

УДК 669.295:621.7.044

А. Я. Качан<sup>1</sup>, А. В. Овчинников<sup>1</sup>, Д. В. Павленко<sup>1</sup>, В. Г. Шевченко<sup>1</sup>,  
Р. Ю. Кулагин<sup>2</sup>, Я. Е. Бейгельзимер<sup>2</sup>, В. Н. Варюхин<sup>2</sup>, Д. В. Распорня<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

<sup>2</sup> Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины, г. Донецк

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИИ

*Исследовано влияние температуры интенсивной пластической деформации методом винтовой экструзии на структуру и микротвердость титанового сплава ВТ8. Определена область температур деформации 700–750 °С, обработка в которой приводит к формированию в заготовках субмикроструктурной структуры. Установлено повышение микротвердости сплава с субмикроструктурной структурой на 80 % по сравнению со сплавом, имеющим глобулярную структуру. Выполнен анализ перспективности технологических схем, включающих винтовую экструзию, для производства лопаток ГТД.*

**Ключевые слова:** жаропрочный титановый сплав, интенсивная пластическая деформация, винтовая экструзия, структура, лопатка, механическая обработка, высокоскоростное резание, вальцевание.

### Постановка проблемы

Анализ современных тенденций в области самолетостроения и, в частности, авиадвигателестроения, позволяет выделить одну из основных задач — повышение мощности силовых установок с одновременным снижением их массы. Решение этой задачи связано с поиском новых материалов, обладающих высокой удельной прочностью. Хорошие перспективы в этом плане имеют материалы с нано- или субмикроструктурной (СМК) структурой, полученные методами интенсивной пластической деформации (ИПД) [1, 2], в частности, винтовой экструзией (ВЭ) [3, 4]. Наибольший интерес для наноструктурирования заслуживают титановые сплавы, т.к. для них характерна максимальная удельная прочность и на их долю приходится до 60 % деталей компрессорной части двигателя. В последние годы предпринимаются попытки применить наноструктурированные титановые сплавы для изготовления деталей ГТД [5, 6]. Как правило, это небольшие элементы деталей ГТД, изготовленные из несложных титановых сплавов. Максимальной эффективности можно достигнуть путем применения титана в наноструктурированном состоянии для основных деталей роторной части ГТД (лопатки, диски, моноколеса и др.), изготавливаемых из жаропрочных сплавов, что сможет обеспечить снижение веса и повышение надежности двигателя в целом.

В настоящее время на АО «Мотор Сич» используют технологию производства лопаток из

прутков жаропрочных титановых сплавов путем экструзии цилиндрических заготовок в формообразующую матрицу. Сами прутки представляют собой дорогостоящие полуфабрикаты зарубежного производства, а технология их изготовления включает в себя многократную механическую и термическую обработку слитков двойного (или тройного) переplava [7]. Одной из главных целей такой многоступенчатой схемы обработки является получение «проработанной» деформированной структуры. Основными недостатками этой технологии является трудоемкость и энергоемкость, а также значительные потери материала в результате многократной термомеханической обработки заготовок.

Альтернативной технологией получения заготовок из титановых сплавов для изготовления деталей роторной части авиационных двигателей может выступить технология, в которой слиток деформируют «прорабатывают» путем интенсивной пластической деформации, в результате чего в нем сразу формируется необходимая субмикроструктурная структура.

Целью настоящей работы являлась разработка методики получения СМК структуры в сложнелегированных титановых сплавах методом ВЭ, а также анализ возможных технологических схем получения лопаток компрессора, с учетом особенностей последующей обработки СМК.

### Методики исследований

Для лопаток и моноколес компрессора ГТД применяются  $\alpha+\beta$ -сплавы титана марок ВТ3-1,

BT8, BT8M-1 и др. Исследования влияния температуры деформации на структуру проводили для сплава BT8. Деформацию осуществляли методом ВЭ на гидравлическом прессе усилием 1,6 МН. На рис. 1 приведена фотография технологической оснастки для осуществления процесса деформации.



Рис. 1. Технологическая оснастка для ВЭ

В поперечном сечении канал винтовой матрицы представлял собой овал с размерами 12×20 мм. Длина винтового канала 7 мм, угол поворота поперечного сечения канала 40°. Поперечное сечение заготовки повторяло геометрию канала винтовой матрицы. Для уменьшения трения поверхность заготовки омедняли и использовали специальную смазку на основе гидрида титана.

Перед деформацией заготовку нагревали до заданной температуры в печи сопротивления. Нагрев штамповой оснастки производили нагревателем до температуры 450 °С и поддерживали на постоянном уровне на этапе обработки. Контроль температуры оснастки выполняли с помощью термопары, обеспечивающей точность измерения температуры ±10 °С.

Исследования микроструктуры проводили на просвечивающем электронном микроскопе JEM-100CXII при ускоряющем напряжении 100 кВ, а также на растровых электронных микроскопах JSM-T300 и РЭМ-106И с применением химического анализа по линии и в точке. Количественный анализ структурных составляющих выполняли методом секущих с использованием в качестве анализируемой поверхности область шлифа размером 100×100 мкм для определения количества структурных составляющих размером до 1000 нм и 10×10 мкм для определения количества структурных составляющих размером до 500 нм. В качестве секущих использовали линейку в программном обеспечении оборудования.

С целью определения изменения механических свойств в различных зонах деформированных образцов определяли микротвердость на приборе MM7T фирмы «BUENHLER» при нагрузке индентора 50 г в течение 10 с.

## Результаты исследований и их обсуждение

Для получения в заготовках СМК структуры ставилась задача экспериментальным путем определить температуру деформации, при которой реализуется процесс дробления структурных составляющих во всем объеме заготовки.

Согласно [8], статическая рекристаллизация сплава BT8 происходит при температурах 900–950 °С, поэтому верхний уровень температурного диапазона нагрева под деформационную обработку приняли равным 900 °С. Нижний уровень приняли равным 650 °С, исходя из того, что в районе 600–650 °С имеет место скачкообразное снижение пластичности и повышение сопротивления деформации сплава. Режимы деформации, микротвердость и результаты анализа структуры образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы деформации и результаты исследований структуры и свойств сплава BT8 после ВЭ

Температура нагрева	Относительное кол-во рекристаллизованных зерен, %	Относительное кол-во СМК зерен с размером менее 500 нм	Микротвердость $H_{\mu} 50$ , МПа
900	до 100	0	2215...2800
850	90	0	2700...3050
800	30	10	3230...4100
750	≥ 5	48%	3980...4220
700	–	≥ 90%	4100...4280
650	Разрушение заготовки		

Вид заготовок до и после реализации процесса ВЭ на разливных режимах представлен на рисунке 2.

Как следует из анализа данных, представленных в таблице 1, при температурах 800–900 °С в различной степени имела место динамическая рекристаллизация деформированных зерен, что подтвердил анализ структуры сплава (рис. 3, а, б).

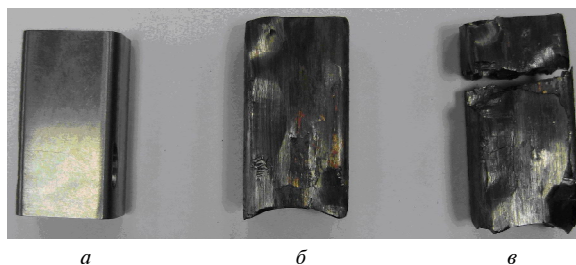


Рис. 2. Вид заготовок до и после процесса винтовой экструзии: а – исходная; б – ВЭ ( $T = 750...900$  °С); в – ВЭ ( $T = 650$  °С)

Снижение температуры деформации привело к уменьшению количества рекристаллизованных зерен (см. рис. 3, б) и при 750 °С процесс динамической рекристаллизации практически прекратился (см. рис. 3, в). Снижение температуры до 700 °С способствовало большей деформационной проработке структуры, на что указывает повышение количества структурных составляющих с размерами менее 500 нм до 90% (см. табл. 1). При дальнейшем снижении температуры до 650 °С установлено появление несплошностей, трещин на поверхности заготовок, вплоть до разрушения заготовок в поперечном сечении (рис. 2, в).

В микроструктуре сплавов деформированных при температурах 700–750 °С установлено дробление основных структурных составляющих  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз. В полученной структуре отсутствовали характерные для стандартных сплавов границы исходных  $\beta$ -зерен и  $\alpha$ -оторочка. Границы  $\alpha$ -фазы имели нечеткое очертание, что, по нашему мнению, связано с существенным уменьшением толщины границ, а также с появлением общих коге-

рентных плоскостей между двумя структурными составляющими, что является следствием высокой подвижности атомов в процессе деформации. Размер фрагментов структуры, полученных при обработке ВЭ в указанном диапазоне температур составил 200...500 нм. Принимая во внимание, что минимальные размеры структурных составляющих находятся на уровне 200...500 нм, согласно фундаментальным работам [2, 9], данную структуру можно отнести к субмикроструктурной. Исследование микротвердости деформированной структуры показало, что в заготовках с размером структурных составляющих менее 500 нм, микротвердость составляла 4280 МПа, что более чем в 1,5 раза выше, чем в исходном прутке.

Таким образом, установлен температурный интервал 700...770 °С, позволяющий реализовать процесс ИПД методом ВЭ для жаропрочных титановых сплавов. Получен эффект дробления структурных составляющих  $\alpha$ + $\beta$ -сплава ВТ8 до размеров 200...500 нм, что позволяет их классифицировать как СМК-сплавы. Полученные результаты исследований открывают возможность упрощения технологической схемы изготовления роторных деталей ГТД из СМК титановых сплавов.

#### Технология получения лопаток на основе метода ВЭ

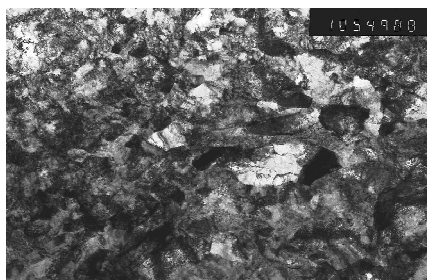
Применение для изготовления лопаток компрессора сплавов в СМК состоянии накладывает ряд ограничений на технологический процесс их изготовления, связанных с особенностью структуры и свойств таких материалов. В первую очередь, быстрый рост зерен при температурах выше температуры полиморфного превращения. Это предопределяет выбор методов механической и термической обработки при изготовлении из них деталей ГТД. Для определения применимости вариантов изготовления лопаток из материалов в СМК состоянии необходимо рассмотреть их особенности с точки зрения влияния на структуру сплава.

В настоящее время для изготовления лопаток компрессора из титановых сплавов используют следующую технологическую схему:

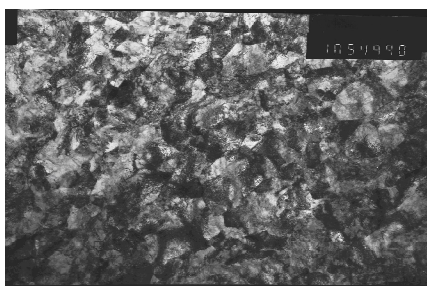
- получение заготовки методом выдавливания или периодической прокатки;
- формообразование пера механической обработкой;
- пластическая деформация (вальцевание);
- доводка геометрии пера;
- формообразование хвостовика лопатки пластической деформацией (вальцевание);
- термическая обработка;
- отделочно-упрочняющая обработка пера лопатки (шлифование кромок, виброабразивная обработка, деформационное упрочнение поверхностного слоя);



а



б



в

Рис. 3. Характерные микроструктуры сплава ВТ8 ( $\times 5000$ ) после ВЭ для различных диапазонов температур деформации

- упрочнение хвостовика лопатки.

Отличительной особенностью существующей и предлагаемой технологических схем являются этапы получения заготовок и формообразование аэродинамического профиля пера лопаток.

Согласно технологической схемы, применяемой на АО «Мотор Сич», заготовку получают методом выдавливания, точной штамповки или периодической прокатки, а аэродинамический профиль пера формируют путем вальцевания. При такой схеме технология получения заготовки является высокопроизводительной, ее форма и размеры максимально приближены к готовой детали, обеспечиваются высокие механические свойства [10]. Однако, такая технология предусматривает нагрев металла до значительных температур (800...900) °С при выдавливании и (500...600) °С при штамповке. Для данной технологии характерна значительная неравномерность пластической деформации вдоль осей пера лопатки [11]. Оба эти фактора для сплавов в СМК состоянии могут предопределять процессы структурно-фазовых переходов, а также процессы возврата и роста зерна. Для данной технологии неблагоприятным, с точки зрения получения лопаток из сплавов в СМК состоянии, являются операции по доводке геометрии профиля пера и кромок лопаток, выполняемые абразивными инструментами. Так, при шлифовании кромок лопаток они подвергаются периодически повторяющемуся местному нагреву (и остыванию), что приводит к неуправляемому процессу рекристаллизации. Контактная температура в зоне шлифования титановых сплавов алмазным кругом может достигать 850...1050 °С [11], что недопустимо для сплавов в СМК состоянии.

Таким образом, можно сделать вывод, что традиционная схема производства лопаток является неприемлемой для СМК сплавов, т.к в ее основе лежат операции формоизменения заготовок путем их нагрева до температур полиморфного превращения.

Одним из новых прогрессивных технологических процессов является технология получение лопаток компрессора, основанная на формообразовании высокоскоростным фрезерованием [12, 13]. Основными особенностями процесса являются малые толщины среза и высокие скорости резания. При этом в качестве заготовок для лопаток может быть использован прокат различного сечения, поковки и штамповки.

В качестве опытной, предложена следующая технологическая схема:

- из заготовки титанового сплава с СМК структурой проведение формообразования пера лопатки путем механической обработки (высокоскоростным фрезерованием);

- формообразование хвостовика механической обработкой;
- термическая обработка;
- нанесение защитных покрытий;
- отделочно-упрочняющая обработка пера
- упрочнение хвостовика.

Таким образом, анализ особенностей технологических схем изготовления лопаток компрессора применительно к сплавам в СМК состоянии показывает, что их необходимо рассматривать в двух аспектах: получение заготовок с СМК структурой и последующего формообразования с поверхностной обработкой. Предлагаемая новая технологическая схема изготовления лопаток показана на рис. 4.

При данной технологической схеме наиболее рациональной механической обработкой заготовки с СМК структурой для формообразования пера и хвостовика лопатки является высокоскоростное фрезерование.

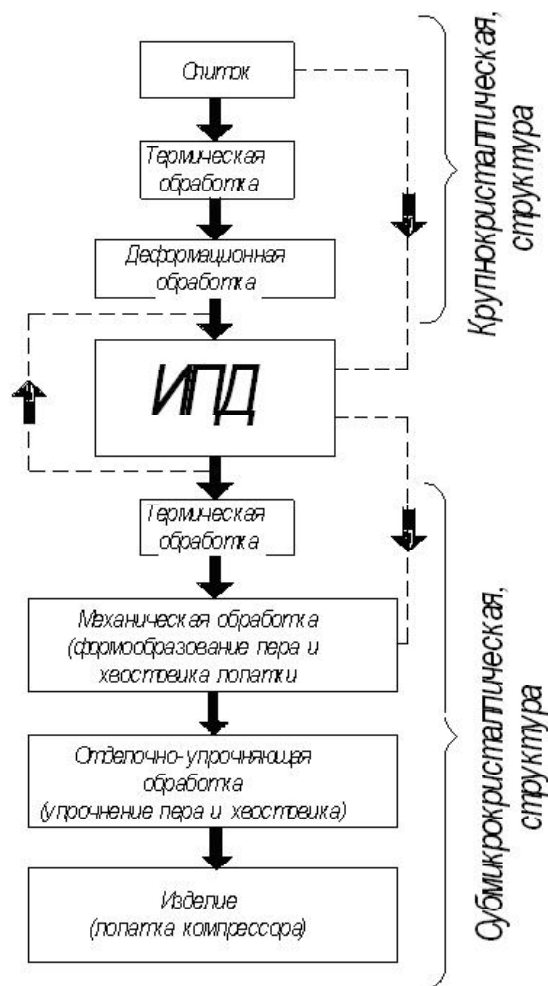


Рис. 4. Структурная технологическая схема изготовления лопаток компрессора из жаропрочного титанового сплава BT8 с использованием интенсивной пластической деформации

В целом, данная технологическая схема позволяет получать заготовки непосредственно из слитков жаропрочных титановых сплавов с заданой СМК структурой и последующим формообразованием профиля лопатки без существенного изменения структуры и свойств.

#### Выводы

1. Реализован процесс ИПД методом ВЭ для жаропрочного титанового сплава ВТ8. Установлено, что ВЭ при температуре деформации 700...750 °С приводит к формированию в сплаве СМК структуры и повышению микротвердости более чем в 1,5 раза в сравнении со стандартным прутком.

2. Показано, что наиболее рациональной технологической схемой изготовления компрессорных лопаток ГТД является получение заготовок с СМК структурой из титановых слитков путем ИПД методом ВЭ, а также их последующая механическая обработка, основанная на технологии высокоскоростного резания.

#### Список литературы

- Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation / [R. Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, etc.] // JOM 58 (4) (2006). — P. 33–39.
- Валиев Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И. В. Александров. — М. : Академкнига. — 2007. — 397 с.
- Винтовая экструзия — процесс накопления деформации / [Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов, С. Г. Сынков]. — Донецк : Фирма ТЕАН, 2003. — 87 с.
- Useful properties of twist extrusion / [Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, D. Orlov] // Materials Science and Engineering A 503 (2009). — P. 14–17.
- Павлинич С. П. К вопросу о применении наноструктурных материалов для лопаток компрессора стационарных ГТД, работающих в условиях больших ресурсов / Павлинич С. П. // Нефтегазовое дело. — Т. 4. — № 1. — 2006. — С. 197–200.
- Наноиндустрия авиадвигателя [Электронный ресурс.] — П. :Пермские авиационные двигатели, 2010. — Режим доступа: <http://www.rusnanonet.ru/articles/45708>.
- Полуфабрикаты из титановых сплавов / [Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А. и др.]. — М. : Металлургия, 1979. — 512 с.
- Обработка титановых сплавов давлением / [Мажарова Г. Е., Комановский А. З., Чечулин Б. Б., Важецин С. Ф.]. — М. : Металлургия, 1977. — 96 с.
- Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / Гусев А.И. — М. : ФИЗМАТ-ЛИТ, 2005. — 416 с.
- Изготовление заготовок газотурбинных двигателей из титановых сплавов / В. А. Богуслаев, А. И. Долматов, П.Д. Жеманюк и др.]. — Запорожье : ОАО «Мотор Сич», 2002. — 125 с.
- Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть I. Монография / [А. В. Богуслаев, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк и др.]. — Запорожье, ОАО «Мотор Сич», 2003 г. — 396 с.
- Анализ технологических процессов формообразования профиля пера лопаток компрессора / [Н.В. Сахнюк, А.Я. Качан, С.Д. Зиличихис, В.А. Леонтьев] // Технологические системы. — № 31–32 (5–6/2005). — С. 12–24.
- Жеманюк П. Д. Формообразование сложнопрофильных поверхностей монокоплексов высокоскоростным фрезерованием / П. Д. Жеманюк, В. Ф. Мозговой, А. Я. Качан // Газотурбинные технологии. — 2003. — № 5 (26) — С. 18–21.

Поступила в редакцию 30.05.2011

#### Качан О.Я., Овчинников О.В., Павленко Д.В., Шевченко В.Г., Кулагін Р.Ю., Бейгельзимер Я.Е., Варюхін В.Н., Распорня Д.В. Технологічні особливості виготовлення лопаток компресора ГТД із титанових сплавів з використанням гвинтової екструзії

*Досліджено вплив температури інтенсивної пластичної деформації методом гвинтової екструзії на структуру й микротвердість титанового сплаву ВТ8. Визначена область температур деформації 700–750 °С, обробка в якій призводить до формування у заготовках субмікроструктурної структури. Встановлено підвищення микротвердості сплаву з субмікроструктурною структурою на 80% у порівнянні зі сплавом, який має глобулярну структуру. Виконано аналіз перспективності технологічних схем, які включають гвинтову екструзію, для виробництва лопаток ГТД.*

**Ключові слова:** жароміцний титановий сплав, інтенсивна пластична деформація, гвинтова екструзія, структура, лопатка, механічна обробка, високошвидкісне різання, вальцювання.

**Kachan A., Ovchinnikov A., Pavlenko D., Shevchenko V., Kulagin R., Beygelzimer Ya., Varyukhin V., Raspornya D. Technological features of manufacturing titanium GTE compressor blade by the use of twist extrusion**

*Influence of temperature of the severe plastic deformation by twist extrusion method on the structure and microhardness of the titanium alloy VT8 is investigated. It is established, that deformation billets at the temperature range 700-750°C leads to the formation submicrocrystalline structure. It was shown, that the microhardness increase of the alloy with submicrocrystalline structure by 80% compared with the alloy, with globular structure. Analysis of the promising technological schemes involving twist extrusion for the gas turbine blades production is presented.*

**Key words:** *heat-resistant titanium alloy, severe plastic deformation, twist extrusion, structure, shoulder, machining, high-speed cutting, forge-rolling.*