

УДК 669.245.5.018:621.762

Павленко Д.В.

Запорожский национальный технический университет. Украина, г. Запорожье

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТИТАНОВЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ

Приведены результаты прессования, спекания, интенсивной пластической деформации и горячего изостатического прессования образцов из порошков низколегированного титанового сплава. Установлены основные закономерности порообразования. Показано, что интенсивная пластическая деформация винтовой экструзией является эффективным способом получения компактных деформированных полуфабрикатов для деталей авиационной техники.

Ключевые слова: титановый сплав; порошки титана; интенсивная пластическая деформация; пористость; порошковая заготовка; горячее изостатическое прессование; уплотнение.



Введение

Созданию новых ресурсосберегающих и экологически чистых – “зеленых” технологий в последнее время в мире уделяется большое внимание. Одной из таких технологий является получение компактных полуфабрикатов на основе методов порошковой металлургии.

Необходимость снижения стоимости получения изделий из титановых сплавов обусловлена его широким применением в авиации и авиадвигателестроении в частности. Анализ динамики потребления титановых сплавов показывает, что в авиационном двигателестроении потребление титана за последние несколько десятилетий выросло с 20% до 30% и такая тенденция сохраняется.

Существующая на сегодняшний день технология получения полуфабрикатов деформируемых жаропрочных титановых сплавов содержит большое количество ресурсозатратных операций, таких как многостадийный вакуумный переплав титановой губки, горячую деформационную обработку, механическую и термическую обработку сляба, значительно повышающих стоимость конечного продукта. Сложившаяся схема производства и потребления титановых сплавов в Украине отличается тем, что сырьевая база, первичный передел, а также конечный потребитель авиационная промышленность, находятся в Украине, а получение полуфабрикатов реализуется на территории Российской Федерации.

Существенное снижение себестоимости изделий авиационной техники из титановых сплавов возможно путем применения заготовок деталей, полученных методами порошковой металлургии. Технологии получения заготовок деталей машин из металлических порошков уже достаточно долгое время находят широкое применение в технике. Преимущества и недостатки порошковой металлургии, в сравнении с традиционными способами получения сплавов, хорошо известны и описаны в литературе [1; 2; 3]. Так, известно, что низкие прочностные характеристики порошковых заготовок в первую очередь связывают с остаточной пористостью и плохой связью между частицами порошка. Для сложнолегированных сплавов актуальной задачей является и обеспечение однородности распределения легирующих элементов во всем объеме заготовок. Решение этих двух основных задач порошковой металлургии позволит существенно сократить стоимость получения титановых сплавов, расширить область их применения и, что немаловажно, позволит получать их в условиях непосредственного потребителя, т.е. на предприятиях авиационной отрасли Украины.

Наиболее распространенным методом снижения остаточной пористости является уплотнение порошковых заготовок под высоким давлением. В настоя-

щее время для устранения пор используются горячая штамповка в закрытых и открытых штампах [4], а также горячее изостатическое прессование (ГИП). Тем не менее, существующие технологии не позволяют снижать пористость менее 1...2%. Получившие в последнее время широкое распространение методы интенсивной пластической деформации (ИПД) в основном используются для формирования субмикрорекристаллической структуры и повышения комплекса физических, механических и специальных свойств сплавов с литой и деформированной структурой [5; 6; 7; 8 и др.]. В тоже время, процессы, протекающие при ИПД, являются весьма перспективными для уплотнения порошковых и пористых заготовок. Попытки применения ИПД для заготовок, полученных путем прессования металлических порошков, предпринимаются широким кругом исследователей. Так, в работе [9] показана возможность получения неспеченных гетерогенных композиционных материалов методом винтовой экструзии (ВЭ). Авторами показано, что теплая ИПД порошковых заготовок методом ВЭ без оболочки является эффективным процессом изготовления заготовок с плотностью 94...99%. На возможность получения деформированных сплавов из металлических порошков указывают авторы работ [10; 11; 12; 13;], в которых отмечается необходимость оптимизации режимных параметров процесса ИПД и исходной структуры с целью сохранения целостности заготовки. Однако, большинство из них посвящены исследованию уплотнения порошковых тел, полученных путем прессования порошков черных и цветных металлов, в то время как исследований в области деформации порошковых титановых сплавов недостаточно для их практической реализации в серийном производстве.

Целью настоящей работы являлась реализация процесса ИПД порошковых заготовок из низколегированного титанового сплава. Для достижения поставленной цели необходимо было решить круг задач, связанных с получением исходной заготовки, а также разработки технологии ИПД методом ВЭ, при которой обеспечивается устранение остаточной пористости, дробление структурных, а также гомогенизация легирующих элементов.

Объектом настоящего исследования являлись процессы уплотнения, структурообразования и формирования комплекса механических, физических и специальных свойств в порошковых титановых сплавах.

Методики исследований

Заготовки для ИПД получали прессованием и последующим спеканием порошков титана ПТ5-1. Легирование алюминием и молибденом выполняли вводом в состав шихты порошков легирующих элементов.

Прессование выполняли на гидравлическом прессе при давлениях 70 МПа и 700 МПа. Спекание выполняли в вакуумной печи, при скорости нагрева 20°С/мин до температур в интервале 1220...1400°С с дискретностью 60°С. Охлаждение выполняли совместно с печью.

Исследование влияния температуры спекания на количество, размер и закономерности распределения пор выполняли на неподвижном шлифе при помощи программного обеспечения Image-Pro Plus. Определяли процентное содержание пор по 10 шлифам на одном образце.

Структурный анализ образцов выполняли с использованием оптического микроскопа НЕОРНОТ и растрового электронного микроскопа фирмы JEOL во вторичных электронах.

Реализацию процесса ИПД выполняли методом ВЭ в Донецком физико-техническом институте им. А.А. Галкина НАН Украины на призматических образцах, вырезанных из центра порошковой заготовки.

свойства оценивали по результатам испытаний на растяжение и ударную вязкость партии стандартных образцов, изготовленных из призматических заготовок в исходном (после спекания) состоянии и подвергнутых ГИП.

Результаты и их обсуждения

Согласно разработанной технологической схемы, снижение стоимости получаемых полуфабрикатов сложнолегированных титановых сплавов достигается за счет применения комплексной технологии, включающей операции компактирования и консолидации порошков методами порошковой металлургии, устранения остаточной пористости и дефектов методами интенсивной пластической деформации, и обеспечения повышенного уровня комплекса свойств за счет формирования субмикроструктурной структуры (рис. 1)

Этап интенсивной пластической деформации порошковых заготовок является основным в предла-

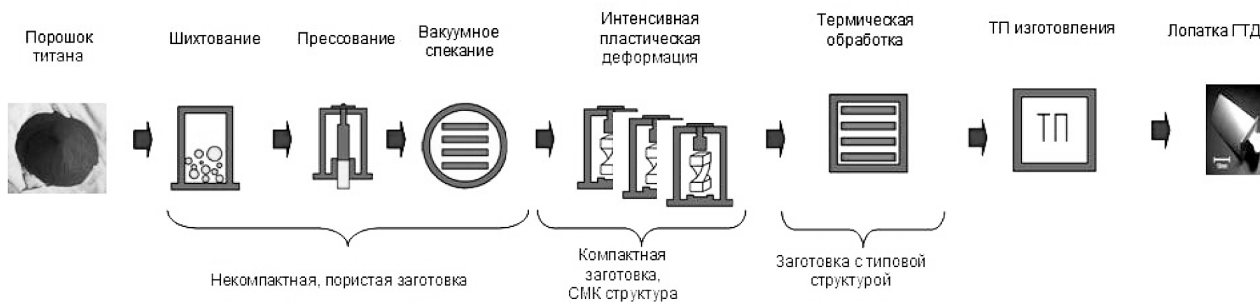


Рис. 1. Схема перспективной ресурсосберегающей технологии получения титановых полуфабрикатов для деталей авиационной техники

Винтовую экструзию образцов выполняли на установке с винтовой матрицей прямоугольного сечения 25×40 мм и углом закрутки 45 по технологии, описанной в работе [5]. С целью увеличения технологической пластичности материала к переднему концу заготовки прикладывали противодействие величиной 200 МПа. При этом давление прессования составляло 1600 МПа. В качестве смазки использовали смесь на основе легкоплавкого стекла. Заготовки предварительно нагревали в печи сопротивления до температуры 400°С; оснастка в процессе деформации имела такую же температуру.

Для оценки эффективности применения ГИП для порошковых заготовок из титанового сплава проведено горячее изостатическое прессование призматических образцов в газостате фирмы AVURE. Газостатирование объемных порошковых заготовок выполняли при температуре 960±10°С при давлении 140 МПа. Температуру и давление в рабочей камере газостата повышали ступенчато. Структуру образцов исследовали на микроскопе, оснащенный цифровой камерой. Механические

свойства оценивали по результатам испытаний на растяжение и ударную вязкость партии стандартных образцов, изготовленных из призматических заготовок в исходном (после спекания) состоянии и подвергнутых ГИП.

гаемой технологии с точки зрения получения бездефектных полуфабрикатов, свойства которых могут удовлетворять условиям работы деталей ГТД. Применение ИПД преследует три основных цели: устранение (залечивание) пор, гомогенизацию легирующих элементов и дробления рекристаллизовавшихся при спекании зерен.

Задача гомогенизации легирующих элементов неразрывно связана с технологией получения компактных полуфабрикатов сложнолегированных сплавов. Так, повышение температуры и увеличение времени спекания ускоряет диффузию легирующих элементов в отдельные частицы порошка. Однако, это приводит к существенному росту зерна и снижению прочностных характеристик.

Практическая реализация описанной технологии требует решения широкого спектра технологических задач, связанных, в первую очередь, с оптимизацией режимных параметров на всех стадиях процесса. Их решение усложняется значительным числом факторов на каждом из этапов технологического процесса.



Так, на этапе подготовки порошковой смеси к прессованию и получению прессовок, факторами оптимизации являются способ введения легирующих элементов, размер и морфология частичек порошка, способ его получения и прессования. На этапе ИПД управляющими факторами процесса является температура заготовки, величина и скорость деформации. Для оптимизации режимных параметров процесса на всех этапах используются методы математического моделирования.

Анализ морфологии пор после спекания показывает, что в образце присутствуют поры преимущественно неправильной формы. Наблюдаемая особенность морфологии пор обусловлена технологией получения исходного материала порошковой заготовки механическим разломом.

На средний размер пор и их морфологию оказывает влияние и давление прессования. Так, увеличение давления прессования с 70 МПа до 700 МПа привело к значительному снижению среднего размера пор. Известно, что увеличение температуры спекания приводит к росту среднего размера зерна и снижению пористости заготовок [15]. Установлено, что повышение температуры спекания в диапазоне 1220...1310°C приводит к снижению пористости с 15 до 5%. При этом рассеяние пористости снижается от 80 до 40%. Дальнейшее повышение температуры спекания приводит к незначительному росту пористости заготовок. Так, величина пористости при температуре спекания 1340°C составила 8% при рассеянии 12%. Таким образом установлено, что минимальная пористость заготовок может быть достигнута при температуре вакуумного спекания в диапазоне 1300...1320°C.

Анализ установленных зависимостей изменения количества и размеров пор от температуры спекания показывает, что с ростом температуры спекания от 1220°C до 1310°C наблюдается уменьшение площади занимаемой порами и происходит перераспределение пор по размеру и форме. Дальнейшее увеличение температуры спекания до 1340°C не приводит к уменьшению площади, занимаемой порами, то есть процесс залечивания пор существенно замедляется и происходит только их усреднение по размеру [15].

Установленную зависимость количества и размера пор от температуры спекания можно объяснить механизмами коалесценции и коагуляции. Наличие межкристаллических границ в спекаемом образце существенно влияет на процесс коагуляции пор, так как диффузия атомов по границам происходит быстрее диффузионных процесс внутри частиц порошка. Таким образом, чем больше количество границ срачивания частиц порошка (т.е. чем меньший размер частиц), тем быстрее происходит процесс коагуляции пор [15].

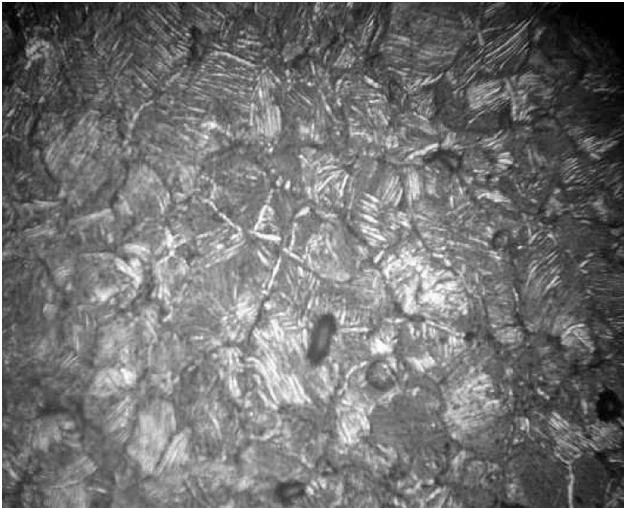
Установленные закономерности порообразования при прессовании и вакуумном спекании яв-

ляются важным фактором для последующей оптимизации технологии интенсивной пластической деформации порошковых заготовок.

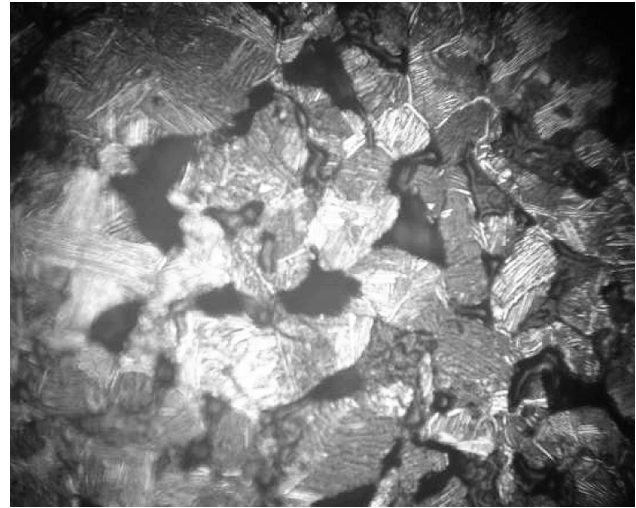
Очевидно, что основными факторами, оказывающими влияние на разрушение заготовки в процессе ИПД, а также залечивание пор и дробление структурных составляющих, является температура деформации, особенности напряженно-деформированного состояния заготовки и параметры структуры. Их оптимизация является залогом успешной реализации технологии получения относительно недорогих заготовок для изготовления нагруженных деталей из плотных (деформированных) титановых сплавов. Так, в процессе интенсивной пластической деформации винтовой экструзией ряда порошковых заготовок из сплава титана, имелись случаи их разрушения уже при первых циклах деформирования. Оптимизация температуры деформации позволила успешно реализовать процесс многопроходной деформации заготовки. Эволюция микроструктуры и порового пространства порошковой заготовки в процессе интенсивной пластической деформации показана на рис. 2–4.

Анализ полученных результатов показывает, что интенсивная пластическая деформация способствует изменению морфологии как твердой фазы, так и порового пространства. Под действием касательных напряжений в условиях гидростатического сжатия происходит дробление структурных составляющих и формирование мелкозернистой фрагментированной структуры твердой фазы. Наблюдается захлопывание крупных пор и образование флокенов. Дальнейшее накопление деформации в образце будет способствовать формированию субмикроструктурной структуры при полном отсутствии пористости материала.

При анализе целей проведения ИПД порошковых заготовок можно четко дифференцировать две из них: устранение пористости и формирование субмикроструктурной (СМК) структуры. Очевидно, что их достижение требует противоречивых режимных параметров процесса. Так, устранение пористости может быть реализовано при условиях, благоприятствующих протеканию диффузионных и рекристаллизационных процессов на границах пор, например, путем повышения температуры деформирования. В то же время, дробление структурных составляющих в сплаве происходит в узком диапазоне температур, соответствующим “теплой” деформации. Наличие таких противоречий, а также тот факт, что идеология ИПД заключается в неизменности формы заготовки в процессе деформирования, приводит к выводу о том, что достижение указанных целей возможно при последовательном применении двух технологических операций ИПД при различных режимных параметрах процесса. На первом этапе, выполняемом с целью устранения пористости,

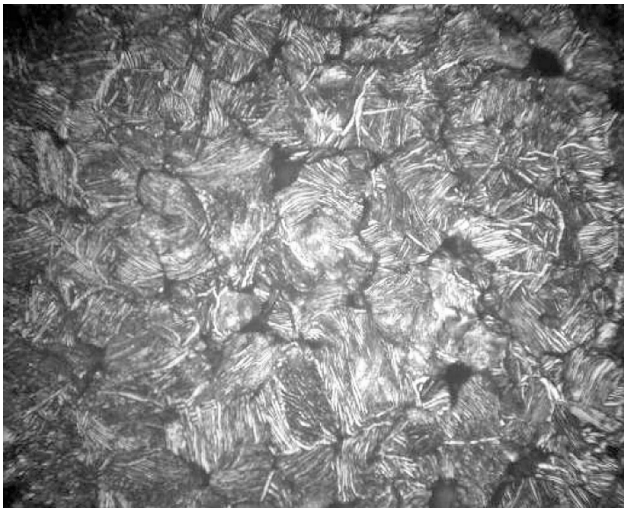


а



б

Рис. 2. Макроструктура исходных пористых образцов после спекания в центральной (а) и периферийной (б) частях ($\times 200$)



а



б

Рис. 3. Макроструктура пористых образцов, подвергнутых ИПД методом винтовой экструзии (1 цикл деформации) в центральной (а) и периферийной (б) частях ($\times 200$)



а



б

Рис. 4. Макроструктура пористых образцов, подвергнутых ИПД методом винтовой экструзии (2 цикла деформации), в центральной (а) и периферийной (б) частях ($\times 200$)

деформация должна выполняться при повышенной температуре и умеренных нагрузках на образец. На втором этапе, выполняемом с целью формирования СМК структуры и повышения комплекса свойств, реализуется “теплая” деформация в условиях действия значительных касательных напряжений.

Немаловажным фактором для успешной реализации ИПД порошковых заготовок является и исходная пористость. Изменение усилия прессования и наличие в шихте гидрированного титана позволяет управлять как размерами, так и формой пор в порошковой заготовке. На основании анализа поведения пор при ИПД и моделирования процесса их залечивания, должны быть установлены оптимальные сочетания геометрии и исходной морфологии пор в заготовке.

Конкурирующим процессом высокоэнергетического воздействия на порошковую заготовку с целью устранения пористости и повышения уровня свойств является горячее изостатическое прессование (ГИП). В настоящее время ГИП активно исследуется и применяется для литых деталей ГТД из жаропрочных никелевых и титановых сплавов, а также при консолидации гранул.

Принимая во внимание особенности процессов, проходящих в материале в процессе ГИП, можно предполагать, что данная технология является эффективной применительно и к деталям, получаемым путем спекания металлических порошков. 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 порошковых заготовках.

Результаты исследования микроструктуры позволили установить, что в поверхностном слое образцов, подвергнутых ГИП/ и центральной части, морфология порового пространства различается (рис. 5, 6). По мере удаления от поверхности к сердцевине образца пористость увеличивается. На глубине порядка 25...50 мкм пористость соответствует образцам, которые не подвергались ГИП (13...15%). Средний размер пор в поверхностном слое составлял 26 ± 9 мкм, в то время как размер пор в центральной части образца составлял 54 ± 20 мкм. В поверхностном слое наблюдались поры преимущественно сферической формы, в то время как в центре образца

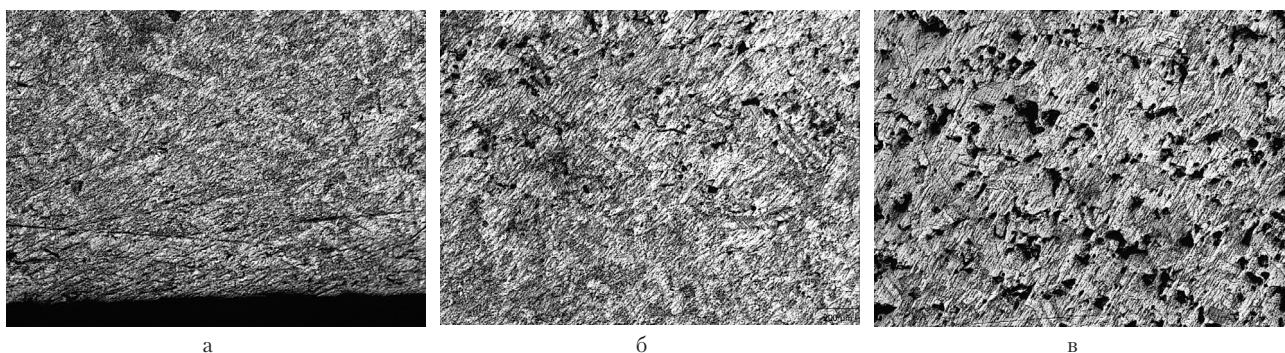


Рис. 5. Микроструктура поверхностного слоя (а), переходной зоны (б) и центральной части порошкового образца (в), подвергнутого ГИП ($\times 50$)

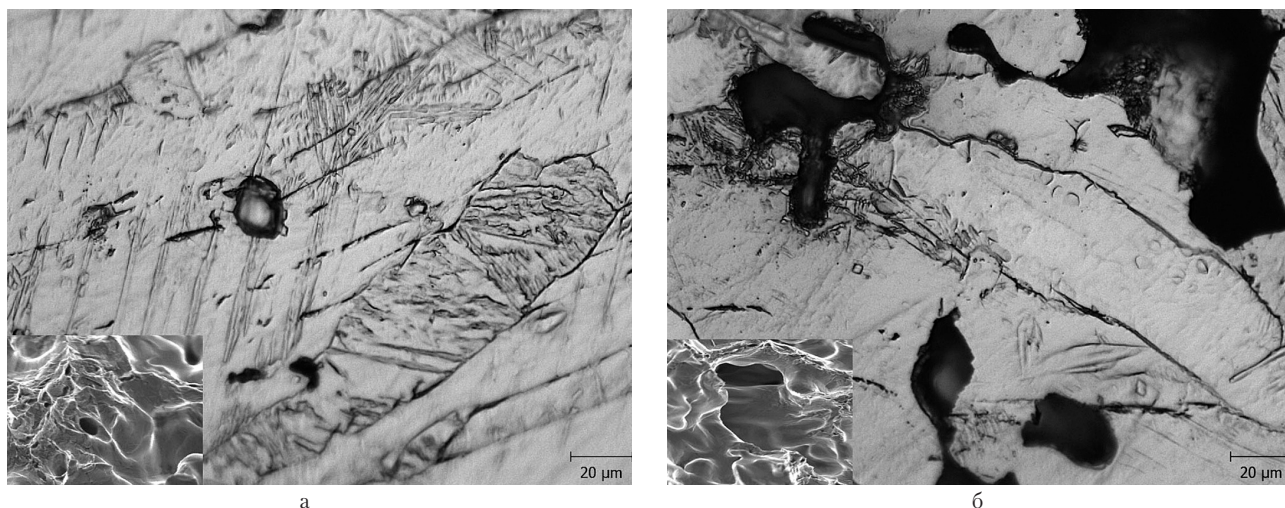


Рис. 6. Морфология пор в поверхностном слое (а) и в центральной части (б) порошкового образца, подвергнутого ГИП ($\times 500$)

морфология пор не претерпевала изменений по сравнению с исходным состоянием и представляла собой поры неправильной формы с разветвленными границами.

Можно предположить, что при горячем изостатическом прессовании порошковых заготовок мелкие частицы порошка в поверхностном слое образуют арки, которые препятствуют уплотнению внутренних слоев. В результате, уплотняется только поверхностный слой заготовки, в то время как в ее сердцевине пористость остается неизменной. Отличительной особенностью ГИП порошковых заготовок от заготовок, получаемых путем горячего изостатического прессования металлических гранул, является размер частиц порошка и гранул. Гранулы, имеющие размеры порядка 200...300 мкм, представляют собой микрослитки, кристаллизовавшиеся при высоких скоростях охлаждения [18]. В результате их уплотнения в процессе ГИП происходит не только accommodation гранул относительно друг друга, но и их разрушение, что способствует процессу уплотнения. Для мелких частиц порошка титана такие процессы затруднены, что и способствует образованию в поверхностном слое порошковой заготовки в процессе ГИП тонкого уплотненного слоя.

Исследования механических свойств позволили установить, что предел прочности образцов после ГИП составлял 375 ± 10 МПа при пределе текучести 289 ± 10 МПа. Относительное удлинение образцов составляло $9,4 \pm 0,4\%$ при относительном поперечном сужении $7,4 \pm 0,4\%$. Можно видеть, что уровень механических свойств образцов после ГИП соответствует аналогичным значениям исходных образцов, которые не подвергались изостатическому прессованию [17].

Таким образом, установлено:

1. Интенсивная пластическая деформация является эффективным методом устранения пористости в заготовках, полученных путем прессования и последующего спекания порошков титана. Получаемые по описанной технологии полуфабрикаты, после соответствующей термической обработки, имеют структуру, регламентированную для изготовления ответственных деталей ГТД – рабочих лопаток компрессора, и удовлетворяют всему комплексу требований к уровню механических, физических и специальных свойств.

2. В процессе горячего изостатического прессования уплотняется тонкий поверхностный слой порошковых заготовок. При этом уплотнения сердцевины объемных заготовок не происходит. Таким образом, ГИП является эффективным методом для тонкостенных деталей, полученных методами порошковой металлургии, геометрия которых окончательно сформирована в процессе прессования и спекания. Использование ГИП для уплотнения заготовок, полученных из металлических порошков, которые будут использоваться для изготовления деталей

путем последующей механической обработки, является нецелесообразным.

Литература

- [1] Ивасишин О. М. Синтез сплава Ti-6Al-4V с низкой остаточной пористостью методом порошковой металлургии [Текст] / О. М. Ивасишин, Д. Г. Саввакин, Ф. Фроес, В. С. Моксон, К. А. Бондарева. // Порошковая металлургия, 2002. – №7/8, С. 54–64.
- [2] Ивасишин О. М. Экономичная технология получения титановых деталей методом порошковой металлургии [Текст] / О. М. Ивасишин, А. П. Шпак, Д. Г. Саввакин. // «Титан», №1, 2006. – С. 31–39.
- [3] 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. – Т 1. – №2. – С. 44–57.
- [4] Баглюк Г. А. Повышение эффективности уплотнения пористых заготовок за счет интенсификации сдвиговых деформаций [Текст] / Г. А. Баглюк // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник за напрямом «Інженерна механіка». Випуск 24. – Луцьк, 2009. – С. 35–48.
- [5] Винтовая экструзия – процесс накопления деформации [Текст] / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлови и др. – Донецк: Фирма ТЕАН, 2003. – 87 с.
- [6] Валиев Р. З. Наноструктурные материалы, полученные методом интенсивной пластической деформации [Текст] / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
- [7] Валиев Р. З. Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации [Текст] / Р. З. Валиев // Российские нанотехнологии Т1. – №1–2, 2006. – С. 208–216.
- [8] Андриевский Р. А. Основные проблемы наноструктурного материаловедения [Текст] / Р. А. Андриевский // Нанотехнологии: наука и производство. – 2009. – №2(3) – С. 3–6.
- [9] Бейгельзимер Я. Е. Получение неспеченных гетерогенных композиционных материалов методом винтовой экструзии [Текст] / Я. Е. Бейгельзимер, М. Б. Штерн, Т. А. Епифанцева, А. С. Сынков // Физика и техника высоких давлений. – Т. 19. – 2009. – № 3 – С. 24–36.
- [10] Михайлов О. В. Пластическое деформирование порошковых конструкционных материалов с дисперсной структурой [Текст] / О. В. Михайлов, Т. М. Павлыго, Г. Г. Сердюк, Л. И. Свистун // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – Випуск 14. – Луцьк: ЛДТУ, 2004. – С. 215–221.
- [11] Рябичева Л. А. Экспериментальное исследование влияния исходной плотности на структуру и свой-



- ства порошковой меди при РКУ-прессовании [Текст] / Л. А. Рябичева, В. В. Смоляк // Збірник наукових праць: Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудіванні. – Луганськ, 2010. – С. 18–28.
- [12] Рябичева Л. А. Анализ эволюции микроструктуры порошковой пористой заготовки при РКУ-прессовании [Текст] / Л. А. Рябичева, В. В. Смоляк // Збірник наукових праць: Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудіванні, Луганськ, 2011. – С.148–154.
- [13] Бейгельзимер Я. Е. Винтовая экструзия порошковых заготовок. 1. Численный анализ методом конечного элемента [Текст] / Я. Е. Бейгельзимер, О. В. Михайлов, А. С. Сынков, М. Б. Штерн, Е. Олевский // Физика и техника высоких давлений. – 2008. – Т. 18. – № 1. – С. 69–82.
- [14] Бейгельзимер Я. Е. Винтовая экструзия порошковых заготовок. 2. Эксперимент и обсуждение результатов [Текст] / Я. Е. Бейгельзимер, О. В. Михайлов, А. С. Сынков, М. Б. Штерн // Физика и техника высоких давлений. – 2008. – Т.18. – № 3. – С. 92–97.
- [15] Быков И. О. Применение гидрированного титана с заданным содержанием кислорода для получения изделий методом порошковой металлургии [Текст] / И. О. Быков, А. В. Овчинников, С. И. Давыдов, М. В. Дрозденко, З. В. Леховицер // Теория и практика металлургии. – 2011. – №1–2. – С. 65–69.
- [16] Кипарисов С. С. Порошковая металлургия [Текст] / С. С. Кипарисов, Г. А. Либенсон. – М: Металлургия, 1971. – 528 с.
- [17] Павленко Д. В., Романов А. А., Овчинников А. В. Оценка эффективности горячего изостатического прессования порошковых заготовок. Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок: Тезисы докладов. X Международная научно-техническая конференция. – АО “Мотор Сич”, Запорожье, 2013 г. – С. 52–54.
- [18] Металлургия гранул высокопрочного титанового сплава. В. Н. Моисеев, Н. В. Сысоева, Т. В. Ишунькина. – ВИАМ, 1995. – 8 с.

Pavlenko D.V.

Zaporozhye National Technical University. Ukraine, Zaporozhye

MATERIAL ASPECTS OF RESOURCE TECHNOLOGIES FOR PRODUCING TITANIUM SEMI

Results of pressing, sintering, intensive plastic deformation and hot isostatic pressing of the samples made of low-alloyed titanium alloy powders are presented. The main regularities of pore formation are established. It is shown that severe plastic deformation by screw extrusion method is an effective way of getting a compact deformed semi-finished products for aircraft and aircraft engine parts.

Keywords: titanium alloys; titanium powder; severe plastic deformation; porosity; powder blank; hot isostatic pressing; consolidation.

References

- [1] Ivasishin O.M. Sintez splava Ti-6Al-4V s nizkoj ostatochnoj poristostju metodom poroshkovoj metallurgii [Text] / O.M. Ivasishin, D.G. Savvakina, F. Froes, V.S. Mokson, K.A. Bondareva. // Poroshkovaja metallurgija, 2002, – №7/8, – P. 54–64. (Russian)
- [2] Ivasishin O.M. Ekonomichnaja tehnologija poluchenija titanovyh detalej metodom poroshkovoj metallurgii [Text] / O.M. Ivasishin, A.P. Shpak, D.G. Savvakina. // «Titan», №1, 2006, – P. 31–39. (Russian)
- [3] Ivasishin O. M. Proizvodstvo titanovyh splavov i detalej jekonomichnym metodom poroshkovoj metallurgii dlja shirokomasshtabnogo promyshlennogo primenenija [Text] / O. M. Ivasishin, D. G. Savvakina, K. A. Bondareva, V. S. Mokson, V. A. Duz // Nauka ta innovacii. 2005. – T 1. – №2. – P. 44–57. (Russian)
- [4] Bagljuk G.A. Povyshenie jeffektivnosti uplotnenija poristyh zagotovok za schet intensifikacii sdvigovyh deformacij [Text] / G.A. Bagljuk // Naukovi notatki: Mizhvuziv's'kij zbirnik za naprjamom "Inzhenerna mehanika". – Vipusk 24. – Luck, 2009. – P. 35–48. (Russian)
- [5] Vintovaja jekstruzija – process nakoplenija deformacii [Text] / Ja.E. Bejgelzimer, V.N. Varjuhin, D.V. Orlovi i dr. – Doneck: Firma TEAN, 2003. – 87 p. (Russian)
- [6] Valiev R.Z. Nanostrukturnye materialy, poluchennye metodom intensivnoj plasticheskoj deformacii [Text] / R.Z. Valiev, I.V. Aleksandrov. – M.: Logos, 2000. – 272 p. (Russian)
- [7] Valiev R.Z. Sozdanie nanostrukturnyh metallov i splavov s unikalnymi svojstvami, ispolzujaja intensivnye plasticheskie deformacii [Text] / R.Z. Valiev // Rossijskie nanotehnologii. – T. 1. – №1–2, 2006. – P. 208–216. (Russian)

- [8] Andrievskij R.A. Osnovnye problemy nanostrukturnogo materialovedenija [Text] / R.A. Andrievskij // Nanotehnologii: nauka i proizvodstvo. – 2009. – № 2(3) – P. 3–6. (Russian)
- [9] Bejgelzimer Ja.E. Poluchenie nespechennyh geterogennyh kompozicionnyh materialov metodom vintovoj jekstruzii [Text] / Ja.E. Bejgelzimer, M.B. Shtern, T.A. Epifanceva, A.S. Synkov // Fizika i tehnika vysokih davlenij. – T. 19. – 2009. – № 3 – P. 24–36. (Russian)
- [10] Mihajlov O.V. Plasticheskoe deformirovanie poroshkovykh konstrukcionnyh materialov s dispersnoj strukturoj [Text] / O.V. Mihajlov, T.M. Pavlygo, G.G. Serdjuk, L.I. Svistun // Naukovi notatki. Mizhvuzivskij zbirnik. Vipusk 14. – Luck: LDTU, 2004. – P. 215–221. (Russian)
- [11] Rjabicheva L.A. Eksperimentalnoe issledovanie vlijanija ishodnoj plotnosti na strukturu i svojstva poroshkovoju medi pri RKU-pressovanii [Text] / L.A. Rjabicheva, V.V. Smoljak // Zbirnik naukovih prac: Resursozberigajuchi tehnologii virobництва ta obrobki tiskom materialiv u mashinobuduvanni. – Lugansk, 2010 – P. 18–28. (Russian)
- [12] Rjabicheva L.A. Analiz Evoljucii mikrostruktury poroshkovoju poristoj zagotovki pri RKU-pressovanii [Text] / L.A. Rjabicheva, V.V. Smoljak // Zbirnik naukovih prac: Resursozberigajuchi tehnologii virobництва ta obrobki tiskom materialiv u mashinobuduvanni, Lugansk, 2011. – P.148–154. (Russian)
- [13] Bejgelzimer Ja.E. Vintovaja jekstruzija poroshkovykh zagotovok. 1. Chislennyj analiz metodom konechnogo jelementa [Text] / Ja.E. Bejgelzimer, O.V. Mihajlov, A.S. Synkov, M.B. Shtern, E. Olevskij // Fizika i tehnika vysokih davlenij. – 2008. – T. 18. – № 1. – P. 69–82. (Russian)
- [14] Bejgelzimer Ja.E. Vintovaja jekstruzija poroshkovykh zagotovok. 2. Jeksperiment i obsuzhdenie rezultatov [Text] / Ja.E. Bejgelzimer, O.V. Mihajlov, A.S. Synkov, M.B. Shtern // Fizika i tehnika vysokih davlenij. – 2008. – T. 18. – № 3. – P. 92–97. (Russian)
- [15] Bykov I.O. Primenenie gidrirovannogo titana s zadannym sodержaniem kisloroda dli poluchenija izdelij metodom poroshkovoju metallurgii [Text] / I.O. Bykov, A.V. Ovchinnikov, S.I. Davydov, M.V. Drozdenko, Z.V. Lehovicer // Teorija i praktika metallurgii. – 2011. – №1–2. – P. 65–69. (Russian)
- [16] Kiparisov S.S. Poroshkovaja metallurgija [Text] / S.S. Kiparisov, G.A. Libenson. – M: Metallurgija, 1971. – 528 p. (Russian)
- [17] Pavlenko D.V., Romanov A.A., Ovchinnikov A.V. Ocenka jeffektivnosti gorjachego izostaticeskogo pressovanija poroshkovykh zagotovok. Progressivnye tehnologii zhiznennogo cikla aviacionnyh dvigatelej i Energeticheskikh ustanovok: Tezisy dokladov. X Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija. – "Motor Sich". – Zaporozhye, 2013. – P. 52–54. (Russian)
- [18] Metallurgija granul vysokoprochnogo titanovogo splava. V.N. Moiseev, N.V. Sysoeva, T.V. Ishunkina VIAM, 1995. – 8 p. (Russian)