

УДК 669.295

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОЖНОЛЕГИРОВАННОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

ГЛОТКА Т.А.<sup>1\*</sup>,  
ПЕРЕПЕЛКИНА М.Н.<sup>2</sup>,  
ОМЕЛЬЧЕНКО О.С.<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра механики, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (061)769 83 62, e-mail: glotka87@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0223-1171

<sup>2</sup> Кафедра механики, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (061)769 83 62, e-mail: margorepelkina@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0002-8236-1015

<sup>3</sup> Кафедра механики, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (061)769 83 62, e-mail: omelchenko15@ukr.net

**Аннотация.** *Цель.* Повышение стабильности и уровня механических свойств титанового сплава путем механо-термической обработки. *Методика.* В качестве исходного материала использовали титановый сплав ВТ25У в субмикроструктуральном и термоупрочненном состоянии. Проводили микроструктурные исследования, интенсивную пластическую деформацию, термическую обработку и механические испытания. *Результаты.* Получены образцы с повышенным уровнем механических свойств и стабилизированным структурным состоянием. Установлено, что ИПД методом ВЭ за счет больших степеней деформации, и связанным с этим увеличением плотности дислокаций, обеспечивает формирование в титановом сплаве однородной СМК структуры при сохранении исходных линейных размеров титановой заготовки. Последующий изотермический отжиг приводит к снятию напряжений и стабилизации структурного состояния сплава. *Научная новизна.* Обнаружены качественные изменения структуры и повышенный уровень механических свойств сложнолегированного титанового сплава. *Практическая значимость.* Формирование СМК структуры обеспечивает изменение механических свойств сложнолегированных титановых сплавов при повышенной температуре, что перспективно для практического применения в авиационной промышленности.

*Ключевые слова:* сложнолегированные титановые сплавы; винтовая экструзия; структура; механические свойства; термическая обработка

## МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СКЛАНОЛЕГОВАНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ, ОТРИМАНОГО ІНТЕНСИВНОЮ ПЛАСТИЧНОЮ ДЕФОРМАЦІЄЮ

ГЛОТКА Т.А.<sup>1\*</sup>,  
ПЕРЕПЬОЛКІНА М.М.<sup>2</sup>,  
ОМЕЛЬЧЕНКО О.С.<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра механіки, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061)769 83 62, e-mail: glotka87@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0223-1171

<sup>2</sup> Кафедра механіки, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061)769 83 62, e-mail: margorepelkina@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0002-8236-1015

<sup>3</sup> Кафедра механіки, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061)769 83 62, e-mail: omelchenko15@ukr.net

**Анотація.** *Мета.* Підвищення стабільності та рівня механічних властивостей титанового сплаву шляхом механо-термічної обробки. *Методика.* В якості вихідного матеріалу використовували титановий сплав ВТ25У в субмікроструктуральному та термозмцненому стані. Проводили микроструктурні дослідження, інтенсивну пластичну деформацію, термічну обробку та механічні випробування. *Результати.* Отримано зразки з підвищеним рівнем механічних властивостей та стабілізованим структурним станом. Встановлено, що ІПД методом ГЕ за рахунок більших ступеней деформації та пов'язаним з цим збільшенням густини дислокацій, забезпечує формування в титановому сплаві однорідної СМК структури при збереженні вихідних лінійних розмірів титанової заготовки. Наступний ізотермічний відпал призводить до зняття напружень та стабілізації структурного стану сплаву. *Накова новизна.* Виявлені якісні зміни структури та підвищений рівень механічних властивостей складнолегованого титанового сплаву. *Практична значимість.* Формування СМК структури забезпечує зміну механічних властивостей складнолегованих титанових сплавів при підвищеній температурі, що перспективно для практичного використання в авіаційній промисловості.

Ключові слова: складнолеговані титанові сплави; гвинтова екструзія; структура; механічні властивості; термічна обробка

## MECHANICAL PROPERTIES OF COMPLEX ALLOYED TITANIUM AFTER SEVERE PLASTIC DEFORMATION

GLOTKA T. A.<sup>1\*</sup>,  
PEREPOLKINA M. N.<sup>2</sup>,  
OMELCHENKO O. S.<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Department “Mechanics”, Zaporozhye National Technical University, Zhukovskogo St., 64, 69063, Zaporozhye, Ukraine, tel. +38 (061)769 83 62, e-mail: glotka87@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0223-1171

<sup>2</sup> Department “Mechanics”, Zaporozhye National Technical University, Zhukovskogo St., 64, 69063, Zaporozhye, Ukraine, tel. +38 (061)769 83 62, e-mail: margoperepolkina@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0002-8236-1015

<sup>3</sup> Department “Mechanics”, Zaporozhye National Technical University, Zhukovskogo St., 64, 69063, Zaporozhye, Ukraine, tel. +38 (061)769 83 62, e-mail: omelchenko15@ukr.net

**Abstract. Object.** Increasing of stability and mechanical properties level of titanium alloy by means of mechanical-thermal treatment **Methodology.** Titanium alloy BT25Y in submicrocrystalline and heat treated condition was exploited as incoming billets. Microstructure investigations, severe plastic deformation, heat treatment and mechanical tests were held. **Results.** Specimens with increased level of mechanical properties and stabilized structural condition were obtained. It was ascertained that SPD by method of screw extrusion due to large deformation degree and associated increasing of dislocation density provides formation of uniform structure with saving of titanium billet incoming linear size. Further isothermal annealing leads to stress relaxation and stabilization of alloy structural condition. **Scientific novelty.** Qualitative structure changes and mechanical properties increased level of complex alloyed titanium were revealed. **Practical value.** Submicrocrystalline structure formation provides changes of mechanical properties of complex alloyed titanium under elevated temperatures, that is perspective for practical application in aviation industry.

**Keywords:** complex-titanium alloys; screw extrusion; structure; mechanical properties; heat treatment

### Введение

Одной из важнейших проблем современного металловедения является повышение уровня механических свойств титановых сплавов. В настоящее время их широко применяют для изготовления роторных деталей газотурбинного двигателя (ГТД).

Известно, что в зависимости от условий эксплуатации изделий материал, из которого они изготовлены, должен обладать определенным комплексом механических свойств [15]. Так, механические свойства титановых сплавов в зависимости от степени легирования, нагартовки, термической и термомеханической обработки колеблются в широких пределах, а также зависят от многообразия типов и параметров структуры полуфабрикатов [2].

Известно, что в силу низкой теплопроводности и значительной анизотропии термического расширения титана, а также из-за высокого химического сродства к кислороду, в процессе горячей деформации и теплосмен по сечению титановых заготовок возникает значительная структурная, химическая и механическая неоднородность свойств. В результате, в объеме деформированных титановых заготовок формируются неравновесные твердые растворы со структурной и многокомпонентной кристаллографической текстурованностью, которые приводят к усилению анизотропии механических свойств, к разбросу результатов механических испытаний и к снижению их уровня, особенно пластических свойств деформированных заготовок [5, 16].

Уже в процессе пластической деформации или на стадии последующей термообработки имеет место распад неравновесных твердых растворов, вызывающий охрупчивание сплавов [12]. Вероятно, поэтому на практике при производстве титановых изделий и полуфабрикатов (особенно больших толщин) нередко сталкиваются с неоднозначностью и нестабильностью механических свойств, несмотря на близкие режимы обработки [4].

Анализ литературных данных показал, что даже изделия, изготовленные по одной технологии, могут иметь существенный разброс характеристик [8]. Поэтому стабильность механических свойств, наряду с их уровнем, является одним из основных требований, предъявляемых к титановым сплавам, которые используются для изготовления изделий ответственного назначения [6, 11, 14].

### Цель

Целью настоящей работы явилось исследование повышения стабильности и уровня механических свойств титанового сплава путем механо-термической обработки.

### Методика и оборудование для проведения испытаний

В работе исследовали механические свойства титанового сплава BT25Y в субмикроструктурном состоянии и термоупрочненном по стандартным режимам. Интенсивную пластическую деформацию (ИПД) методом винтовой экструзии (ВЭ) осуществляли на гидравлическом прессе

усилием 1,5 МН. Использовали специальную матрицу с винтовым каналом. Полученные методом ВЭ заготовки имели прямоугольное сечение 10×20×40 мм – из них вырезали образцы для исследования микроструктуры. Для определения механических свойств изготавливали заготовки следующих размеров – 25×40×60 мм. Образцы для механических испытаний на статическую прочность при 20°С соответствовали № 7 типу II по ГОСТ 1497 –84, для испытаний при повышенной температуре (ГОСТ 9651 – 84). Размеры образцов были идентичны образцам для испытаний при комнатной температуре. Для стабилизации структуры после ВЭ в титановом сплаве BT25Y, проводили термообработку образцов. Для реализации термообработки использовали электрическую печь СНВ 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 типа КСПЗ-П (ГОСТ 7164-78) с градуировкой шкалы ХА<sub>68</sub>. Точность измерения температуры составляла ±5°С. Исследования поверхностей разрушения проводили на растровом микроскопе РЭМ – 106И.

#### Результаты исследований и их обсуждение

Известно, что термическая обработка является важнейшим процессом для достижения высокой прочности, пластичности, вязкости и необходимой стабильности этих свойств в процессе эксплуатации изделий.

В настоящее время в связи с применением высоколегированных титановых сплавов внедрение операций термической обработки становится неотъемлемой задачей. Однако следует учесть тот факт, что с повышением предела прочности при упрочняющей термической обработке, характеристики пластичности титановых сплавов снижаются; они приобретают повышенную чувствительность к концентраторам напряжений, в результате их эксплуатационные характеристики ухудшаются [1]. Другим фактором, ограничивающим использование упрочняющей термической обработки является наличие дефектов исходной структуры промышленных полуфабрикатов. Закалка и последующее старение обеспечивает получение высоких механических свойств только на полуфабрикатах с исходной мелкозернистой структурой.

На сегодняшний день особое внимание уделяется направлению работ связанных с получением в титановых сплавах СМК структуры (со средним размером зерен до 1 мкм). Хорошо известно, что измельчение зерен способствует увеличению пластичности и прочности материалов. Практически все традиционные методы влияния на механические свойства материалов повышают лишь одну из этих характеристик за счет снижения другой. Материалы могут быть прочными или пластичными, но обычно

не обладают обоими свойствами одновременно. Вместе с тем, недавние исследования показали, что наноструктурирование может привести к уникальному сочетанию особо высокой прочности и пластичности [3, 9].

Одними из наиболее эффективных методов получения СМК структуры в титановых заготовках являются методы ИПД, в частности, ВЭ [13, 17]. Этот процесс предназначен для эффективного преобразования структуры и свойств материалов без существенного изменения размеров и формы заготовок. Метод ВЭ позволяет получать сплавы с СМК структурой, что приводит к резкому изменению их механических свойств по сравнению с исходным состоянием [10, 20].

Объектом исследований выбраны образцы из сложнелегированного титанового сплава BT25Y, используемого для изготовления наиболее нагруженных деталей компрессора – моноколес. Микроструктура исходных заготовок состояла из α- и β - фаз величиной 10...15 мкм.

В связи с вышеизложенным, для повышения уровня механических свойств титанового сплава BT25Y проведено ИПД методом ВЭ [7]. Результаты механических испытаний при нормальной и повышенной температурах представлены в таблице 1.

Таблица 1

#### Механические свойства сплава BT25Y в исходном структурном состоянии и после ИПД/ Mechanical properties of BT25Y alloy in initial structural condition and after SPD

Механические свойства	Состояние сплава	
	исходное	после ИПД
$\sigma_b$ , МПа	1150	1600
$\Delta\sigma_b$ , %	–	28
$\delta_2$ , %	8,0	6,5
$\Delta\delta_2$ , %	–	18,7
$\psi$ , %	18	20
$\Delta\psi$ , %	–	10
$\sigma_{b/330}$ , МПа	945	795
$\Delta\sigma_{b/330}$ , %	–	16
$\delta_{330}$ , %	11,0	14,0
$\Delta\delta_{330}$ , %	–	21
$\psi_{330}$ , %	19,0	28,4
$\Delta\psi_{330}$ , %	–	33

Анализ данных таблицы 1 показал, что формирование СМК структуры в сплаве BT25Y обусловило повышение прочности  $\sigma_b$  на 28%, значения относительного сужения сохранились практически на исходном уровне, при снижении относительного удлинения и кратковременной прочности при 330°С по сравнению со стандартной структурой данного сплава.

Анализ поверхности разрушения образцов из сплава BT25Y в исходном микрокристаллическом состоянии (рис. 1) показал наличие слабо

выраженных сколов, поверхность разрушения более шероховатая, чем в образцах с СМК структурой (рис. 2).



Рис.1. Характерный внешний вид разрывных образцов из сплава VT25У при 20 °С в исходном структурном состоянии/ Typical appearance of VT25U alloy tensile specimens at 20 °С in initial structure condition



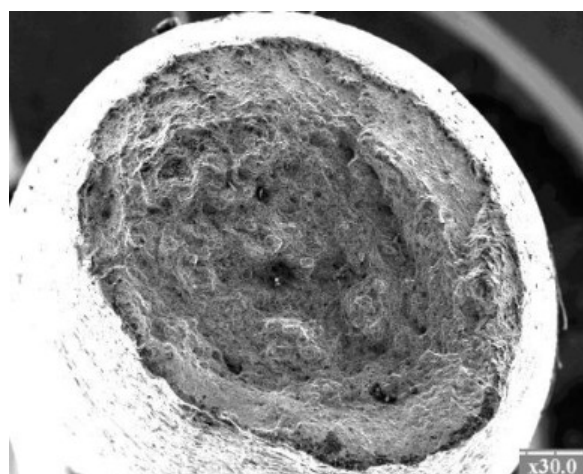
Рис.2. Характерный внешний вид разрывных образцов из сплава VT25У при 20 °С в СМК состоянии/ Typical appearance of VT25U alloy tensile specimens at 20 °С in submicrocrystalline condition

Полученные результаты можно объяснить тем, что после ИПД в СМК состоянии разрушение образцов за счет более однородного микроструктурного состояния происходит с полным исчерпанием ресурса пластичности [18, 19] (в результате образовывалась утоненная шейка вблизи излома, рис. 2).

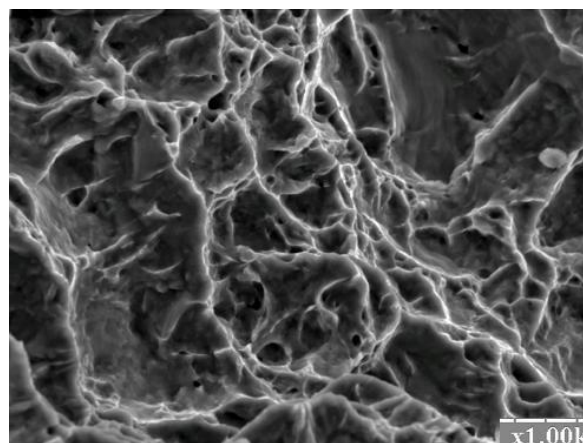
Поверхности разрушения образцов с СМК структурой, испытанных при нормальной (20 °С) температуре, характеризовались мелкокристаллическим рельефом, практически во всех образцах наблюдали две зоны типа «чашка-конус» (с плоским дном и наклонными краями). В центральной части – зона отрыва, перпендикулярная действующей нагрузке, по ободу – скосы, свидетельствующие о достаточной пластичности сплава.

Исследования поверхностей разрушения при более высоких разрешениях позволили установить, что образцы из сплава VT25У в исходном микрокристаллическом состоянии преимущественно вязкого характера, однако в отдельных участках наблюдаются гладкие прямолинейно очерченные области, не имеющие ямок и совпадающие по размерам с выделениями  $\beta$  - фазы, что обусловлено, вероятно, отрывом отдельных  $\alpha/\beta$  - колоний  $\beta$  - фазы при разрушении.

В образцах с исходной микроструктурой количество этих участков большее, чем в изломах образцов с СМК структурой, что, по-видимому, обусловило их более низкую пластичность (рис. 3). Размеры ямок вязкого разрушения и плоских участков практически соизмеримы с величиной  $\alpha$ - и  $\beta$  - фаз и составляют 5...10 мкм, что свидетельствует о разрушении по отдельным структурным составляющим.



а

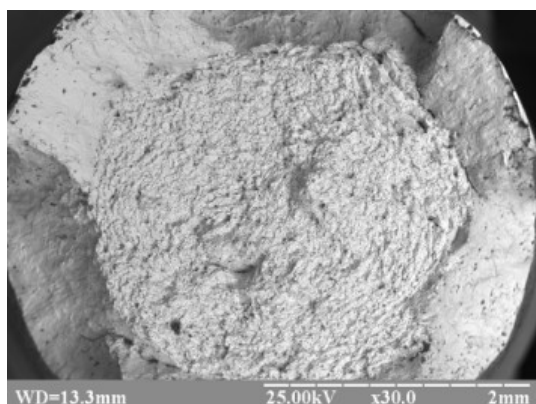


б

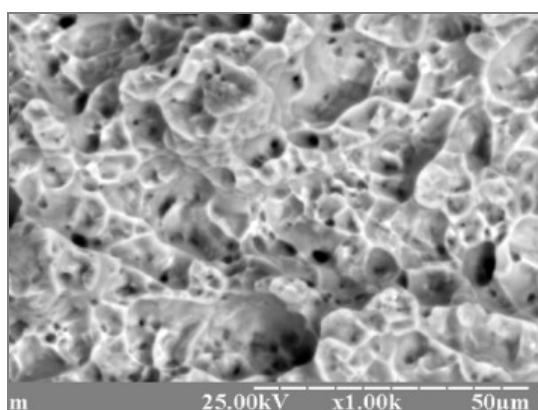
Рис. 3. Образец из сплава VT25У в исходном микрокристаллическом состоянии / VT25U alloy specimen in initial microcrystalline condition

Фрактограммы, снятые с поверхностей разрушения образцов с СМК структурой, характеризовались более развитой поверхностью, проявляющейся в более тонких границах раздела

ямок и существенно меньшем их размере, что свидетельствовало о большей энергоёмкости процесса разрушения. Размеры ямок разрушения в СМК образцах находились в пределах от 5 до 15 мкм (рис. 4).



а



б

Рис. 4. Образец из сплава BT25U в СМК состоянии/ BT25U alloy specimen in submicrocrystalline condition

Поверхности разрушения образцов, испытанных при 330°C, сколов, характерных для испытаний при 20°C, не имели. При этом шейка в рабочей части жаропрочных образцов вблизи поверхности разрушения более узкая по сравнению с испытаниями при комнатной температуре, более выраженная в образцах с СМК структурой, что свидетельствует о высокой пластичности сплава в таком структурном состоянии.

Таким образом, применение титановых сплавов в СМК состоянии позволяет существенно повысить механические свойства при нормальной температуре 20°C без дополнительного легирования, однако имело место снижение относительного удлинения и прочности при повышенной температуре.

Кроме того, необходимо учитывать термодинамически нестабильное состояние СМК структуры после ВЭ [21], в связи с чем необходимо было стабилизировать структуру и обеспечить требуемый уровень прочности СМК титановых сплавов при повышенных температурах.

В связи с этим предложено стабилизировать структуру для повышения уровня прочности СМК титановых сплавов при повышенных температурах. С этой целью проведено термическую обработку структурированных образцов в виде отжига. В результате проведенных исследований, определен температурный режим термообработки сложнолегированного СМК титанового сплава (отжиг при 600°C), позволяющий не только стабилизировать структурное состояние сплава после ИПД, но и повысить пластичность до стандартных значений, а также уровень кратковременной прочности при повышенной температуре на 13% (табл. 2).

Таблица 2

**Механические свойства сплава BT25U после ИПД и стабилизирующей термообработки/ Mechanical properties of BT25U alloy after SPD and stabilization heat treatment**

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

Из полученных результатов следует, что измельчение структурных составляющих до СМК состояния позволяет повысить уровень механических свойств сложнолегированного титанового сплава за счет формирования однородной дисперсной структуры, а последующий отжиг приводит к снятию напряжений и стабилизации структуры. Такие изменения в механических свойствах делают привлекательными данные сплавы для практического применения в авиационной промышленности.

**Научная новизна и практическая значимость**

В настоящей работе установлены закономерности влияния параметров СМК структуры на механические характеристики сплава BT25U при повышенной температуре, а также закономерности формирования стабильной структуры в результате термообработки сплава BT25U, что обеспечило повышение его механических свойств до 20%.

**Выводы**

1. Получены образцы сложнолегированного титанового сплава BT25U методом ВЭ.

2. По результатам механических испытаний установлено повышение прочностных свойств образцов в структурированном состоянии.

3. Полученные результаты позволили установить, что измельчение структурных составляющих до СМК состояния дает возможность повысить уровень

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

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ашкенази, Е.К. Анизотропия машиностроительных материалов / Е.К. Ашкенази. – Л.:Машиностроение, 1969. – 110 с.
2. Брун, М.Я. Структура и механические свойства нового жаропрочного титанового сплава ВТ25У / М.Я. Брун, И.В. Солдатенко, Л.А. Быкова // МиТОМ. – 1992. – №1. – С.29-31.
3. Валиев Р.З. Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации / Р.З. Валиев // Российские нанотехнологии. – 2006. – №1 – 2. – С. 208 – 216.
4. Егорова, Ю.Б. Прогнозирование механических свойств титанового сплава ВТ23 после термической обработки / Ю.Б. Егорова, Ю.А. Попова, И.М. Куделина // Технология легких сплавов. – 2008. – №3. – С. 34 – 39.
5. Илларионов, Э.И. Исследование влияния характера структуры на механические свойства титановых  $\alpha$ -сплавов ВТ5, ВТ5-1 / Э.И. Илларионов // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. – 2002. – №4. – С. 44 – 46.
6. Иноземцев, А.А. Современные титановые сплавы и проблемы их развития / А.А. Иноземцев, И.Г. Башкатов, А.С. Каряковцев. – М.:ВИАМ, 2010. – с. 43-45.
7. Исследование механических свойств титановых сплавов с субмикроструктурной структурой / Г.А. Салищев, С.В. Жеребцов, С.П. Малышева и др. // Титан. – 2009. – №1. – С. 21 – 25.
8. Куделина И.М. Управление структурой и свойствами по сечению полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6 методом термоводородной обработки: дис. ...канд. техн. наук:05.16.01 / Куделина Ирина Михайловна. – М., 2011. – 186 с.
9. Опытнo-промышленная установка винтовой экструзии для проведения маркетинговых исследований объемных наноматериалов / В.Н. Варюхин, Я.Е. Бейгельзимер, С.Г. Сынков и др. // Металл и литье Украины. – 2010. – №6. – С. 17 – 21.
10. Особенности механической обработки титана с субмикроструктурной структурой / А.А. Симонова, А.Я. Мовшович, Н.В. Вережуб и др. // Вестник КДПУ им. М. Остроградского. – 2009. – №6. – С. 70 – 75.
11. Перспективы разработки новых титановых сплавов / В.Г. Анташев, Н.А. Ночовная, А.А. Ширяев и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. – 2011. – С. 60 – 67.
12. Попов, А.А. Легирование и термическая обработка жаропрочных сплавов титана / А.А. Попов, А.В. Трубочкин // Титан в СНГ–2006: сб. науч. трудов – К., 2006. – С. 148 –155.
13. Столяров, В.В. Деформационные методы измельчения структуры / В.В. Столяров // Вестник научно-технического развития. – 2013. – №4(68). – С. 29 – 36.
14. Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины / С.Л. Антонюк, А.Г. Моляр, А.Н. Калинюк и др. // Современная электрометаллургия. – 2003. – №1. – С. 10 – 14.
15. Фридман, Л.Б. Механические свойства металлов / Л.Б. Фридман. –М.:Машиностроение, 1974. – 556 с.
16. Шаповалова, О.М. Исследование стабильности механических свойств полуфабрикатов из двухфазных титановых сплавов / О.М. Шаповалова, И.А. Маркова, Т.И. Ивченко // Вестник двигателестроения. – 2009. – №1. – С. 125 – 128.
17. Beygelzimer Y. Features of Twist Extrusion: Method, Structures & Material Properties / Y. Beygelzimer, D. Orlov, A. Korshunov // Solid State Phenomena. – 2006. – No.114. – pp. 69-78.
18. Figueiredo R. Using Severe Plastic Deformation for the Processing of Advanced Engineering Materials / R. Figueiredo, T. Langdon // Materials Transactions. – 2009. – no. 7. –pp. 1613 – 1619.
19. Orlov D. Microstructure Evolution in Pure Al Processed with Twist Extrusion / D. Orlov, Y. Beygelzimer, S. Synkov // Materials Transactions. – 2009. – no. 1. – pp. 96 – 100.
20. Shkatulyak N. Effect of twist extrusion and subsequent rolling on the texture and microstructure of aluminium alloy / N. Shkatulyak // Materials Science and Engineering. – 2014. – No.1. – pp. 15 – 25.
21. Zharebtsov S.V. Formation of submicrocrystalline structure in titanium and its alloy under severe plastic deformation / S.V. Zharebtsov, G.A. Salishchev, R.M. Galeev // Defect and Diffusion Forum. 2002. V.208-209. pp.237-240.

### REFERENCES

1. Ashkenazi E.K., *Anizotropiya mashinostroitel'nykh materialov* [Anisotropy of engineering materials]. L., Mashynostroenie [Mechanical engineering], 1969. 110 p.

2. *Struktura i mekhanicheskie svoystva novogo zharoprochnogo titanovogo splava VT25U* Brun M.Ya., Soldatenko I.V., Bykova L.A. [Structure and mechanical properties of new heat-resistant BT25Y titanium alloy]. *MiTOM* [Metal research and heat treatment of metals ], 1992, no 1, pp. 29–31.
3. Valiev R.Z. *Sozdanie nanostrukturnykh metallov i splavov s unikal'nymi svoystvami, ispol'zuya intensivnye plasticheskie deformatsii* [Development of nanostructured metals and alloys with unique properties by means of severe plastic deformation]. *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian nanotechnologies], 2006, no 1 – 2, pp. 208 – 216
4. Yegorova Yu.B., Popova Yu.A., Kudelina I.M. *Prognozirovanie mekhanicheskikh svoystv titanovogo splava VT23 posle termicheskoi obrabotki* [Predicting of BT23 titanium alloy mechanical properties after heat treatment] *Tekhnologiya legkikh splavov* [Light metal alloys technology], 2008, no №3, pp. 34 – 39.
5. Yegorova Yu.B., Popova Yu.A., Kudelina I.M. *Prognozirovanie mekhanicheskikh svoystv titanovogo splava VT23 posle termicheskoi obrabotki* [Predicting of BT23 titanium alloy mechanical properties after heat treatment] *Tekhnologiya legkikh splavov* [Light metal alloys technology], 2008, no №3, pp. 34 – 39.
6. Inozemtsev A.A., Bashkatov I.G., Karyakovtsev A.S. *Sovremennye titanovye splavy i problemy ikh razvitiya* [Current titanium alloys and their development problems]. M.:VIAM, 2010. pp. 43-45.
7. Salishchev G.A., Zherebtsov S.P., Malysheva S.V. *Issledovanie mekhanicheskikh svoystv titanovykh splavov s submikrokristalliche-skoy strukturoy* [Investigation of mechanical properties of titanium alloys with submicrocrystalline structure]. *Titan* [Titanium], 2009, no №1, pp. 21 – 25.
8. Kudelina I.M. *Upravlenie strukturoy i svoystvami po secheniyu polufabrikatov iz titanovogo splava VT6 metodom termovodorodnoy obrabotki* Diss. [Controlling of structure and properties through cross-section of BT6 titanium alloy semiproducts by means of thermo-hydrogen treatment]: 05.16.01 / Kudelina Irina Mikhaylovna. – M., 2011. – 186 p.
9. Varyukhin V.N., Beygelzimer Ya.E., Synkov S.G. *Opytno-promyshlennaya ustanovka vintovoy ekstruzii dlya provedeniya marketingovykh issledovaniy ob'emnykh nanomaterialov* [Semiproduction experimental screw extrusion plant for carrying of bulk nanostructured materials marketing research]. *Metall i lit'ye Ukrainy* [Ukrainian metal and casting], 2010, no №6, pp. 17 – 21.
10. Simonova A.A., Movshovich A.Ya., Verezub N.V. *Osobennosti mekhanicheskoy obrabotki titana s submikrokristallicheskoy strukturoy* [Machining work aspects of titanium with submicrocrystalline structure]. *Vestnik KDPU im. M. Ostrogradskogo* [Bulletin of Ostrogradskii KSPU], 2009, no №6, pp. 70 – 75.
11. Antashev V.G., Nochovnaya N.A., Shiryaev A.A. *Perspektivy razrabotki novykh titanovykh splavov* [New titanium alloys development perspectives]. *Vestnik MGTU im. N.E.Baumana* [ Bulletin of Bauman MSTU ], 2011, pp. 60 – 67.
12. Popov A.A., Trubochkin A.V. *Legirovanie i termicheskaya obrabotka zharoprochnykh splavov titana* [Alloy addition and heat treatment of heat-resistant titanium]. *Mezhdunarodnaya konferentsiya Ti-2011 v SNG: sbornik trudov* – [International Conference Ti-2006 CIS (25.04–28.04.2011): proceedings]. Kiev, RIO IMP named after G.V. Kurdyumova NANU, 2006, pp. 148–155.
13. Stolyarov V.V. *Deformatsionnye metody izmel'cheniya struktury* [Deformation methods of structure refinement]. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya* [Bulletin of scientific and technical development], 2013, no 4(68), pp. 29 – 36.
14. Antonyuk S.L., Molyar A.G., Kalinyuk A.N. *Titanovye splavy dlya aviatsionnoy promyshlennosti Ukrainy* [Titanium alloys for aviation industry]. *Sovremennaya elektrometallurgiya* [Current electrometallurgy], 2003, no 1, pp. 10 – 14.
15. Fridman L.B. *Mekhanicheskie svoystva metallov* [Mechanical properties of metals]. Moscow, Mashinostroenie, 1974. 556 p.
16. Shapovalova, O.M., Markova I.A., Ivchenko T.I. *Issledovanie stabil'nosti mekhanicheskikh svoystv polufabrikatov iz dvukhfaznykh titanovykh splavov* [ Investigation of mechanical properties stability of two-phase titanium alloys semiproducts ]. *Vestnik dvigatelestroeniya* [Engine technology bulletin], 2009, no 1, pp. 125 – 128.
17. Beygelzimer Y., Orlov D., Korshunov A. Features of Twist Extrusion: Method, Structures & Material Properties / *Solid State Phenomena*. – 2006. – No.114. – pp. 69-78.
18. Figueiredo R., Langdon T. Using Severe Plastic Deformation for the Processing of Advanced Engineering Materials / *Materials Transactions*. – 2009. – no. 7. –pp. 1613 – 1619.
19. Orlov D., Beygelzimer Y., Synkov S. Microstructure Evolution in Pure Al Processed with Twist Extrusion / *Materials Transactions*. – 2009. – no. 1. –pp. 96 – 100.
20. Shkatulyak N. Effect of twist extrusion and subsequent rolling on the texture and microstructure of aluminium alloy / *Materials Science and Engineering*. – 2014. – No.1. – pp. 15 – 25.
21. Zherebtsov S.V., Salishchev G.A., Galeyev R.M. Formation of submicrocrystalline structure in titanium and its alloy under severe plastic deformation / *Defect and Diffusion Forum*. 2002. – V.208-209. – pp.237-240.

Статья рекомендована к публикации в журнале «Д-ром техн. наук, В.И. Большаковым и д-ром техн. наук, Д.В. Лаухиным (Украина)»