

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПУТЕМ ТЕРМООБРАБОТКИ СУБ-МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА**

**Т. А. Глотка, М. Н. Перепелкина, Т. А. Коваленко, О. А. Михайлютенко,  
О. С. Омельченко**

*Запорожский национальный технический университет*

**Актуальность исследований**

Использование титановых сплавов для ответственных деталей газотурбинных двигателей (ГТД) требует тщательного подхода к формированию структуры и учета ее параметров при проведении процессов деформирования и термообработки. Согласно данным [1, 2], различия в типе и параметрах структуры приводят к существенному разбросу механических свойств в пределах одного сплава. Следовательно, управляя структурным состоянием титановых сплавов методами механической и термической обработок можно существенно повысить их механические свойства.

Прирост механических свойств сплавов до последнего времени получали главным образом за счет легирования и изменения фазового состава [3]. В настоящее время для улучшения механических характеристик сплавов используют технологию интенсивной пластической деформации (ИПД), в частности, винтовую экструзию (ВЭ) [4, 5], основанную на формировании в материалах нано- и субмикроструктурной (СМК) структуры. Формирование СМК структуры в титановых сплавах и, как следствие, увеличение их конструкционной прочности обеспечивает возможность повышения эксплуатационных свойств изделий.

Анализ литературных данных показал, что уменьшение зерен до СМК размера может приводить и к ухудшению ряда механических характеристик. Так, заметно снижается пластичность (относительное удлинение) [6] и ухудшаются свойства, связанные с ней, например, ударная вязкость, вязкость разрушения и т.д.

Целью настоящей работы являлось повышение уровня прочности сложнелегированного титанового сплава при нормальной и повышенных температурах за счет получения СМК структуры и последующей ее стабилизации.

**Материалы и методики исследований**

Заготовки для исследования вырезали из штампованного фрагмента детали из сплава ВТ25У, свойства которого регламентируются требованиями ОСТ 1 900197 – 89. Химический состав сплава соответствовал требованиям ОСТ 190013 – 81.

Для повышения деформационной способности титанового сплава проводили термообработку в виде закалки с 900°C [7] в электрической печи СНО 4,0×8,0×2,6/10. Для контроля температуры в рабочем пространстве печи применяли хромель-алюмелевую термопару типа «ТХА» (ГОСТ 3044-84). Запись и регулировка температуры осуществлялась автоматическим потенциометром КСПЗ-П (ГОСТ 7164-78) с градуировкой шкалы ХА<sub>68</sub>. Точность измерения температуры составляла ±5°C.

Образцы с СМК структурой были получены методом ВЭ.

Микроструктурный анализ проводили с использованием растрового электронного микроскопа JSM – Т300 фирмы JEOL при ускоряющем напряжении 20...30 кВ во вторичных электронах.

Испытания при повышенной температуре (330°C) проводили по ГОСТ 9651 – 84 на установке для кратковременных жаропрочных испытаний «УММ-20», оснащенной муфельной нагревательной электропечью. Контроль температуры осуществляли термоэлектрической термопарой типа ТХА-101М, терморегулятор - вольтметр универсальный В7-38.

**Обсуждение результатов исследований**

Микроструктура исходной заготовки представляла смесь  $\alpha+\beta$ -фаз равноосного типа размерами 4...6 мкм. Деформация сложнoleгированного сплава без предварительной термической обработки вызывала разрушение заготовок. Как показали ранее проведенные исследования [7], для реализации деформации методом ВЭ необходимо проведение предварительной термообработки, обеспечивающей формирование структуры  $\alpha''$ -фазы с более высокой деформационной способностью. В результате проведения деформирования в сплаве получена микроструктура с размером структурных составляющих до 1 мкм. Результаты испытаний механических свойств структурированных образцов из сплава ВТ25У при нормальной и повышенной (330°C) температурах представлены в таблице 1.

Таблица 1

Механические свойства сплава ВТ25У в исходном структурном состоянии и после ИПД

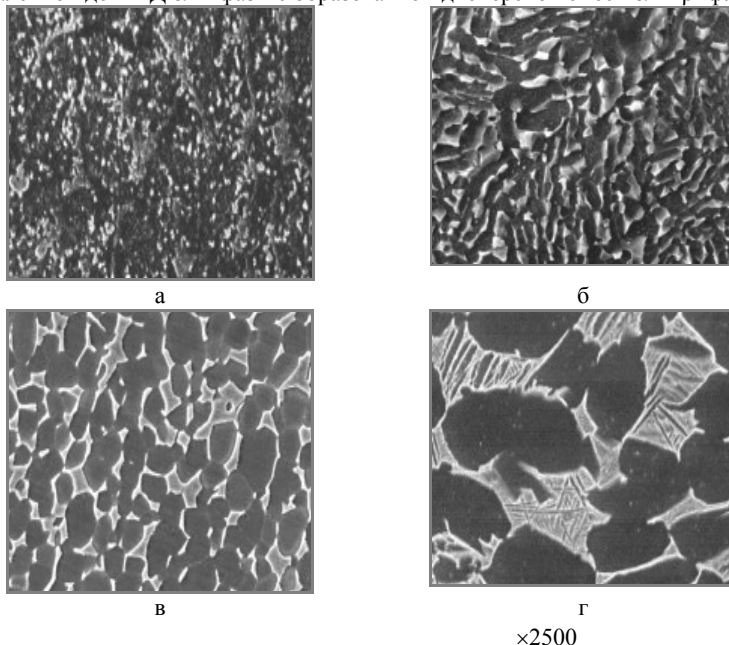
Состояние сплава	Механические свойства											
	$\sigma_b$ , МПа	$\Delta\sigma_b$ , %	$\delta$ , %	$\Delta\delta$ , %	$\psi$ , %	$\Delta\psi$ , %	$\sigma_{0.330}$ , МПа	$\Delta\sigma_{0.330}$ , %	$\delta_{330}$ , %	$\Delta\delta_{330}$ , %	$\psi_{330}$ , %	$\Delta\psi_{330}$ , %
исходное	1150	—	8,0	—	18	—	945	—	11,0	—	19,0	—
после ИПД	1600	28	6,5	18,7	20	10	795	16	14,0	21	28,4	33

Из данных таблицы 1 следует, что формирование СМК структуры в сплаве привело к повышению предела прочности  $\sigma_b$  и относительного сужения по сравнению с исходным структурным состоянием на 28% и 10% соответственно. Снижение относительного удлинения, по всей видимости, обусловлено накоплением пластических деформаций и связанными с этим процессами упрочнения. При повышенной температуре показатели кратковременной прочности снизились на 16%. Это может быть связано с термодинамически нестабильным состоянием структуры после деформации. В связи с этим предложено стабилизировать структуру для повышения уровня прочности СМК титановых сплавов при повышенных температурах. С этой целью наиболее эффективным методом воздействия на размер, морфологию и термодинамическое состояние структуры является термическая обработка.

Для предупреждения перегрева, приводящего к резкому снижению механических свойств титановых сплавов, при назначении режимов термообработки необходимо учитывать температуру полиморфного  $\alpha\leftrightarrow\beta$ -превращения ( $T_{\text{пн}}$ ). В работах [8] установлен эффект снижения  $T_{\text{пн}}$  для СМК состояния ( $\alpha+\beta$ ) - титановых сплавов в среднем на 60°C. Учитывая снижение температуры  $\alpha\leftrightarrow\beta$  - превращения в двухфазных СМК титановых сплавах, стандартные температурные режимы термообработки не могут быть применены к сплавам, подвергаемым ИПД. В связи с этим предложено исследовать влияние температуры отжига на структуру и свойства сложнoleгированного СМК титанового сплава.

Результаты металлографического анализа позволили установить, что при отжиге до 400°C заметных изменений в микроструктуре сплава не происходи-

ло: микроструктура была аналогична микроструктуре после ИПД (рис. 1, а). После отжига при 500°C – частицы  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз укрупнились (рис. 1, б-в), а начиная с температуры 600°C количество  $\alpha$ - фазы уменьшалось, а  $\beta$ - фазы – увеличивалось от ~50% в исходном состоянии до ~70% после отжига при 800°C и 100% - выше 800°C.  $\alpha''$ - фаза в структуре сплава не обнаружена. Это позволяет считать, что в процессе термообработки происходит полный распад закаленной до ИПД  $\alpha''$ - фазы с образованием дисперсной смеси  $\alpha$ - и  $\beta$ - фаз.



**Рис. 1.** Микроструктура сплава VT25У после ИПД и термообработки при различных температурах: а – 400°C; б – 500°C; в – 600°C; г – 800°C.

Нагрев до 800°C привел к формированию тонкопластинчатой структуры внутри  $\beta$ - превращенных зерен, что свидетельствовало о превышении температуры  $T_m$  (рис. 1, г). Из полученного набора микроструктур видно, что уже при 600°C из СМК структуры в сплаве VT25У формируется микроструктура бимодального типа, в то время как для ее получения по стандартной технологии требуется высокотемпературный нагрев вблизи температур  $\beta$ - области (960°C) с последующим отжигом при 550...600°C.

Таким образом, определен температурный режим термообработки сложного легированного СМК титанового сплава (отжиг при 600°C), позволяющий не только стабилизировать структурное состояние сплава после ИПД, но и повысить пластичность до стандартных значений (табл. 1), а также уровень кратковременной прочности при повышенной температуре на 13% (табл. 2).

Из полученных результатов следует, что измельчение структурных составляющих до СМК состояния позволяет повысить уровень механических

свойств сложнoleгированного титанового сплава за счет формирования однородной дисперсной структуры, а последующий отжиг приводит к снятию напряжений и стабилизации структуры.

*Таблица 2*

*Механические свойства сплава BT25У после ИПД и стабилизирующей термообработки*

Состояние сплава	Механические свойства								
	$\sigma_{в}$ , МПа	$\Delta\sigma_{в}$ , %	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\sigma_{в/330}$ , МПа	$\Delta\sigma_{в/330}$ , %	$\delta_{330}$ , %	$\psi_{330}$ , %	$\Delta\psi_{330}$ , %
исходное	1150	–	8,0	18,0	945	–	11,0	19,0	–
после ИПД и отжига	1346	15,0	10,0	22,0	1087	13,0	11,0	20	5,0

Такие изменения механических свойств позволяют прогнозировать увеличение потребления высоколегированных титановых сплавов для роторных деталей авиадвигателей нового поколения.

#### **Выводы**

1. Исследовано влияние ИПД на структуру и свойства сложнoleгированного титанового сплава: определены механические свойства сплава до и после проведения деформации;

2. Разработан режим термообработки структурированного титанового сплава с целью снятия напряжений и стабилизации структурного состояния сплава после деформации. При этом формирование в сплаве СМК структуры привело к повышению уровня кратковременной прочности при  $T=330^{\circ}\text{C}$  (ГОСТ 1497-84) в среднем на 13% по сравнению с исходным микроструктурным состоянием.

#### **Список использованных источников**

1. Кунгурцев М.С. Закономерности формирования структуры и физико-механических свойств титана при температурном воздействии: дис...канд. наук: 01.04.07 / Кунгурцев Максим Сергеевич. – Б., 2012. – 116 с.
2. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. М.:ВИЛС-МАТИ, – 2009, – 458 с.
3. Азаренков Н.А., Веревкин А.А., Ковтун Г.П. Основы нанотехнологий и наноматериалов. – X., 2009, – С.39 – 40.
4. Valiev R.Z. Islimgaliev R.K., Alexandrov I.V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. // Prog. Mater. Sci. – 2000. – Vol. 45. – P. 103 – 109.
5. Садилова Г.Х., Латыш В.В., Семенова И.П. Влияние интенсивной пластической деформации и термомеханической обработки на структуру и свойства. // МиТОМ. – 2005, №11(605). – С. 31 – 34.
6. Салищев Г.А., Галеев Р.М., Жеребцов С.В. Механические свойства титанового сплава BT6 с микрокристаллической и субмикрокристаллической структурами. // Металлы. – 1999, №6. – С. 84 – 87.
7. Овчинников А.В., Распорня Д.В., Басов Ю.Ф., Глотка Т.А. Реализация метода винтовой экструзии для сложнoleгированного титанового сплава BT25У. // Титан-2012: производство и применение. – Запорожье, 2012. – С. 104–106.
8. Коваленко Т.А., Овчинникова И.А., Омельченко О.С., Глотка Т.А. Влияние интенсивной пластической деформации на критическую температуру Ас3 титанового сплава BT8. // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2011, Вып. 58. – С.407 – 412.