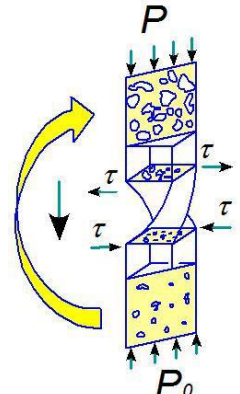
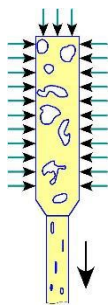
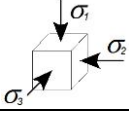
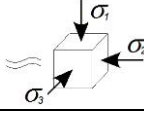
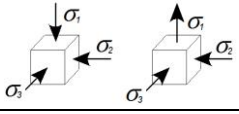


Рис. 1. Микроструктура спеченных образцов в исходном состоянии (сплав ВТ1-0)

Схемы и условия деформации при применении исследованных методов ОМД к спеченным образцам приведены в табл. 1.

Таблица 1

Схемы и условия ОМД спеченных образцов из титановых сплавов

Вид обработки	Горячее изостатическое прессование (ГИП)	Винтовая экструзия (ВЭ)	Гидроэкструзия (ГЭ)
Схема			
Температура деформации	960±10°С горячая	450±50°С теплая	20±5°С холодная
Напряженно-деформированное состояние			
Степень деформации	0,5...1	10...12	1...3

Результаты исследования микроструктуры образцов после ГИП позволили установить, что в поверхностном слое происходило эффективное залечивание пор под воздействием высокой температуры и давления (рис. 2). По мере удаления от поверхности к сердцевине образца пористость увеличивалась. На глубине порядка 1,5..1,6. мм пористость соответствовала исходным образцам, не подвергавшихся ГИП.

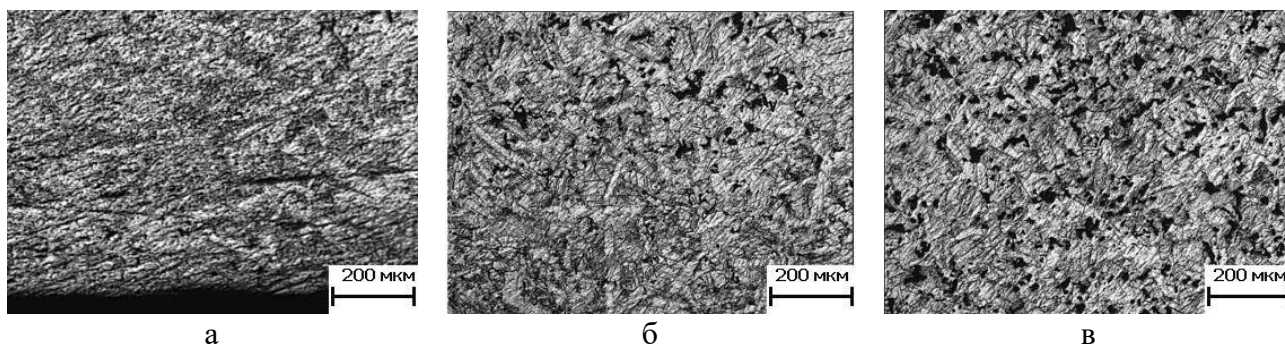


Рис. 2. Микроструктура поверхностного слоя (а) переходной зоны (б) и центральной части (в) образца, после ГИП (x50) (сплав ВТ1-0).

Следует отметить изменение морфологии порового пространства в образцах после ГИП по мере удаления от поверхности. Средний размер пор в поверхностном слое составлял  $26 \pm 9 \mu\text{м}$ , в то время как размер пор в центральной части составлял  $54 \pm 20 \mu\text{м}$ . В поверхностном слое наблюдались поры преимущественно сферической формы, в то время как в центральной части морфология пор не претерпевала существенных изменений в сравнение с исходным состоянием. Они представляли собой поры неправильной формы с разветвленными границами (рис. 3). Сфероидизация пор, вероятно, происходила в результате комплексного воздействия рабочей температуры и давления.

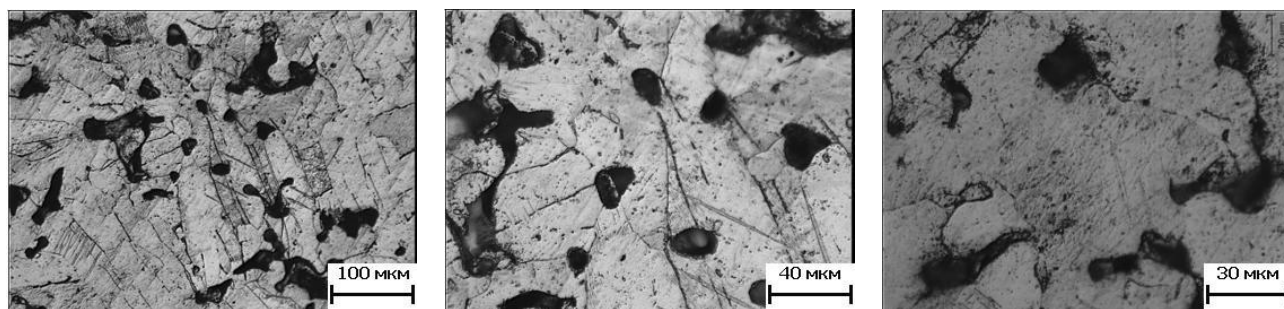


Рис. 3. Морфология порового пространства переходной зоны спеченного образца, подвергнутого ГИП (сплав ВТ1-0)

Анализ эволюции порового пространства в различных зонах образцов показывает, что уплотнение происходит преимущественно в тонком поверхностном слое. Это может объясняться тем, что на начальных стадиях всестороннего сжатия при ГИП поры в поверхностном слое спеченных образцов захлопываются, образуя плотный, практически беспористый слой (рис. 2, а). Создавая вокруг внутренней части заготовки своеобразный «кокон», упрочненный слой препятствует передаче усилия от рабочего тела газостата внутренним слоям, тем самым – их пластической деформации и уплотнению. Вследствие этого, для спеченных образцов устранение пористости наблюдается преимущественно в тонком поверхностном слое, в то время как в центральной зоне пористость остается практически неизменной.

При уплотнении образцов винтовой экструзией их циклично подвергали пластической деформации при интенсивном воздействии касательных напряжений в условиях близких к гидростатическому сжатию. Интенсификацию касательных напряжений, способствующих захлопыванию пор во всем поперечном сечении образцов, реализовывали путем циклического поворота сечения заготовки относительно продольной оси при прохождении винтового канала матрицы. В результате наблюдалось интенсивное объемное уплотнение (рис. 4).

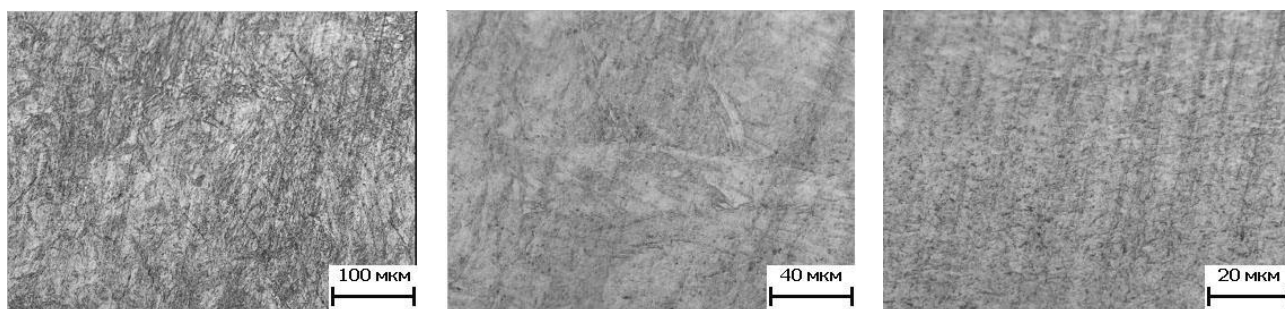


Рис. 4. Микроструктура спечённых образцов, подвергнутых ВЭ (5 циклов) (сплав ВТ1-0)

Исследования эволюции порового пространства под воздействием интенсивной пластической деформации ВЭ показало, что данный метод является эффективным для уплотнения объемных некомпактных заготовок. Особенность ИПД, связанная с деформацией без формоизменения, предопределяет возможность реализации последовательно ряда циклов деформаций и, тем самым, уплотнение заготовок до величины, приближающейся к аналогичному значению характерному для сплавов в литом и деформированном состояниях [0]. Необходимо также отметить, что ВЭ позволяет не только устранять пористость, но и формировать в заготовках субмикроструктурную структуру, что способствует повышению уровня их свойств.

При деформации образцов гидроэкструзией, с исследованными коэффициентами вытяжки, наблюдалось их разрушение (растрескивание) по переднему и заднему торцам на длине 10...25 мм. Попытки выполнить деформацию с большим значением коэффициента вытяжки приводили к нарушению целостности образцов и их полному разрушению. Причиной разрушения образцов являлась недостаточная величина гидростатической компоненты тензора напряжений в очаге деформации, вследствие чего не происходил рост технологической пластичности материала [0].

Анализ микроструктуры образцов в продольном направлении после деформации ГЭ указывает на формирование текстуры деформации (рис. 5, 6). Наиболее выраженная текстура отмечается для образцов, экструдированных с коэффициентом вытяжки 2,5. Таким образом, при ГЭ наблюдалось изменение морфологии структурных элементов, в то время как изменения их размера и формирования субмикроструктурной структуры материала, при исследованных условиях деформации, не происходило. Наличие текстуры деформации свидетельствует об отсутствии вихрей, способствующих гомогенизации химического состава, свойственных деформации, например, винтовой экструзией [0].

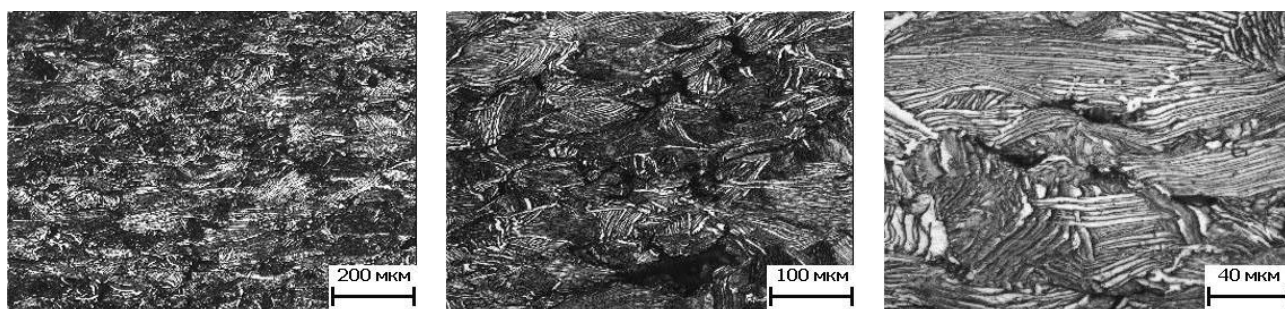


Рис. 5. Структура образцов подвергнутых гидроэкструзии в продольном направлении (коэффициент вытяжки – 2,5) (сплав 2М2А)

В результате исследований установлено, что ГЭ способствовала уплотнению во всем объеме образцов. Так, остаточная пористость образцов составляла 6...8%  $\mu=2,5$  и 11...13% при  $\mu=1,6$ . Наибольшие значения пористости соответствовали передней части образцов. Для образцов, экструдированных с большим значением коэффициента вытяжки, происходило изменение морфологии их порового пространства. Поры «вытягиваются» в поперечном направлении, наблюдаются дефекты материала в виде флокенов.

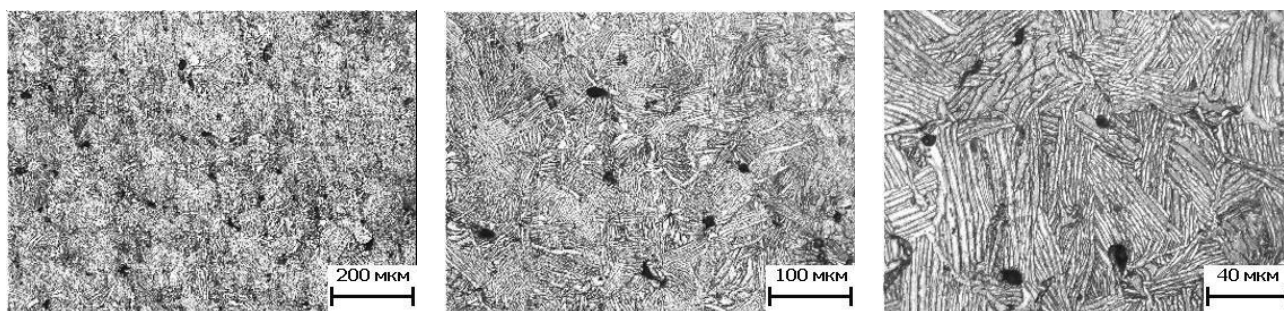


Рис. 6. Структура образцов, подвергнутых гидроэкструзии в поперечном направлении (коэффициент вытяжки 2,5) (сплав 2М2А)

Результаты исследования структуры спеченных образцов подверженных деформации гидроэкструзией показали, что она способствует уплотнению и снижению остаточной пористости. Высокий уровень гидростатической компоненты обеспечивает сохранение целостности центральной части образцов. Однако, особенности напряженно-деформированного состояния передней части образца при выходе из фильеры приводят к ее разрушению. Было установлено, что при коэффициенте вытяжки в диапазоне 1,6...2,5 не происходит полного устранения пористости. Дальнейшее увеличение коэффициента вытяжки приводит к разрушению.

Недостатком уплотнения ГЭ является формоизменение заготовки, что не дает возможность реализовать цикл ее многократной обработки для накопления больших степеней деформации и устранения остаточной пористости. Причиной наблюдаемых явлений в процессе ГЭ являются особенности условий обработки, заключающиеся в том, что в условиях всестороннего сжатия находится не очаговая зона деформации, а недеформированная часть образца. В результате, реализуемая величина гидростатической компоненты в очаге деформации оказывается меньше чем при известных методах ИПД, например винтовой экструзией [0].

Принимая во внимание возможность построения технологического процесса получения деформированных полуфабрикатов из спеченных заготовок, например, для лопаток компрессора газотурбинных двигателей, на основе последовательных операций ГЭ с незначительным коэффициентом вытяжки, следует учитывать необходимость не только уплотнения материала, но и обеспечение условий для гомогенизации и формирования в нем субмикроструктурной структуры. Отсутствие условий для формирования вихрей в заготовке в процессе ГЭ не способствует гомогенизации химического состава, что наряду с остаточной пористостью и дефектами материала типа флокенов будут приводить к снижению уровня прочностных свойств материала и увеличению величины их рассеяния. Также процесс деформации ГЭ не обеспечивает условия дробления структурных составляющих и приводит к формированию текстуры деформации.

## ВЫВОДЫ

В результате исследования методов обработки давлением, обеспечивающих напряженно-деформированное состояние в очаге деформации, близкое к всестороннему сжатию, установлены основные особенности их применения для уплотнения заготовок из спеченных титановых сплавов.

Установлено, что в процессе горячего изостатического прессования уплотняется тонкий поверхностный слой образцов. Морфология порового пространства центральной части образцов не претерпевает существенных изменений. В ней отмечается уменьшение среднего размера пор, однако их полного устранения не происходит. Интенсивная пластическая деформация винтовой экструзией способствует эффективному уплотнению по всему поперечному сечению. Деформация гидроэкструзией также способствует объемному уплотнению образцов, однако, такой вид обработки приводит к их формоизменению и формированию текстуры деформации. Учитывая незначительную допустимую степень деформации заготовок при гидроэкструзии, технологический процесс уплотнения должен включать большое количество последовательных операций экструдирования с незначительными величинами вытяжки.



Анализ рассмотренных методов уплотнения показывает, что наиболее рациональным технологическим методом уплотнения заготовок из спечённых титановых сплавов с целью получения компактных полуфабрикатов является интенсивная пластическая деформация винтовой экструзией.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павленко Д.В. Влияние исходного состояния титановых полуфабрикатов, подверженных интенсивной пластической деформации, на структуру и свойства / Д.В. Павленко, А.В. Овчинников // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2015. – Т.51 – №1 – С. 50–58.
2. Кокорин В.Н. Прессование деталей и заготовок с использованием механических смесей с различным фазовым состоянием / В. Н. Кокорин. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – 51 с.
3. Guang Ran The effect of hot isostatic pressing on the microstructure and tensile properties of an unmodified A356-T6 cast aluminum alloy / Guang Ran, Jingen Zhou, Q.G. Wang // *Journal of Alloys and Compounds*, 2006. – V. 421. – P. 80–86.
4. Влияние газостатирования на структуру и свойства слитков алюминиевого заклепочного сплава Д18 / С.П. Ходанов, В.В. Телешов, В.В. Захаров, А.П. Головлева // *Технология легких сплавов*. – 2008. – № 2. – С. 81–90.
5. Качество отливок рабочих лопаток турбины, модифицированных наночастицами тугоплавких соединений и обработанных ГИП / А.Я. Качан, Н.А. Лысенко, А.С. Дудников, С.А. Уланов // *Вестник двигателестроения*. – 2014. – № 1. – С. 75–81.
6. Sarma Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of hot isostatically pressed superalloy Inconel 718 / G. Appa Rao, Mahendra Kumar, M. Srinivas, D.S. Sarma // *Materials Science and Engineering*. – 2003. – A355. – P. 114–125.
7. Структурно-фазовые превращения и механические свойства титановых сплавов, полученных методом порошковой металлургии, после горячего изостатического прессования / А.И. Дехтяр, И.В. Мусеева, В.В. Невдача, Д.Г. Саввакин // *Физика и техника высоких давлений*. – 2012. – Т. 22. – V 4. – С. 90–102.
8. Spray forming of Ti 48.9Al (at.%) and subsequent hot isostatic pressing and forging / Rainer Gerling, F.P. Schimansky, G. Wegmann, J.X. Zhang // *Materials Science and Engineering*. – 2002. – A326. – P. 73–78.
9. 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.
10. Delo D.P. Early stage consolidation mechanisms during hot isostatic pressing of Ti-6Al-4V powder compacts / D.P. Delo, H.R. Piehler // *Acta materials*. – 1999. – Vol. 47. – № 9. – P. 2841–2852.
11. Delo D.P. Modeling of hot isostatic pressing and hot triaxial compaction of Ti-6Al-4V powder / D. P. Delo, R. E. Dilton, S. L. Semiatin, H. R. // *Acta materials*. – 1999. – Vol. 47. – № 11. – P. 3159–3167.
12. Винтовая экструзия порошковых заготовок. ii. эксперимент и обсуждение результатов / Я.Е. Бейгельзимер, О.В. Михайлов, А.С. Сынков, М.Б. Штерн // *Физика и техника высоких давлений*. – 2008. – т.18. – № 3. – С. 92–97.
13. 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.
14. Larpovok R. Low-temperature compaction of Ti-6Al-4V powder using channel angular extrusion with back pressure / R. Larpovok, D. Tomus, B.C. Muddle // *Materials Science and Engineering*. – 2008. – A490. – P. 171–180.
15. Баглюк Г. А. Повышение эффективности уплотнения пористых заготовок за счет интенсификации сдвиговых деформаций / Г. А. Баглюк // *Реологія, структура, властивості порошкових та композиційних матеріалів: збірник наук. праць*. – Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2004. – С. 35–48.
16. Баглюк Г. А. Влияние деформационных параметров на структуру и свойства горячештампованных порошковых материалов / Г.А. Баглюк // *Обработка материалов давлением*. – 2011. – № 1 (26). – С. 139–145.
17. Новые схемы накопления больших пластических деформаций с использованием гидроэкструзии / Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, С.Г. Сынков, А.Н. Сапронов, В.Г. Сынков // *Физика и техника высоких давлений* – 1999. – Т. 9. – № 3. – С. 109–111.
18. Хаймович П.А. От гидроэкструзии к барокриодеформированию / П.А. Хаймович // *Физика и техника высоких давлений* – 2013. – Т. 23. – № 1. – С. 56–67.
19. Кульков С.Н. Фрактальная размерность поверхностей пористых керамических материалов / С.Н. Кульков, Ян Томаш, С.П. Буякова // *Письма в ЖТФ*. – 2006. – Т 32. – Вып. 2. – С. 51–55.
20. Айтимбетова А.Н. Фрактальная размерность поверхности порового пространства волластонитовой керамики / А.Н. Айтимбетова, О.Н. Каныгина // *Вестник КРСУ*. – 2010. – Т.10. – № 10. – С. 118–123.
21. Павленко Д.В. Повышение технологической пластичности спеченных титановых сплавов / Д.В. Павленко // *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. – 2015. – Випуск 15. – С. 1–14.
22. Павленко Д.В. Выхри в некомпактных заготовках при деформации винтовой экструзией / Д.В. Павленко, Я.Е. Бейгельзимер // *Порошковая металлургия*. – 2015. – №9/10. – С. 12–22.
23. Анализ винтовой экструзии порошковых заготовок методами модифицированных теорий пластичности пористых тел / А.В. Кузьмов, М.Б. Штерн, Е.Г. Киркова, Я.Ю. Бейгельзимер, Д.В. Павленко // *Порошковая металлургия*. – 2015. – №11/12. – С. 3–14.

## REFERENCES

1. Pavlenko D.V. Vlijanie ishodnogo sostojanija titanovyh polufabrikatov, podverzhennyh intensivnoj plasticheskoj deformacii, na strukturu i svojstva / D.V. Pavlenko, A.V. Ovchinnikov // *Fiziko-himichna mehanika materialiv*. – 2015. – T.51 – №1. – С. 50–58.
2. Kokorin V.N. Pressovanie detalej i zagotovok s ispol'zovaniem mehanicheskikh smesej s razlichnym fazovym sostojaniem / V. N. Kokorin. – Ul'janovsk: UIGTU, 2009. – 51 s.
3. Guang Ran The effect of hot isostatic pressing on the microstructure and tensile properties of an unmodified A356-T6 cast aluminum alloy / Guang Ran, Jingen Zhou, Q.G. Wang // *Journal of Alloys and Compounds*, 2006. – V. 421. – R. 80–86.
4. Vlijanie gazostatirovanija na strukturu i svojstva slitkov aljuminievogo zaklepochnogo splava D18 / S.P. Hodanov, V.V. Teleshov, V.V. Zaharov, A.P. Golovleva // *Tehnologija legkih splavov*. – 2008. – № 2. – S. 81–90.
5. Kachestvo otlivok rabochih lopatok turbiny, modificirovannyh nanochasticami tugoplavkih soedinenij i obrabotannyh GIP / A.Ja. Kachan, N.A. Lysenko, A.S. Dudnikov, S.A. Ulanov // *Vestnik dvigatelestroenija*. – 2014. – № 1. – S. 75–81.
6. Sarma Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of hot isostatically pressed superalloy Inconel 718 / G. Appa Rao, Mahendra Kumar, M. Srinivas, D.S. Sarma // *Materials Science and Engineering*. – 2003. – A355. – P. 114–125.
7. Strukturno-fazovye prevrashhenija i mehanicheskie svojstva titanovyh splavov, poluchennyh metodom poroshkovej metallurgii, posle gorjachego izostaticeskogo pressovanija / A.I. Dehtjar, I.V. Moiseeva, V.V. Nevdacha, D.G. Savvakina // *Fizika i tehnika vysokih davlenij*. – 2012. – T. 22. – V 4. – S. 90–102.
8. Spray forming of Ti 48.9Al (at.%) and subsequent hot isostatic pressing and forging / Rainer Gerling, F.P. Schimansky, G. Wegmann, J.X. Zhang // *Materials Science and Engineering*. – 2002. – A326. – P. 73–78.
9. 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. – R. 280–287.
10. Delo D.P. Early stage consolidation mechanisms during hot isostatic pressing of Ti-6Al-4V powder compacts / D.P. Delo, H.R. Piehler // *Acta materials*. – 1999. – Vol. 47. – № 9. – P. 2841–2852.
11. Delo D.P. Modeling of hot isostatic pressing and hot triaxial compaction of Ti-6Al-4V powder / D. P. Delo, R. E. Dutton, S. L. Semiatin, H. R. // *Acta materials*. – 1999. – Vol. 47. – № 11. – P. 3159–3167.
12. Vintovaja jekstruzija poroshkovyh zagotovok. ii. jeksperiment i obsuzhdenie rezul'tatov / Ja.E. Bejgel'zimer, O.V. Mihajlov, A.S. Synkov, M.B. Shtern // *Fizika i tehnika vysokih davlenij*. – 2008. – t.18. – № 3. – S. 92–97.
13. 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.
14. 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. – R. 171–180.
15. Bagljuk G. A. Povyshenie jeffektivnosti uplotnenija poristyh zagotovok za schet intensivnizacii sdvigovyh deformacij / G. A. Bagljuk // *Reologija, struktura, vlastivosti poroshkovyh ta kompozicijnyh materialiv : zbirnik nauk. prac'*. – Luc'k : RVV LDTU, 2004. – S. 35–48.
16. Bagljuk G. A. Vlijanie deformacionnyh parametrov na strukturu i svojstva gorjacheshtampovannyh poroshkovyh materialov / G.A. Bagljuk // *Obrabotka materialov davleniem*. – 2011. – № 1 (26). – S. 139–145.
17. Novye shemy nakoplenija bol'shijh plasticheskijh deformacij s ispol'zovaniem gidrojekstruzii / Ja.E. Bejgel'zimer, V.N. Varjuhin, C.G. Synkov, A.N. Saprionov, V.G. Synkov // *Fizika i tehnika vysokih davlenij* – 1999. – T. 9. – № 3. – S. 109–111.
18. Hajmovich P.A. Ot gidrojekstruzii k barokriodeformirovaniju / P.A. Hajmovich // *Fizika i tehnika vysokih davlenij*. – 2013. – T. 23. – № 1. – S. 56–67.
19. Kul'kov S.N. Fraktal'naja razmernost' poverhnostej poristyh keramicheskijh materialov / S.N. Kul'kov, Jan Tomash, S.P. Bujakova // *Pis'ma v ZhTF*. – 2006. – T 32. – Vyp. 2. – S. 51–55.
20. Ajtimbetova A.N. Fraktal'naja razmernost' poverhnosti porovogo prostranstva vollastonitovoj keramiki / A.N. Ajtimbetova, O.N. Kanygina // *Vestnik KRSU*. – 2010. – T.10. – № 10. – S. 118–123.
21. Pavlenko D.V. Povyshenie tehnologicheskoj plastichnosti spechennyh titanovyh splavov / D.V. Pavlenko // *Procesi mehanichnoi obrabki v mashinobuduvanni*. – 2015. – Vipusk 15. – S. 1–14.
22. Pavlenko D.V. Vihri v nekompaktnyh zagotovkah pri deformacii vintovoj jekstruziej / D.V. Pavlenko, Ja.E. Bejgel'zimer // *Poroshkovaja metallurgija*. – 2015. – №9/10. – S. 12–22.
23. Analiz vintovoj jekstruzii poroshkovyh zagotovok metodami modificirovannyh teorij plastichnosti poristyh tel / A.V. Kuz'mov, M.B. Shtern, E.G. Kirkova, Ja.Ju. Bejgel'zimer, D.V. Pavlenko // *Poroshkovaja metallurgija*. – 2015. – №11/12. – S. 3–14.

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

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье.

E-mail: [dvp\\_zntu@mail.ru](mailto:dvp_zntu@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 25.02.2017 г.