

УДК 669.295:620.179

**Д-р техн. наук В. Е. Ольшанецкий, д-р техн. наук А. Я. Качан,  
д-р техн. наук А. В. Овчинников, А. А. Джуган**

*Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье*

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

*Разработана технологическая схема и определены основные режимы технологического процесса структурирования объемных заготовок из титановых сплавов методом интенсивной пластической деформации, обеспечивающие формирование субмикроструктурной структуры в исследовательских сплавах. Исследовано влияние содержания легирующих элементов на структуру и механические свойства титановых сплавов, подвергающихся интенсивной пластической деформации, а также получены соответствующие аналитические зависимости.*

**Ключевые слова:** структура, размер, механические свойства, легирующие элементы, интенсивная пластическая деформация, титан.

Эффективное структурирование объемных заготовок из титановых сплавов можно реализовать, используя методы интенсивной пластической деформации (ИПД). Считается, что наиболее эффективным методом такой механической обработки является винтовая экструзия (ВЭ). В то же время, не установлено влияние состава сплавов на этот процесс. В работе [1] показано, что в зависимости от состава сплава, параметры процесса винтовой экструзии необходимо подбирать индивидуально. Важным фактором, определяющим степень такой «проработки» структуры, являются ее исходные составляющие. Поэтому для получения нужной конечной структуры необходима технологическая отработка всей цепочки операций деформации (ВЭ). Так, например технология ИПД методом ВЭ, разработанная в ДонФТИ им. А. А. Галкина, позволяет получать титановые сплавы с различным типом конечной структуры, включая требуемый тип.

Таким образом, основной задачей, поставленной в данной работе, было получить указанным методом субмикроструктурные (СМК) титановые материалы со сложной системой легирования (заготовки типа ВТЗ-1 и ВТ8). Для реализации структурирования сплавов этого типа была

разработана технологическая схема деформации и определены основные режимы процесса деформации [2]. Суть особенностей и новизны метода ИПД путем ВЭ состояла в продавливании призматической заготовки через матрицу с винтовым каналом. Угол  $\beta$  наклона винтовой линии к направлению оси экструзии, который на начальном и конечном участках канала равен нулю, изменялся по высоте матрицы. При этом матрица подогревалась до температуры 750 °С.

Особенности геометрии канала матрицы обеспечивали сохранение при выдавливании идентичности начальной и конечной форм и размеров обрабатываемой заготовки, что позволяло осуществлять процесс экструзии многократно с целью получения исключительно большой конечной деформации [3]. Полученные методом ВЭ заготовки имели следующие размеры: 25×40×65 мм.

Как следует из опытных результатов исследований, с каждым проходом ИПД методом ВЭ возрастал объем СМК структуры и достигал в количественном отношении порядка 90 % при температуре испытаний 700 °С (табл. 1). При повышении температуры количество СМК структуры резко уменьшалось (примерно в два раза) при практическом сохранении величины микро-

**Таблица 1** – Технологические параметры винтовой экструзии титановых заготовок

Сплав	Размеры заготовки, мм	Температура нагрева заготовки, °С	Давление прессования, МПа	Противодавление, МПа	Угол наклона канала матрицы $\beta$ , град.
( $\alpha + \beta$ )- сплавы типа ВТ8М-1	25×40×65	770	2390	130	45

твердости. В то же время, снижение температуры деформации (до 650 °С) вызывало разрушение заготовок. Более полная информация касательно влияния температуры ВЭ приведена в таблице 2.

В этой же таблице содержатся данные, касающиеся относительного количества рекристаллизованных зерен, которых при температуре испытаний 700...750 °С было менее 5%. Это свидетельствует об изменении характера дислокационной структуры в плане рассасывания приграничных дислокационных скоплений, и означает, что в процессе структурирования титановых сплавов сложного состава (BT8; BT3-1) на этапе деформации (при увеличении числа циклов ВЭ) наблюдается определенная текучесть, не сопровождающаяся увеличением степени наклепа титанового материала.

Явление повышенной текучести при проведении испытаний образцов титановых сплавов после винтовой экструзии заслуживает особого внимания и требует объяснений (хотя бы в плане разумных предположений). Поскольку при осуществлении цикла экструзии (определенного числа проходов материала через винтовой канал) на границах зерен образуется множество несплошностей (каверн), которые становятся местами стоков дислокаций (как и в случае внешних границ кристаллов) от функционирующих источников (типа Франка-Рида). Это обстоятельство предотвращает накопление дислокаций у такого рода границ контактирующих зерен и таким образом увеличивает степень деформации без повышения прочности (т. е. обеспечивает повышение пластичности).

Согласно [4], статическая рекристаллизация сплава BT8 отвечает температурам 900...950 °С; поэтому верхний уровень температурного диапазона нагревов под деформационную обработку принимали равным 900 °С. Нижний уровень температуры выбирали равным 650 °С, исходя из того, что в районе 600...650 °С наблюдается скачкообразное снижение пластичности и повышение сопротивления деформации сплава. Режимы деформации, микротвердость и результаты анализа структуры образцов приведены в той же таблице 1.

Вид заготовок из  $\alpha + \beta$  - титановых сплавов до и после реализации процесса ВЭ при различных режимах представлен на рисунке рис. 1.

Как следует из анализа данных, представленных в таблице 1, при температурах 800...900 °С происходила динамическая рекристаллизация деформированных зерен, что подтвердил анализ структуры сплава с использованием электронно-оптического метода (рис. 2а).

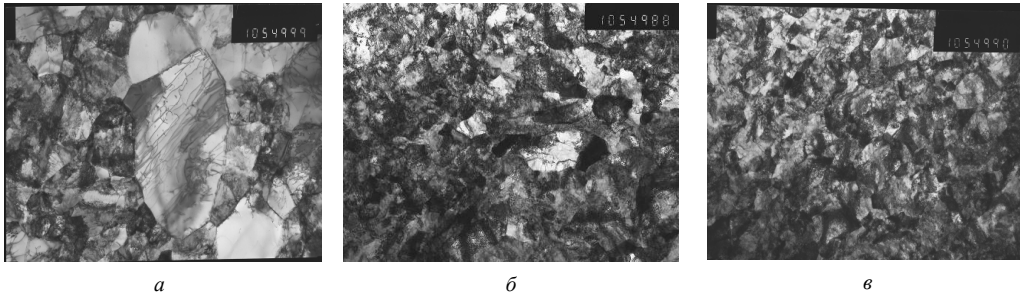
Снижение температуры деформации привело к уменьшению числа рекристаллизованных зерен (см. рис. 2б) и при 750 °С процесс динамической рекристаллизации практически прекратился (см. рис. 2в). Снижение температуры до 700 °С способствовало большей деформационной проработке структуры, на что указывает повышение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

**Таблица 2** – Режимы деформации и результаты исследований структуры и свойств сплава BT8 после ВЭ

Температура нагрева, °С	Относительное количество рекристаллизованных зерен, %	Относительное кол-во СМК зерен с размером менее 500 нм, %	Микротвердость Н <sub>μ</sub> 50, МПа
900	100	0	2215...2800
850	90	0	2700...3050
800	30	10	3230...4100
750	менее 5	48	3980...4220
700	менее 5	≥90	4100...4280
650	разрушение	–	–



**Рис. 1.** Вид заготовок из сплава BT8 до и после процесса винтовой экструзии: а – исходная; б – ВЭ ( $T = 750$  °С); в – ВЭ ( $T = 650$  °С)



**Рис. 2.** Микроструктура сплава VT8 после ВЭ при различных температурах деформации, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии: *а* –  $850 \pm 10$  °С ( $\times 5000$ ); *б* –  $800 \pm 10$  °С ( $\times 5000$ ); *в* –  $750 \pm 10$  °С ( $\times 5000$ )

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 с оторочкой из  $\alpha$ -фазы. Границы зерен  $\alpha$ -фазы имели нечеткие очертания, что, по мнению авторов, связано с существенным уменьшением толщины границ, за счет устранения несплошностей приграничных зон. Размер фрагментов структуры, полученных при обработке ВЭ в указанном диапазоне температур, составил  $200...500$  нм.

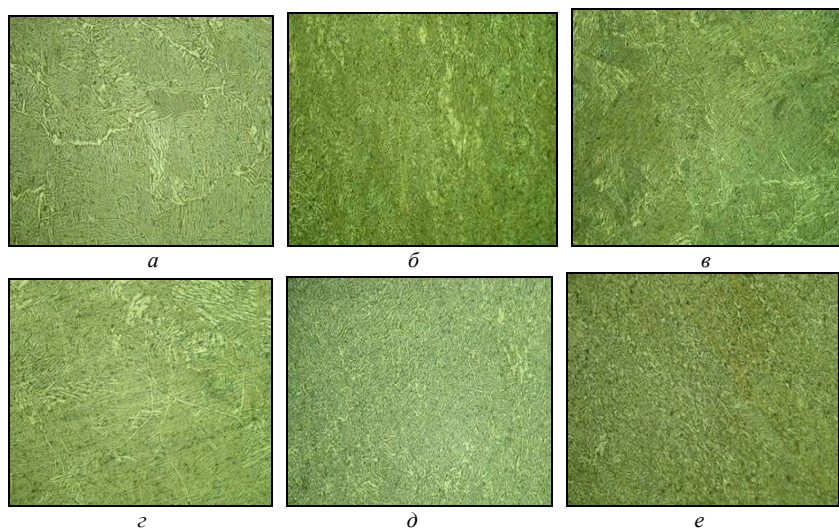
Принимая во внимание, что минимальные размеры структурных составляющих не превышали  $500$  нм, полученную структуру можно классифицировать как субмикроструктуру (СМК), согласно фундаментальным работам [5, 6]. Исследования микротвердости деформированной структуры показали, что в заготовках с размером структурных составляющих порядка  $500$  нм, микротвердость составляла  $4280$  МПа, что более чем в

$1,5$  раза выше микротвердости исходных заготовок. Аналогичные результаты были получены и при деформации  $\alpha + \beta$ -сплавов [2, 7]. Структура сплава VT3-1 при различных температурах деформации приведена на рис. 3.

В результате всех этих исследований был установлен температурный интервал ( $700...750$  °С), позволяющий качественно реализовывать процесс ИПД методом ВЭ для жаропрочных  $\alpha + \beta$ -титановых сплавов. При этом обнаружен эффект дробления структурных составляющих  $\alpha + \beta$ -сплавов VT8 и VT3-1 до размеров  $200...500$  нм, позволяет их классифицировать как СМК-сплавы [8].

#### Выводы

1. В результате проведенных исследований получены титановые сплавы с субмикроструктурой из литых заготовок.
2. Разработана технологическая схема ИПД методом ВЭ для структурирования жаропрочных титановых сплавов VT8 и VT 3-1.



**Рис. 3.** Микроструктура поперечного сечения образцов из сплава VT3-1 (аналогично и для сплава VT8) при различных температурах деформации ( $\times 500$ ): *а* – центр,  $T = 820$  °С, 1 проход; *б* – край,  $T = 820$  °С, 1 проход; *в* – центр,  $T = 870$  °С, 1 проход; *г* – край,  $T = 870$  °С, 1 проход; *д* – центр,  $T = 770$  °С, 1 проход; *е* – край,  $T = 770$  °С, 1 проход

3. Осуществленные технологические мероприятия позволили получать СМК титановые материалы с полезной анизотропией свойств, что позволяет рекомендовать их применение для изготовления ответственных деталей авиационного назначения (например, лопаток компрессоров последних ступеней, а также моноколес, взамен используемых менее прочных титановых  $\alpha+\beta$ -сплавов).

#### Список литературы

1. Коваленко Т. А. Формирование стабильной субмикроструктурной структуры в титане / Т. А. Коваленко, А. В. Овчинников // МиТОМ. – 2010. – № 2. – С. 35–43.
2. Овчинников А. В. Применение винтовой экструзии для получения субмикроструктурной структуры и гомогенизации титанового сплава ВТ3-1 / А. В. Овчинников, Д. В. Павленко, А. Я. Качан [и др.] // Вестник двигателестроения. – 2007. – № 2. – С. 185–188.
3. Новые схемы накопления больших пластических деформаций с использованием гидрокструзии / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, С. Г. Сынков [и др.] // Физика и техника высоких давлений. – 1999. – №3 (т. 9). – С. 109–111.
4. Комановский А. З. Обработка титановых сплавов давлением / Комановский А. З., Чечулин Б. Б., Важецин С. Ф. – М. : Металлургия, 1977 – 96 с.
5. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / Гусев А. И. – М. : ФИЗМАТ-ЛИТ, 2005. – 416 с.
6. Валиева Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р. З. Валиева, И. В. Александров – М. : Академкнига, 2007. – 397 с.
7. Влияние интенсивной пластической деформации на критическую температуру  $A_{c3}$  титанового сплава ВТ8 / Т. А. Коваленко, И. А. Овчинникова, О. С. Омельченко [и др.] // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. научн. трудов. – Дн-вск, 2011. – Вып. 58. – С.407-412.
8. Технологические особенности изготовления лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов с применением винтовой экструзии / Качан А. Я, Овчинников А. В., Павленко Д. В. [и др.] // Вестник двигателестроения. – 2012. – № 1. – С. 92–97.

Поступила в редакцию 15.05.2017

#### **Ольшанецкий В.Ю., Качан О.Я., Овчинников О.В., Джуган О.А. Влияние технологических параметров процесса гвинтовой экструзии на структуру та властивості складнолегованих титанових сплавів**

*Розроблено технологічну схему та визначено основні режими технологічного процесу структурування об'ємних заготовок з титанових сплавів методом інтенсивної пластичної деформації, що забезпечують формування субмікроструктурної структури в дослідних сплавах. Досліджено вплив вмісту легуючих елементів на структуру та механічні властивості титанових сплавів, що піддаються інтенсивній пластичній деформації, а також отримано відповідні аналітичні залежності.*

**Ключові слова:** структура, розмір, механічні властивості, легувальні елементи, інтенсивна пластична деформація, титан.

#### **Ol'shanetskii V., Kachan A., Ovchinnikov A., Dzhugan A. Influence of technological parameters of the process of twist extrusion on the structure and properties of complex titanium alloys**

*The technological scheme is developed and the basic modes of technological process of structuring of bulk billets from titanium alloys by the method of intensive plastic deformation providing formation of submicrocrystalline structure in research alloys are determined. The effect of the content of alloying elements on the structure and mechanical properties of titanium alloys subjected to intense plastic deformation is studied, and corresponding analytical dependencies are obtained.*

**Key words:** structure, size, mechanical properties, alloying element, intensive plastic deformation, titanium.