

УДК 669.295: 621.77.016.2

Канд. техн. наук Д. В. Павленко

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УПЛОТНЕНИЯ СПЕЧЕННЫХ ТИТАНОВЫХ ЗАГОТОВОК

Исследованы особенности уплотнения заготовок из спеченных титановых сплавов при высокоэнергетическом воздействии методами горячего изостатического прессования и интенсивного пластического деформирования винтовой экструзией. Установлено, что изостатическое прессование, для заготовок из исследованных порошков титана и условий компактирования, приводит к уплотнению поверхностного слоя. Винтовая экструзия обеспечивает получение компактной структуры во всем объеме заготовок.

Ключевые слова: порошок, титан, спеченные заготовки, горячее изостатическое прессование, интенсивная пластическая деформация, винтовая экструзия, пористость, структура, свойства.

Формулирование проблемы и анализ публикаций

Методы порошковой металлургии благодаря ряду достоинств, в сравнении с другими методами получения заготовок для деталей машин, находят широкое применение в технике. Одним из недостатков заготовок, полученных методами порошковой металлургии является остаточная пористость, существенно снижающая комплекс механических и физических свойств и, таким образом, ограничивающим их применение для ответственных, высоконагруженных деталей машин. В работе [1] показано, что определяющей причиной низких механических свойств спеченных изделий является остаточная пористость. Наиболее существенно она проявляется в снижении прочности и вязкости разрушения материалов на основе металлов, обладающих низким сопротивлением распространению трещин. Перспективный рост промышленного производства определил необходимость изыскания специальных методов повышения комплекса механических свойств заготовок и деталей, изготавливаемых методами порошковой металлургии.

Известно, что отличительной особенностью некомпактных (порошковых и пористых) тел является возможность деформации с изменением формы и объема, что лежит в основе эффекта снижения пористости и уплотнения. Для уплотнения применяют такие методы высокоэнергетического воздействия как горячее изостатическое прессование (ГИП), интенсивную пластическую деформацию (ИПД), динамическое прессование, изотермическую штамповку в замкнутый объем и др. [2]. Особенностью деформации некомпактных тел является необходимость обеспечения высокого уровня гидростатической компоненты в очаге деформации, что исключает их

разрушение. В связи с этим для уплотнения применяют высокоэнергетические методы деформации, обеспечивающие пластическую деформацию в условиях гидростатического сжатия. Наиболее распространенными и применяемыми для производства компактных полуфабрикатов является горячее изостатическое прессование и методы интенсивной пластической деформации – равноканальное угловое прессование и винтовая экструзия (ВЭ).

Основной задачей ГИП является устранение пористости и повышение однородности структуры материала. В процессе ГИП осуществляется одновременное воздействие на заготовку высокой температуры и давления, создаваемого в газостате инертным газом, под воздействием которого происходит уплотнение материала благодаря залечиванию пор по механизму локальной пластической деформации, интенсивной кратковременной ползучести и диффузионной сварки.

Принимая во внимание особенности процессов, проходящих в материале в процессе ГИП можно предполагать, что данная технология является эффективной применительно и к заготовкам, получаемым путем спекания металлических порошков. Применение ГИП для заготовок и деталей газотурбинных двигателей является важным звеном в технологии их изготовления, позволяющим получать заготовки с высоким коэффициентом использования материала и низкой остаточной пористостью. Однако известно, что ГИП является эффективным только в том случае, когда дефекты (рыхлоты, раковины, поры) являются внутренними и не имеют связи с поверхностью. Дискуссионным также является вопрос об эффективности залечивания пор в объемных, некомпактных заготовках.

Горячее изостатическое прессование эффективно применяют для заготовок и деталей из широкого круга сплавов, используемых при производстве газотурбинных двигателей: алюминиевых [3, 4], никелевых [5, 6] и титановых [7], а также алюминидов титана [8] и покрытий [9]. Основными преимуществами ГИП является высокий уровень гидростатического давления, что исключает возможность разрушения в процессе обработки как компактных так и некомпактных заготовок. В работах [10, 11] рассмотрены особенности уплотнению прессовок из титанового сплава аналогичного по химическому составу сплаву ВТ6, компактированных из порошков, частицы которых имели сферическую форму. Показано, что возможность относительного перемещения сферических частиц в значительной степени способствует ранней стадии уплотнения. Механизмы уплотнения на ранних стадиях (до примерно 90 % относительной плотности) включают сложные взаимодействия соседних частиц основанные на их способности к взаимной деформации и разрушению, а также аккомодации [10]. Применение сферических порошков позволяет обеспечить изостатическим прессованием плотность до 100% практически во всем объеме изделий. Отмечается, что эффективность ГИП повышается при использовании порошковой смеси из сферических порошков, частицы которых значительно различаются по размеру.

Такие методы интенсивной пластической деформации как равноканальное угловое прессование и винтовая экструзия в настоящее время применяются для компактирования порошковых смесей и получения компактных полуфабрикатов [12–14]. Их преимуществом в сравнении с ГИП является действие высокого уровня гидростатического давления в совокупности с деформацией сдвигом, что приводит к интенсификации процесса уплотнения [15, 16].

Таким образом из анализа существующих технологических методов уплотнения можно установить, что ГИП и ИПД являются конкурирующими с точки зрения эффективности уплотнения спеченных титановых заготовок. Остается дискуссионным вопрос о эффективности их применения в зависимости от используемых порошков титана в частности, для наиболее перспективных с точки зрения снижения стоимости получения деформированных полуфабрикатов порошков, получаемых из отсевных порошков.

Целью работы являлась оценка эффективности применения высокоэнергетических методов уплотнения ГИП и ВЭ для получения компактных полуфабрикатов из титановых порошков изготавливаемых из отсевов титана губчатого.

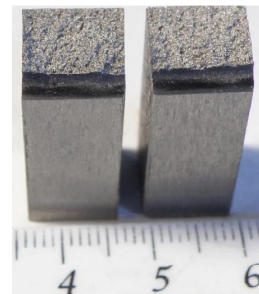
Материалы и методы исследований

Спеченные заготовки 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 отсевов 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 °С в течение 3-х часов. Охлаждение заготовок выполняли в вакууме совместно с печью. Химический состав спеченных заготовок соответствовал сплаву ВТ1-0.

Горячее изостатическое прессование выполняли в газостатическом прессе швейцарской фирмы AVURE модели Qvinus QIN 0,9x1,5-1400-2070-MURC. Обработке подвергали призматические образцы размером 50×10×10 мм (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Общий вид газостата Qvinus QIN (а) и подвергнутых ГИП образцов, разрушенных при динамических испытаниях (б)

Изостатическое прессование выполняли по следующему режиму:

- начальное давление в камере -25 ± 5 МПа;
- скорость нагрева до температуры 850 ± 10 °С – 810 °С/мин;
- выдержка при температуре 850 ± 10 °С – 1,5 ч при давлении 120 МПа;
- скорость нагрева до температуры 960 ± 10 °С – 34 °С/мин;
- выдержка при температуре 960 ± 10 °С – 4,5 ч при давлении 140 МПа;
- охлаждение до температуры 300 °С.

Интенсивную пластическую деформацию спеченных заготовок (рис. 2) выполняли на установке с винтовой матрицей прямоугольного сечения 28×18 мм и углом закрутки 30 ° по технологии, описанной в работе [17]. С целью увеличения технологической пластичности материала к переднему концу заготовки прикладывали противодавление. Заготовки предварительно нагревали в печи сопротивления до температуры 400 °С. Оснастка в процессе деформации имела такую же температуру. Выполняли пять последовательных циклов деформации заготовок.



Рис. 2. Общий вид заготовок для интенсивной пластической деформации винтовой экструзией

Образцы для определения механических свойств вырезали из заготовок после уплотнения электроэрозионным способом с последующей механической обработкой для удаления дефектного поверхностного слоя. Исследования структуры и фактографический анализ изломов выполняли с использованием оптического микроскопа НЕОРНОТ и растрового электронного микроскопа фирмы JEOL во вторичных электронах. Пористость определяли по результатам анализа микрофотографий в системе ImagePro Plus, а также путем гидростатического взвешивания.

Испытание на растяжение выполняли на серво-гидравлической машине «INSTRON» 8802 при комнатной температуре. База экзотензометра составляла 25 мм. В процессе испытаний деформацию рабочей части образца контролировали с точностью ±1 мкм. Точность измерения напряжений в рабочем сечении образца составляла ±3 МПа. Показание экзотензометра и упругого динамометра отцифровывали с дискретностью 0,01 с.

Ударную вязкость определяли по результатам испытаний на ударный изгиб согласно ГОСТ 9454-78 на маятниковом копре IMP-460J фирмы «INSTRON», оснащенного цифровой системой сбора информации. Использовали образцы соответствующие типу 1 (с U-образным концентратором). Исследования проводили для партии образцов обработанных по одинаковым режимам.

Результаты исследований

Результаты исследования микроструктуры образцов после ГИП позволили установить, что

в поверхностном слое поры не наблюдались (рис. 3). По мере удаления от поверхности к сердцевине образца пористость увеличивается. На глубине порядка 1500...1600 мкм пористость соответствует исходным образцам, которые не подвергались прессованию.

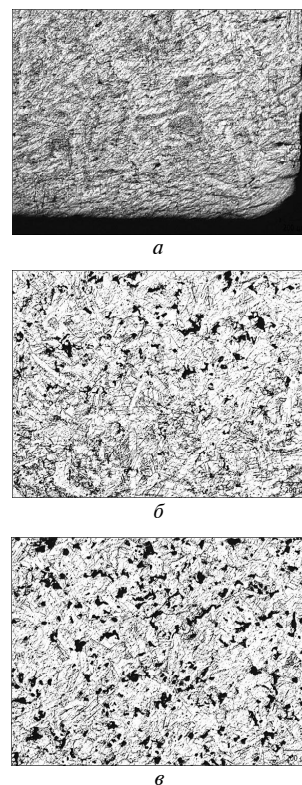


Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя (а) переходной зоны (б) и центральной части (в) образца, подвергнутого ГИП (× 50)

Следует также отметить изменение морфологии порового пространства в образцах после ГИП по мере удаления от поверхности. Средний размер пор в поверхностном слое составлял 26 ± 9 мкм, в то время как размер пор в центральной части составлял 54 ± 20 мкм. 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. 4). Сфероидизация, вероятно, происходит в результате комплексного воздействия рабочей температуры газостата и давления.

Анализ эволюции порового пространства в различных зонах образцов показывает, что уплотнение происходит преимущественно в поверхностном слое. В тоже время, как было сказано выше, в некоторых источниках указывается на то, что ГИП эффективно применяют для устранения дефектов в литых заготовках, например, лопаток

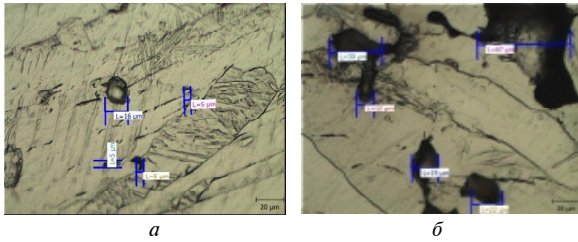


Рис. 4. Морфология порового пространства в спеченном образце подвергнутом ГИП в приповерхностной (а) и центральной (б) зонах ($\times 500$)

турбин газотурбинных двигателей. Различие в особенностях уплотнения компактных (литых и деформированных) и некомпактных (спеченных и порошковых) заготовок заключается в особенностях строения их порового пространства и твердой фазы.

Пористость спеченных заготовок, включающая макропоры, образуемые между частицами в процессе компактирования и микропоры, присутствующие в частицах порошка, значительно превышает единичные дефекты, присутствующие в литых заготовках. Методом гидростатического взвешивания установлено, что пористость спеченных заготовок, в зависимости от режимов компактирования и спекания, находится в диапазоне 7...15 %, в то время как пористость литых заготовок не превышает 1 % [19]. В литых заготовках пористость формируют микроскопические дефекты размер и плотность распространения которых несоизмеримо малы в сравнении с заготовками, синтезированными из отсевных порошков.

На начальных стадиях всестороннего сжатия при изостатическом прессовании макро- и микропоры в поверхностном слое спеченных заготовок захлопываются образуя плотный, практически беспористый слой (рис. 5, а). Создавая вокруг внутренней части заготовки своеобразный «кон» упрочненный слой препятствует передаче усилия от рабочего тела газостата внутренним слоям, тем самым — их пластической деформации и

уплотнению. Вследствие этого, для спеченных заготовок уплотнение наблюдается преимущественно для тонкого поверхностного слоя, в то время как в центральной зоне плотность остается практически неизменной.

При всестороннем сжатии в процессе ГИП компактных заготовок, например литых лопаток турбины, поверхностного уплотненного слоя не образуется, что способствует передаче усилия от рабочей среды газостата внутренним слоям заготовки и, как следствие, их уплотнению (рис. 5, б).

Отличительной особенностью ГИП заготовок синтезированных из металлических гранул и спеченных порошковых заготовок, является способность к микроперемещениям и взаимной аккомодации частиц в процессе всестороннего сжатия. Под воздействием усилий рабочей среды газостата, на начальной стадии деформирования, сферические, разноразмерные, неспеченные гранулы эффективно перемещаются и, таким образом уплотняются (рис. 5, в). Тонкая оболочка металлической капсулы гранульной заготовки не препятствует уплотнению. В процессе ГИП ее поведение аналогично эластической оболочке. В тоже время гранулы, представляют собой микро-литки, кристаллизовавшиеся при высоких скоростях охлаждения [18]. В результате изостатического прессования происходит не только процессы аккомодации частиц, но и их частичное разрушение, что также способствует процессу уплотнения.

При уплотнении порошковых заготовок, отличительной особенностью которых, как и для гранульных, является возможность относительного перемещения частиц, важную роль оказывает форма частиц порошка. Для получения исследованных заготовок применяли наиболее дешевые, отсевные порошки. Морфология частиц порошков, получаемых из отсевов при дроблении блока титана губчатого характеризуется «рваной» формой, развитой удельной поверхностью и микропористостью (рис. б).

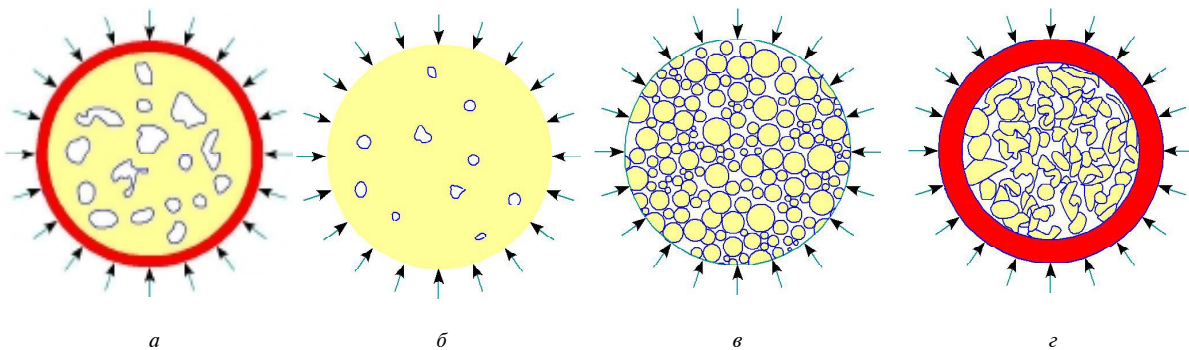


Рис. 5. Схема уплотнения в процессе ГИП спеченной (а), литой (б), гранульной (в) и порошковой (г) заготовок

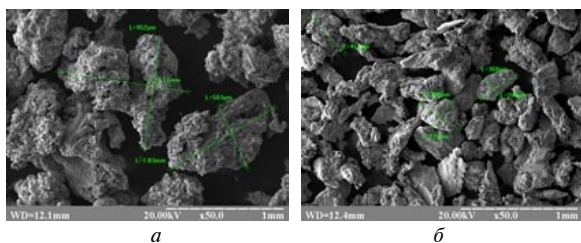


Рис. 6. Морфология частиц порошка титана ПТ5

Аналогично заготовкам, синтезированным из металлических гранул, на начальной стадии ГИП частицы в поверхностном слое порошковых заготовок начинают микроперемещения. Однако, особенности их формы не способствуют взаимной аккомодации, образуются деформационные арки, которые соединяясь между собой образуют уплотненный слой. Учитывая развитую микропористость частиц порошка, аналогично ГИП спеченных заготовок, поверхностный слой дополнительно уплотняется путем захлопывания микропор. В результате, образовавшийся поверхностный «коконт» из уплотненного слоя затрудняет передачу усилия газостата внутренним слоям, в следствии чего пористость в центральной зоне превышает пористость поверхностного слоя. Учитывая, что на начальной стадии ГИП частицы порошка в поверхностном слое имели возможность взаимных перемещений, толщина уплотненного слоя в порошковых заготовках существенно больше аналогичного слоя для спеченных заготовок (рис. 5, з).

При уплотнении некомпактных заготовок винтовой экструзией их циклично подвергали

пластической деформации при интенсивном воздействии касательных напряжений в условиях гидростатического сжатия. Интенсификацию касательных напряжений, способствующих захлопыванию пор во всем поперечном сечении заготовки, реализовывали путем цикличного поворота сечения заготовки относительно продольной оси при прохождении винтового канала матрицы. В результате наблюдалось интенсивное уплотнение спеченных заготовок как в периферийной, так и в центральной зонах (рис. 7).

Исследования эволюции порового пространства в спеченных заготовках под воздействием интенсивной пластической деформации винтовой экструзией показало, что данный метод является эффективным для уплотнения объемных некомпактных заготовок. Особенность ИПД, связанная с деформацией без формоизменения, предопределяет возможность реализации последовательно ряда циклов деформации и, тем самым, уплотнение заготовок до величины, приближающейся к аналогичному значению для заготовок в литом и деформированном состояниях [19].

Результаты определения механических свойств спеченных заготовок в исходном состоянии и после исследованных технологических методов уплотнения, позволили оценить эффективность их применения. Механические свойства оценивали по результатам испытаний на растяжение при комнатной температуре и ударной вязкости партии стандартных образцов, изготовленных из призматических заготовок в исходном (после спекания) состоянии, подвергнутых ГИП и интенсивной деформации методом ВЭ (табл. 1).

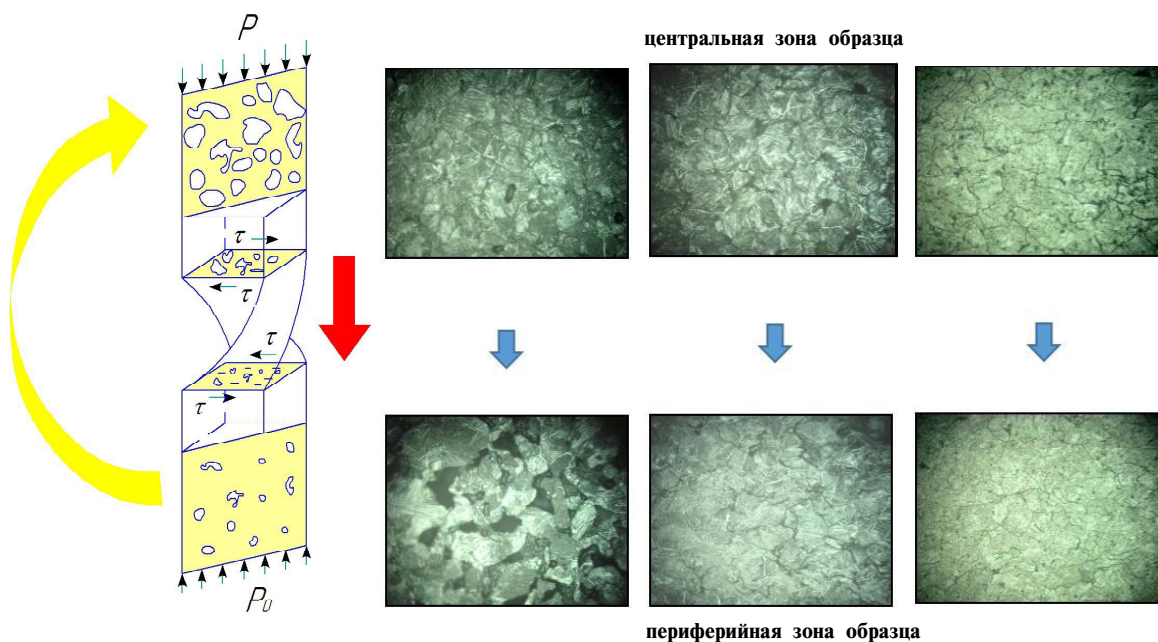


Рис. 7. Схема уплотнения спеченных заготовок винтовой экструзией (а) и макроструктура спеченных образцов в различных зонах после одного (б), двух (в) и трех (з) циклов деформации. P – давление прессования; P_0 – противодавление; τ – касательные напряжения

Таблица 1 – Механические свойства спеченных образцов в различных состояниях

Состояние образца	Предел прочности, σ_b , МПа	Условный предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение, δ , %	Относительное сужение, ψ , %	Ударная вязкость, КСТ, кДж/м ²
спеченное	325	285	6	3	1078
спеченное +ГИП	375	289	9,4	7,4	1130
спеченное + ВЭ	690	635	15	19	882

Учитывая, что пористость для некомпактных тел в значительной степени определяет уровень их прочности, можно утверждать, что установленные значения механических характеристик хорошо коррелируют с результатами исследования особенностей уплотнения при ГИП и ВЭ. Наблюдаемые незначительные изменения характеристик прочности и пластичности после ГИП, учитывая, что рабочая зона цилиндрического образца для испытаний на растяжение соответствовала центральной зоне призматической заготовки, подверженной изостатическому прессованию, являются следствием недостаточной степени уплотнения центральной зоны заготовки. Тонкий, упрочненный поверхностный слой не оказывает существенного влияния на ударную вязкость образцов т. к. в процессе динамического разрушения его доля мала в сравнении с площадью поперечного сечения образца.

Значительное повышение прочности и пластичности спеченных образцов после ИПД методом ВЭ связано с эффективным объемным уплотнением заготовки. Немаловажным аспектом повышения прочности является также хорошо изученный на компактных материалах эффект упрочнения при фрагментации структуры материала, характерной для ВЭ [17, 19, 20]. С эффектом фрагментации, вероятно, связано и наблюдаемое снижение ударной вязкости.

Выводы

На основании полученных результатов исследования микроструктуры и механических свойств заготовок, после различных технологических методов упрочнения, можно сделать следующие выводы.

В процессе ГИП уплотняется тонкий поверхностный слой спеченных из металлических порошков заготовок. Центральная зона заготовок остается плохо проработанной. В ней отмечается уменьшение среднего размера пор, однако, их полное залечивание не происходит. Уровень механических свойств образцов из спеченных заготовок, подверженных ГИП, повышается незначительно.

Интенсивная пластическая деформация винтовой экструзией объемных заготовок, синтезированных из металлических порошков, способствует эффективному уплотнению по всему поперечному сечению и существенному повышению уровня механических свойств.

Таким образом, ГИП является эффективным методом при обработке тонкостенных деталей, полученных методами порошковой металлургии, геометрия которых окончательно сформирована в процессе предшествующих технологических операций прессования и спекания, а также литых заготовок и покрытий. Использование ГИП для уплотнения заготовок, полученных из металлических порошков, которые будут использоваться для изготовления деталей путем последующей механической обработки, является не целесообразным. Наиболее рациональным технологическим методом уплотнения спеченных титановых заготовок является интенсивная пластическая деформация винтовой экструзией.

Список литературы

1. Манохин А. И. Развитие порошковой металлургии / А. И. Манохин, М. Х. Шорников. — М. : Наука, 1988. — 77 с.
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. — Vol. 421. — P. 80–86.
4. Ходанов С. П. 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. G. Appa RaoSarma 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. — С. 114–125.
7. Структурно-фазовые превращения и меха-

- нические свойства титановых сплавов, полученных методом порошковой металлургии, после горячего изостатического прессования / [А. И. Дехтяр, И. В. Моисеева, В. В. Невдача, Д. Г. Саввакин] // Физика и техника высоких давлений, 2012. — Т. 22, Vol. 4. — С. 90–102.
8. Rainer Gerling 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. Dutton, S. L. Semiatin // 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. R. Lapovok Low-temperature compaction of Ti-6Al-4V powder using channel angular extrusion with back pressure / R. Lapovok, D. Tomus, V.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 : зб. 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. Винтовая экструзия — процесс накопления деформации / [Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов и др.]. — Донецк : Фирма ТЕАН, 2003. — 87 с.
 18. Моисеев В. Н. Металлургия гранул высокопрочного титанового сплава / [В. Н. Моисеев, Н. В. Сысоева, Т. В. Ишунькина]. — ВИАМ, 1995. — 8 с.
 19. 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. — №. 1. — С. 15–24.
 20. Deformation behavior and plastic instabilities of ultrafine-grained titanium / [D. Jia, Y. M. Wang, K. T. Ramesh etc.] // Applied physics letters, 2001. — Vol. 79. №5. — P. 611–613.

Поступила в редакцию 02.02.2015

Павленко Д.В. Технологічні методи ущільнення спечених титанових заготовок

Досліджено особливості ущільнення заготовок зі спечених титанових сплавів при високоенергетичному впливі методами гарячого ізостатичного пресування і інтенсивного пластичного деформування гвинтовою екструзією. Встановлено, що ізостатичне пресування, для заготовок із досліджених порошків титану та умов компактування, приводить до ущільнення поверхневого шару. Гвинтова екструзія забезпечує отримання компактної структури за всім об'ємом заготовок.

Ключові слова: порошки титану, спечені заготовки, гаряче ізостатичне пресування, інтенсивна пластична деформація, гвинтова екструзія, пористість, структура, властивості.

Pavlenko D. Technological methods of sealing sintered titanium billets

The features of sealing blanks of sintered titanium alloys with high-impact-energy by hot isostatic pressing and intensive plastic deformation twist extrusion are investigated. It has been established that the isostatic pressing, blanks for the investigated conditions and titanium powders compaction leads to compaction of the surface layer. The twist extrusion provides a compact structure throughout the volume of the blanks.

Key words: titanium powder, sintered blades, hot isostatic pressing, severe plastic deformation, twist extrusion, porosity, structure, properties.