

УДК 669.295

Т. А. Глотка, д-р техн. наук В. Е. Ольшанецкий,  
канд. техн. наук В. Г. Шевченко, А. А. Джуган

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

## ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ СЛОЖНОЛЕГИРОВАННОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT25У ПУТЕМ ОБЪЕМНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

*Исследовано влияние предварительной термической обработки сложнолегированного титанового сплава VT25У на деформируемость в процессе интенсивной пластической деформации. Определены оптимальные технологические режимы структурирования, обеспечивающие формирование в сложнолегированных титановых сплавах субмикроструктурной структуры.*

**Ключевые слова:** роторные детали, сплав VT25У, термообработка, интенсивная пластическая деформация, субмикроструктурная структура.

### Актуальность исследований

Современный уровень развития и дальнейший прогресс авиационной техники во многом определяется использованием титановых сплавов, обладающих уникальным сочетанием физико-химических и механических свойств. В условиях увеличения нагрузок на роторные детали газотурбинных двигателей (ГТД) запаса прочности титановых сплавов становится недостаточно [1]. Недостаточный запас прочности может быть обусловлен разбросом механических свойств. Так, согласно данным [2], причинами значительной разницы между верхним и нижним уровнями прочности титановых сплавов могут быть: неоднородность химического состава, структурная неоднородность, наличие различного рода включений, что требует исследования возможностей снижения их вредного влияния.

Одним из наиболее эффективных способов получения в промышленных металлах и сплавах высокого уровня механических свойств является интенсивная пластическая деформация (ИПД) методом винтовой экструзии (ВЭ) [3]. Эта технология позволяет получать материалы с нано- и субмикроструктурной (НК и СМК) структурой, обладающей уникальным сочетанием механических и эксплуатационных свойств, в частности, высокой прочностью, пластичностью, высокой усталостной прочностью и износостойкостью [4].

Таким образом, целью исследований является изучение возможности формирования СМК структуры в сложнолегированных титановых сплавах, используемых для изготовления роторных деталей ГТД. Это даст возможность повысить уровень механических и служебных свойств материала за счет улучшения структурного состояния.

### Методика исследований

В качестве исходного материала для проведения исследований применялся фрагмент штамповки из сплава VT25У. Микроструктурный анализ деформированного титанового сплава проводили с использованием инвертированных микроскопов отраженного света «NEOPHOT-32» и «Observer.D1m» (фирма «Carl Zeiss») при увеличениях от 100 до 1000 раз. При этом использовали окуляр микрометры с линейкой (увеличение 500 раз; 1 деление = 2 мкм).

СМК структуру в титановом сплаве получали по технологии ИПД методом ВЭ. Суть ВЭ состояла в продавливании призматической заготовки через матрицу с винтовым каналом. Угол  $\beta$  наклона винтовой линии к направлению оси экструзии изменяли по высоте матрицы, причем на ее начальном и конечном участках он был равен нулю. Для деформации использовали гидравлический пресс с усилием продавливания 4000 кН.

Анализ макроструктуры титановых заготовок после ИПД проводили с применением стереоскопического бинокулярного микроскопа МСП-2 фирмы «ЛЮМО» (увеличения от 5 до 35 раз), оснащенного измерительной линейкой, цена деления которой составляла 0,05 мм.

Изменение структурного состояния сплава оценивали показателями твердости по Роквеллу. Определение твердости проводили согласно ГОСТ 9013-59. В качестве оборудования использовали твердомер ТК-2.

Для оценки механических свойств структурных составляющих исследуемого материала применяли методику измерения микротвердости. Определение микротвердости проводили согласно ГОСТ 9450-76 (микротвердомер ПМТ-3).

## Результаты исследований

Исследовали образцы из сплава BT25Y, который применяется для изготовления дисков и моноколес, являющихся наиболее нагруженными деталями компрессора ГТД и, в ряде случаев, лимитирующих ресурс авиационного двигателя. Микроструктура исходных заготовок представляла собой смесь зерен  $\alpha$ - и  $\beta$ - фаз с размером 10...15 мкм. Зерна первичной  $\alpha$ - фазы имели глобулярную форму, а  $\beta$ - фаза – характеризовалась пластинчатым строением. То есть структура была бимодального типа, который отличается высокими значениями прочности, предела выносливости и наименьшей вибрационной чувствительностью к надрезу.

В ряде работ [5–7] показано, что наиболее трудно деформируются высоколегированные сплавы с большим содержанием алюминия, олова, циркония и вольфрама. Усложняет ситуацию и тот факт, что исследуемый сплав BT25Y поставляется в виде поковок со сформированной деформационной обработкой структурой. Поэтому для реализации процесса структурирования титановых заготовок необходимо сформировать структуру с большей деформационной способностью.

Известно, что регулируя режимы термообработки, можно изменять механические свойства высоколегированных титановых сплавов в довольно широких пределах. Так, высокие показатели пластичности жаропрочных ( $\alpha + \beta$ )- титановых сплавов могут быть достигнуты после закалки из двухфазной области с формированием  $\alpha'$ - фазы, а также после изотермического отжига, что обусловлено образованием большего количества и более крупных частиц  $\beta$ - фазы, характеризующейся более высокой пластичностью по сравнению с частицами  $\alpha$ - фазы. С целью получения такого рода пластичной структуры образцы из сплава BT25Y подвергали термической обработке: изотермическому отжигу и закалке (табл. 1). Анализ результатов исследований твердости, микротвердости и микроструктурного состояния образцов из сплава BT25Y после различных видов термообработки показал, что наименьшей твердостью и, соответственно, большей пластичностью характеризовались образцы с  $\alpha''$ - структурой, полученной после закалки с 900 °С.

Фаза  $\alpha''$  представляет собой пересыщенный твердый раствор легирующих элементов в  $\alpha$ - титане и является типичной мартенситной фазой. Она обычно обра-

зуется в более легированных сплавах титана и имеет большую степень пересыщения [8]. Фаза  $\alpha'$  присутствует в сплавах титана только с теми переходными элементами (Mo, W), атомные радиусы которых близки к атомному радиусу титана. По виду микроструктуры она почти не отличается от фазы  $\alpha'$ , но имеет более мелкоигльчатое строение. Фаза  $\alpha''$  образуется при закалке в результате меньшего, чем при образовании фазы  $\alpha'$ , смещения атомов в процессе бездиффузионной перестройки орторомбической решетки в гексагональную. И поэтому она обладает более высокими значениями пластичности.

Таким образом, в результате проведения исследований разработан режим термической обработки заготовок сплава BT25Y, который позволяет получать более пластичную структуру и, таким образом, повышать деформируемость этого сплава при реализации ИПД методом ВЭ.

Следующим этапом исследований было осуществление структурирования заготовок, предварительно термообработанных по опытным режимам. Анализ результатов испытаний показал, что в образцах, полученных после изотермического отжига, наблюдаем разрушение в процессе 4-го прохода через винтовую матрицу. Образцы же в исходном отожженном состоянии разрушились уже в процессе 2-го прохода. Возможными причинами этого мог стать тот факт, что в составе сплава BT25Y присутствуют такие легирующие элементы, как вольфрам и олово (эвтектоидообразующие  $\beta$ - стабилизирующие элементы). Эти элементы с одной стороны повышают жаропрочность материала за счет высокой температуры плавления и снижения диффузионной подвижности атомов в кристаллической решетке, а с другой – ухудшают деформируемость сплава. Известно, что деформируемость титановых сплавов в значительной степени зависит от легирования. Однако даже проведение изотермического отжига, как следует из вышеприведенного, не привело к повышению пластичности (деформируемости) сплава.

Поэтому для структурирования были выбраны закаленные образцы по следующим режимам деформации методом ВЭ: угол наклона винтовой линии  $\beta = 60^\circ$ ; количество проходов через винтовую матрицу – 7; температура нагрева заготовки – 800 °С.

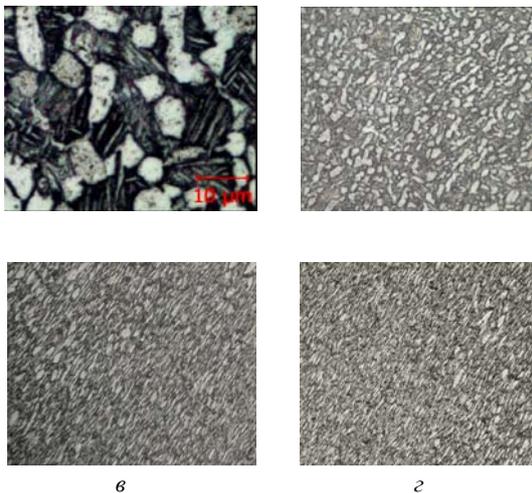
Для определения размеров структурных составля-

Таблица 1 – Твердость и микротвердость образцов из сплава BT25Y

№	Вид термообработки	Режимы термообработки	Среднее число показателей твердости по Роквеллу, HRC	Среднее число показателей микротвердости $H_{\mu}$ , МН/м <sup>2</sup>
1	Закалка	900 °С, вода	28	3300
2	Изотермический отжиг	900 °С ( $\tau = 1$ час) + охлаждение с печью до 580 °С, воздух	39	3900

ющих после реализации метода ИПД в деформированных опытных заготовках исследовали структуру при разных увеличениях. Анализ макроструктурного состояния образцов из сплава ВТ25У позволил установить, что наиболее «проработанной» являлась периферийная зона (полное отсутствие макрозерен), при этом в центральной части заготовки просматривались деформированные макрозерна диаметром 2 мм.

Исследования микроструктуры закаленных заготовок после ВЭ показали, что с повышением величины деформации по сечению образца, структура изменялась от бимодальной до дисперсной смеси из  $\alpha$ - и  $\beta$ - фаз с размерами зерен 1...2 мкм. Бимодальная структура образовывается вследствие нагревания сплава до температуры ( $\alpha + \beta$ )- области. При этом формируется смесь равноосных зерен  $\alpha$  и  $\beta$  фаз. При охлаждении с этой температуры  $\alpha$ - зерна сохраняются неизменными, а  $\beta$ - зерна, испытывая полиморфное превращение  $\alpha \rightarrow \beta$ , состоят из пластин вторичной  $\alpha$ - фазы, разделенных прослойками  $\beta$ - фазы (рис. 1, а).



**Рис. 1.** Микроструктура закаленных заготовок из сплава ВТ25У после ИПД методом ВЭ: а – исходное (закалка с 900 °С); б – 3 прохода; в – 5 проходов; з – 7 проходов

Как видно из рис. 1, на начальных этапах ИПД обнаруживается дробление внутризеренной структуры, при этом размер зерен находится в пределах 2...3 мкм (рис. 1, б). Пятый проход при ВЭ вызывал дальнейшее дробление структурных составляющих до СМК размеров (рис. 1, в). После семи проходов микроструктура сплава ВТ25У представляла собой смесь  $\alpha$ - и  $\beta$ - фаз с размерами зерен до 1 мкм во всем объеме заготовки (рис. 1, з). Последующая ИПД оказалась нецелесообразна, т. к. уже не приводила к видимым изменениям в микроструктуре сплава.

По результатам проведенных исследований установлено, что ИПД методом ВЭ за счет больших степеней деформации и связанным с этим увеличением плотности дислокаций, обеспечивает формирование в титановых сплавах однородной СМК структуры при со-

хранении исходных линейных размеров титановой заготовки.

### Выводы

1. Проведена предварительная термическая обработка сплава ВТ25У в виде закалки с температуры 900 °С в воду. Это способствовало повышению деформируемости сплава в результате образования пластичной структуры мартенситного типа ( $\alpha''$ ), которая оказалась более пластичной при  $H\mu = 3300$  МПа.

2. Реализован процесс структурирования заготовок из сплава ВТ-25У по различным режимам. Установлено, что оптимальными технологическими параметрами для ВЭ такого сложнолегированного титанового сплава являются: угол наклона канала винтовой матрицы  $\beta = 60^\circ$ ; количество проходов не менее  $n = 7$ ; температура нагрева заготовки в процессе деформации 800 °С.

Установлено, что интенсивная пластическая деформация методом винтовой экструзии позволяет сформировать в сплаве ВТ25У СМК структуру, которая, как ожидается, обеспечит повышение прочностных характеристик и увеличит ресурс работы роторных деталей ГТД и двигателя в целом.

Ожидается, что такая структура должна обеспечивать одновременно высокий уровень пластических и прочностных характеристик, а также высокую усталостную долговечность и износостойкость за счет уменьшения размера структурных составляющих с 15 мкм до 0,2...0,5 мкм.

### Список литературы

1. Jackson M. Titanium – 21<sup>st</sup> century / M. Jackson // Materials world. – 2007. – N 5. – P. 32–34.
2. Поковки дисков и валов кованые и штампованные из титановых сплавов. Общие технические условия : ОСТ 1 90197 – 89. – [Введ. с 01.09.1989 г.]. – М. : МПО «ВИАМ». – 25 с.
3. Useful properties of twist extrusion / [Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, D. Orlov] // Materials Science and Engineering. – 2009. – P. 14–17.
4. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure / H. Gleiter // Acta materials. – 2000. – Vol. 48. – № 1. – P. 1–29.
5. Лючков А. Д. О деформируемости некоторых ( $\alpha+\beta$ )- и  $\beta$ - сплавов титана в холодном состоянии / А. Д. Лючков, Л. А. Ильвовская, В. И. Шевченко // Титановые сплавы для новой техники / Н. П. Сажин, И. И. Корнилов. – М., 1968. – С. 257–261.
6. Ильин А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И. С. Полькин. – М. : ВИЛС-МАТИ, 2009. – 458 с.
7. Чечулин Б. Б. Титановые сплавы в машиностроении / Б. Б. Чечулин. – М. : Машиностроение, 1977. – С. 10–17.
8. Reinsch Wayne A. Terminology for titanium microstructure / Wayne A. Reinsch // Metal Progress. – 1982. – N 2. – P. 51–56.

Одержано 17.10.2013

Глотка Т.А., Ольшанецкий В.Ю., Шевченко В.Г., Джуган А.А. Підвищення властивостей складнолегованого титанового сплаву VT25U шляхом об'ємного структуривання із застосуванням інтенсивної пластичної деформації

*Досліджено вплив попередньої термічної обробки складнолегованого титанового сплаву VT25U на деформівність у процесі інтенсивної пластичної деформації. Визначені оптимальні технологічні режими структуривання, що забезпечують формування в складнолегованих титанових сплавах субмікроструктурної структури.*

**Ключові слова:** роторні деталі, сплав VT25U, термообробка, інтенсивна пластична деформація, субмікроструктурна структура.

**Glotka T., Olshanetskiy V., Shevchenko V., Dzhugan A. Improving properties of complexly titanium alloy VT25U by volume structuration using severe plastic deformation**

*The effect of preliminary heat treatment on the deformability during severe plastic deformation of the complex-titanium alloy VT25U was investigated. The optimal structuring process conditions to ensure the submicrocrystalline structure formation of a complexly titanium alloys is determined.*

**Key words:** rotary details, alloy VT25U, heat treatment, severe plastic deformation, submicrocrystalline structure.

---

УДК 669.15'295

Канд. техн. наук Е. А. Черноиваненко

Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепрпетровск

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ФРОНТА $\gamma \rightarrow \alpha$ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИИ ЖЕЛЕЗНЫХ СПЛАВОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ $\alpha$ -СТАБИЛИЗАТОРАМИ

*Выявлены закономерности формирования фронта превращения в высоколегированных железных сплавах в процессе обезуглероживания. Проанализировано влияние основного легирующего элемента (вольфрама) на морфологию фронта перекристаллизации при  $\gamma + M_6C \rightarrow \alpha$  превращении, вызванного диффузионным изменением состава в изотермических условиях.*

**Ключевые слова:** фронт перекристаллизации, трансформация, ячеистый рост, обезуглероживание, железные сплавы.

### Введение

Профиль фронта превращения является важной характеристикой процесса роста кристаллов и зависит от теплофизических условий на фронте, концентрации легирующих элементов и примесей. Трансформация ровного фронта превращения в ячеистый, а затем дендритный является одним из наиболее фундаментальных и важных явлений затвердевания, которая во многом определяет структурное совершенство материала.

Закономерности изменения морфологии фронта кристаллизации при медленных скоростях движения фронта  $\sim 10^{-7} - 10^{-4}$  м/с интенсивно изучалась с начала 50-х годов В. Тиллером, В. Чалмерсом, Дж. Раттером. Ими создана теория концентрационного переохлажде-

ния на основе представлений о диффузионном перераспределении компонентов сплава в расплаве вблизи границы расплав-кристалл [1]. Эта теория в дальнейшем была развита в модели линейной устойчивости Маллинза и Секерки [2, 3], а также Кориелла и Секерки [4, 5], которая позднее была обобщена на нелинейную область Дэвисом [6]. Авторы установили, что ячеистая структура межфазной границы возникает в случае, когда межфазная поверхность становится нестабильной по отношению к волновым искажениям. Эта модель была разработана для плоского и сферического случаев, а также при образовании ячеистого фронта в процессе направленной кристаллизации, который определяет сегрегацию примесей и дислокационную структуру кристалла. В середине 80-х Трайведи и Курц [7, 8], не