

УДК 669.295: 621.77.016.3

**Канд. техн. наук Д. В. Павленко, д-р техн. наук А. В. Овчинников***Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье*

## УПЛОТНЕНИЕ СПЕЧЕННЫХ ТИТАНОВЫХ ЗАГОТОВОК ГИДРОЭКСТРУЗИЕЙ

*Рассмотрена возможность деформации гидроэкструзией для уплотнения некомпактных заготовок синтезированных из смеси порошковых компонентов на основе порошка титана. Установлено, что в диапазоне коэффициентов вытяжки, обеспечивающих сохранение целостности заготовок, деформация гидроэкструзией не приводит к полному устранению пористости.*

**Ключевые слова:** гидроэкструзия, титановый сплав, заготовка, поры, уплотнение, структура.

### Введение

Применение методов порошковой металлургии для изготовления деталей машин является одним из эффективных путей снижения их стоимости [1]. Привлекательность порошковой металлургии заключается в отсутствии необходимости включения в технологический процесс ресурсозатратного этапа металлургического передела, а также в сокращении механических операций обработки заготовки. Особую роль порошковая металлургия приобретает применительно к деталям из титана и его сплавов. Это связано с весьма энергозатратным процессом получения из титановой губки слитков титана и их последующей термомеханической обработки [2]. Так, например, технологический процесс производства поковок лопаток газотурбинных двигателей из титановых сплавов содержит операции трехкратного вакуумного переплава прессованного электрода и более пятидесяти операций обработки давлением [3].

Альтернативными технологиями получения деформированных полуфабрикатов, например для изготовления лопаток компрессора газотурбинных двигателей, являются технологии, основанные на интенсивном уплотнении некомпактных заготовок, синтезированных из смеси порошковых компонентов методами порошковой металлургии [4–7]. Их преимуществом, по сравнению с технологией получения деформированных полуфабрикатов металлургическим переделом титановой губки, является исключение из технологической цепочки операций многостадийного вакуумного переплава и существенное снижение трудоемкости деформационной обработки. Полуфабрикаты, получаемые по схеме интенсивного уплотнения некомпактных заготовок, обладают также субмикроструктурной структурой, что способствует существенному повышению комплекса их физических, механических и специальных свойств [8, 9].

Анализ условий обработки давлением некомпактных заготовок, полученных путем холодного прессования смеси порошковых компонентов и последующего вакуумного спекания показывает, что для сохранения их целостности в очаге деформации необходимо создавать высокий уровень гидростатической компоненты тензора напряжений [10]. Для залечивания пор во всем объеме заготовки необходимо использовать методы объемного деформирования [11].

Для уплотнения некомпактных заготовок применяют различные способы интенсивного пластического деформирования (ИПД) такие как равноканальное угловое прессование, винтовую экструзию (ВЭ) и другие. Альтернативным способом уплотнения, обладающим рядом технологических преимуществ в сравнении с методами ИПД является гидроэкструзия [12]. При обработке гидроэкструзией (ГЭ) достаточно пластичные материалы не только исключаются появление микронесплошностей в результате деформирования, но, более того, имеет место залечивание имеющихся в металле микротрещин, пор и т. п. [13]. Главная особенность ГЭ состоит в том, что она характеризуется особыми условиями деформирования — 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 [13]. Указанная особенность предопределяет эффективность применения ГЭ для деформации некомпактных заготовок, для сохранения целостности которых важным фактором является высокий уровень гидростатической компоненты в очаге деформации. Аналогичные условия реализуются и при интенсивной пластической деформации заготовок. Та-

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

Целью настоящей работы являлось оценка возможности применения деформации гидроэкструзией для уплотнения некомпактных заготовок, синтезированных из смеси порошковых компонентов на основе порошка титана и получения полуфабрикатов для лопаток компрессора газотурбинных двигателей. Для достижения поставленной цели были решены задачи, связанные с исследованием структуры образцов из спеченных титановых сплавов в исходном состоянии, а также подверженных деформации ГЭ с различной величиной деформации.

### Методика экспериментальных исследований

Обработке подвергали образцы, полученные путем холодного прессования смеси порошковых компонентов, состоящей из порошка титана ПТ5 (основа), порошков алюминия (2 %) и молибдена (2 %), с последующим спеканием пресовок в вакуумной печи. Образцы прессовали при давлении 700 МПа и спекали при температуре 1250 °С в течение 3 ч. Пористость определяли методом гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 18847-84 и путем анализа микрофотографий металлографических шлифов образцов по ГОСТ 9391-80. При анализе микрофотографий поверхности шлифа использовали программу анализа изображений Image Pro Plus.

Гидроэкструзии подвергали цилиндрические образцы диаметром 50 мм. Обработку выполняли по методике, описанной в работе [14]. В качестве рабочей жидкости использовали касторовое масло. Схема процесса деформации ГЭ показана на рис. 1. Коэффициент вытяжки образцов  $\mu$  составлял 1,6 и 2,5.

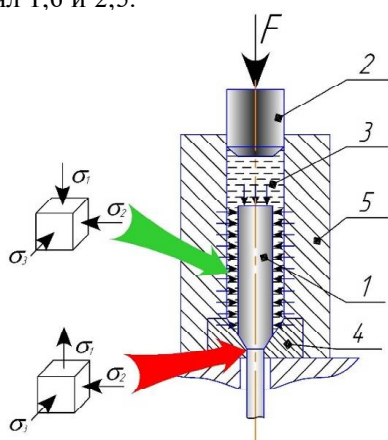


Рис. 1. Схема деформации образцов гидроэкструзией: 1 – образец; 2 – пуансон; 3 – гидравлическая жидкость; 4 – фильера; 5 – корпус

### Результаты и их обсуждение

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. 2). Пористость исходных образцов после прессования и спекания составляла 12...15 %.

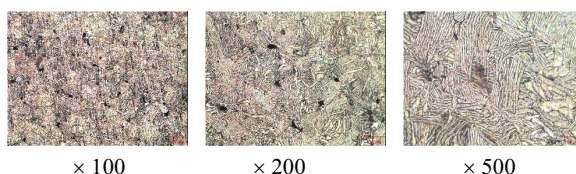


Рис. 2. Структура исходных образцов после спекания в поперечном направлении

При деформации образцов ГЭ с исследованными коэффициентами вытяжки наблюдалось их разрушение (растрескивание), по переднему и заднему торцам на длине 1025 мм (рис. 3). Попытки выполнить деформацию с большим значением коэффициента вытяжки приводили к нарушению целостности образцов и их разрушению. Причиной разрушения образцов являлась недостаточная величина гидростатической компоненты тензора напряжений в очаге деформации, вследствие чего не происходил рост технологической пластичности материала [15].



Рис. 3. Общий вид (а) и поверхность переднего торца (б, в) образцов, подвергнутых гидроэкструзии

Анализ микроструктуры образцов в продольном направлении после деформации ГЭ указывает на формирование текстуры деформации (рис. 4, 5). 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 спеченных заготовок, свойственных деформации, например, винтовой экструзией [16].

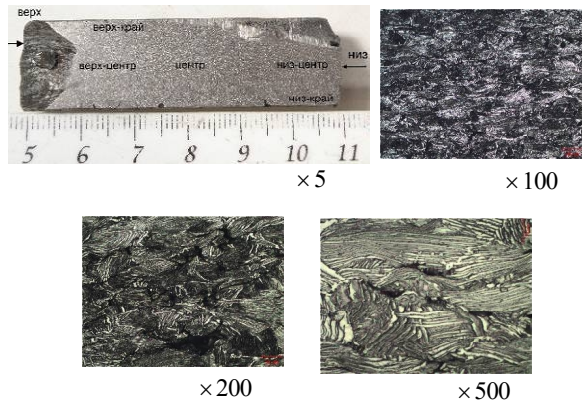


Рис. 4. Структура образцов, подвергнутых гидроэкструзии в продольном направлении (коэффициент вытяжки  $\mu = 2,5$ )

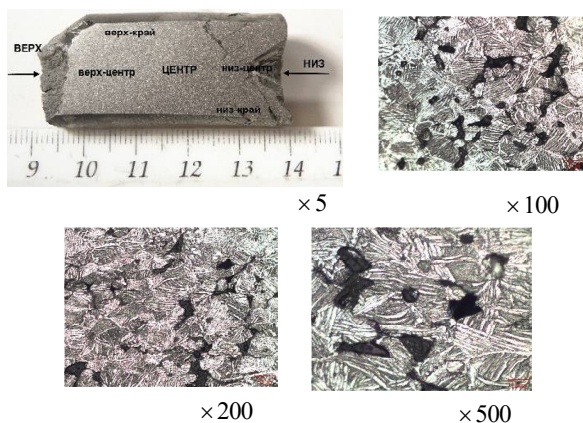


Рис. 5. Структура образцов, подвергнутых гидроэкструзии в продольном направлении (коэффициент вытяжки  $\mu = 1,6$ )

В результате исследований установлено, что ГЭ способствовала снижению пористости образцов. Так, остаточная пористость образцов составляла 6...8 % при  $\mu = 2,5$  и 11...13 % при  $\mu = 1,6$ . Наибольшее значение пористости соответствовало передней части образцов (рис. 6, 7).

Для образцов, экструдированных с большим значением коэффициента вытяжки, происходило изменение морфологии их порового пространства. Поры в поперечном направлении «вытягиваются», наблюдаются несплошности материала в виде флокенов (рис. 4), что наряду с уменьшением пористости свидетельствует о протекании в процессе деформации их захлопывания и залечивания.

Результаты исследования структуры некомпактных 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 образцов.

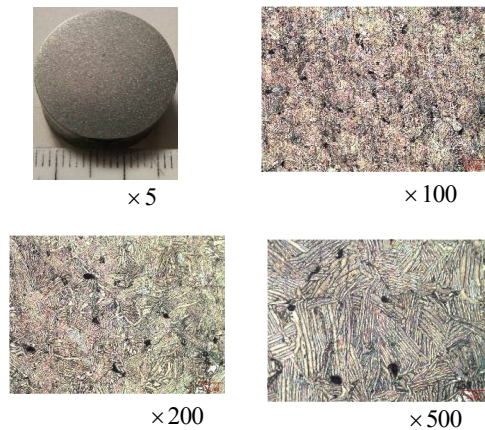


Рис. 6. Структура образцов, подвергнутых гидроэкструзии в поперечном направлении (коэффициент вытяжки  $\mu = 2,5$ )

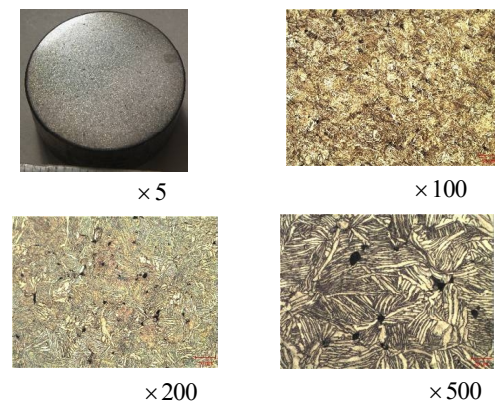


Рис. 7. Структура образцов, подвергнутых гидроэкструзии в поперечном направлении (коэффициент вытяжки  $\mu = 1,6$ )

Недостатком уплотнения ГЭ является формирование заготовки, что не дает возможности выполнить ее многократную обработку для накопления больших степеней деформации и устранения остаточной пористости. Причиной установленных закономерностей являются особенности условий деформации при ГЭ, 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 извес-

тных методах интенсивной пластической деформации, например винтовой экструзией [17].

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 субмикроструктурной структуры материала. 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 будет способствовать снижению уровня прочностных свойств и увеличению величины их рассеяния. Также процесс деформации ГЭ не обеспечивает условия дробления структурных составляющих и приводит к формированию текстуры деформации.

#### Выводы

1. Исследования деформации гидроэкструзией позволили установить снижение пористости образцов из спеченных титановых сплавов. Установлено, что остаточная пористость образцов составляла 6...8 % при коэффициенте вытяжки 2,5 и 11...13 % при коэффициенте вытяжки 1,6. Увеличение коэффициента вытяжки более 2,5 приводило к разрушению образцов, что связано с недостаточной величиной гидростатической компоненты тензора напряжений в очаге деформации.

2. Установлено, что ввиду особых условий деформации гидроэкструзия не может быть использована для получения компактных, высокоплотных полуфабрикатов из спеченных титановых заготовок, пригодных для изготовления лопаток компрессора газотурбинных двигателей.

#### Список литературы

1. Матвийчук М. В. Синтез высоколегированных титановых сплавов методом порошковой металлургии / М. В. Матвийчук, Д. Г. Саввакин // Нові матеріали та технології в металургії та машинобудуванні. – 2010. – № 1. – С. 81–84.
2. Камерный электрошлаковый переплав (КЭШП) - новый метод получения высококачественных слитков титана и титановых сплавов. Электронный ресурс. Режим доступа на 01.01.2016 [http://www.stcu.int/documents/reports/distribution/tpf/materials/ukrainian/SI\\_21\\_07\\_eng+ukr%2063.pdf](http://www.stcu.int/documents/reports/distribution/tpf/materials/ukrainian/SI_21_07_eng+ukr%2063.pdf)
3. Производство поковок штампованных лопаток из титановых сплавов. Электронный ре-

- сурс. Режим доступа на 01.01.2016 [http://www.vsmmpo.ru/ru/manufacture/Titan/sheme/Proizvodstvo\\_pokovok\\_shtampovannih](http://www.vsmmpo.ru/ru/manufacture/Titan/sheme/Proizvodstvo_pokovok_shtampovannih)
4. Получение деформированных заготовок из титановых сплавов на основе методов порошковой металлургии / [Д. В. Павленко, А. В. Овчинников, А. Е. Капустян, А. А. Скребцов] // Международная конференция Ti-2013 в СНГ (26–29 мая, 2013, Донецк) : сборник трудов. – Киев : ИМФ. – 2013. – С. 307–312.
  5. Баглюк Г. А. Повышение эффективности уплотнения пористых заготовок за счет интенсификации сдвиговых деформаций / Г. А. Баглюк // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник за напрямом «Інженерна механіка». – Вип. 24. – Луцьк, - 2009. – С. 35–48.
  6. Эволюция распределения плотности при равноканальном угловом прессовании пористых заготовок / [А. П. Майданюк, Л. А. Рябичева, М. Б. Штерн, Г. А. Баглюк] // Вісн. Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2008. – Ч. 1. – № 6 (124). – С. 212–216.
  7. Dobromyslov A.V. Synthesis of nanocrystalline and amorphous alloys from elementary powders by intensive plastic deformation under high pressure / A.V. Dobromyslov, R.V. Churbaev // International Journal of Modern Physics B. – 2010. – Vol. 24. – №. 6(7). – P. 722–729.
  8. 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.
  9. M. Greger, M. Widomskb, L. Kander Mechanical properties of ultra-fine grain titanium // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2010. – Vol. 40 Issue 1. – P. 33–40.
  10. Винтовая экструзия порошковых заготовок. 1. Численный анализ методом конечного элемента / [Я. Е. Бейгельзимер, О. В. Михайлов, А. С. Сынков и др.] // Физика и техника высоких давлений. – 2008. – т. 18. – № 1. – С. 69–82.
  11. Павленко Д. В. Технологические методы уплотнения спеченных титановых заготовок / Д. В. Павленко // Вестник двигателестроения – 2015. – № 1. – С. 87–93.
  12. Новые схемы накопления больших пластических деформаций с использованием гидроэкструзии / [Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, С. Г. Сынков и др.] // Физика и техника высоких давлений. – 1999. – Т. 9. – № 3. – С. 109–111.
  13. Хаймович П. А. От гидроэкструзии к барокриодеформированию / П. А. Хаймович //



- Физика и техника высоких давлений. – 2013. – Т. 23. – № 1. – С. 56–67.
14. Шевелев А. И. Деформационная обработка вторичного алюминия и алюмосодержащих отходов / А. И. Шевелев, Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин. – Донецк : Ноулидж, 2010. – 271 с.
  15. Павленко Д. В. Повышение технологической пластичности спеченных титановых сплавов / Д. В. Павленко // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2015. – Вип. 15. – С. 1–14.
  16. Павленко Д. В. Вихри в некомпактных заготовках при деформации винтовой экструзией / Д. В. Павленко Я. Е. Бейгельзимер // Порошковая металлургия. – 2015. – № 9/10. – С. 12–22.
  17. Анализ винтовой экструзии порошковых заготовок методами модифицированных теорий пластичности пористых тел / А. В. Кузьмов, М. Б. Штерн, Е. Г. Киркова и др.] // Порошковая металлургия. – 2016.

Поступила в редакцию 11.02.2016

**Павленко Д.В., Овчинников О.В. Ущільнення спечених титанових заготовок гідроекструзією**

*Розглянуто можливість деформації гідроекструзією для ущільнення некомпактних заготовок, що синтезовані із суміші порошкових компонентів на основі порошку титану. Встановлено, що в діапазоні коефіцієнтів витяжки, що забезпечує збереження цілісності заготовок, деформація гідроекструзією не приводить до повного усунення пористості.*

**Ключові слова:** гідроекструзія, титановий сплав, заготовка, пори, ущільнення, структура.

**Pavlenko D., Ovchinnikov A. Compaction of the titanium alloys by hidroextrusion**

*It was considered the possibility of the usage of the method of the deformation by hidroextrusion for sealing the non-compact billets, that are synthesized from a mixture of powder components on the base of titanium powder. It was found out in the range of billet's reduction ratio, where is saved their entirety, the deformation by hidroextrusion does not lead to complete elimination of porosity.*

**Key words:** hidroextrusion, titanium alloys, billet, processing, pores, sea, structure.